

Universidad Internacional del Ecuador



Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz

**Artículo Investigación para la obtención del Título de Ingeniero en
Mecánica Automotriz**

**DESARROLLAR EL MODELO MATEMÁTICO PARA EL
MANTENIMIENTO Y CAMBIO DE LAS CELDAS DE BATERÍA
EV EN VEHÍCULOS BMW PREMIUM DE TIPO G11, G20 Y G05.**

**Jorge Alfredo Aguirre Gómez
Carlos Manuel Imbaquingo Jitala**

Director: Ing. Denny Guanuche M.Sc.

Quito, 2021

CERTIFICACIÓN

Certificamos que las palabras descritas en el presente artículo científico son de autoría de Jorge Aguirre y Carlos Imbaquingo. Declaramos bajo juramento que el mismo contiene redacción inédita y respaldada bibliográficamente. Documento que no ha sido presentado anteriormente té en algún grado o certificado profesional.



Jorge Aguirre Gómez



Carlos Imbaquingo

Yo, Ing., Denny Guanuche, certifico que conozco a los autores de la presente investigación, siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y de su intensidad, como de su contenido



Ing. Denny Guanuche M.Sc.

DIRECTOR

DEDICATORIA

Las palabras redactadas en este artículo científico están dedicadas a las mentes de la ciencia, apasionados por el conocer y la curiosidad sobre las innovaciones que giran día a día alrededor nuestro. Quiero dedicar esta investigación a aquellas personas llenas de ingenio, innovadoras y dedicadas al mundo de la mecánica automotriz. Dedicado a nuestro futuro automotriz, prometedor y lleno de apasionantes retos.

Dedico mi trabajo de titulación a mi Madre Gabriela, entrego para ella todos mis éxitos conseguidos y por conseguir, que con un corazón tan grande ha sabido guiar mis pasos para convertirme en un hombre honrado y correcto.

Dedico este artículo científico a mi Padre Jorge, quien ha compartido mis gustos y experiencias automotrices a lo largo de mi vida. Por enseñarme el camino del trabajo honrado y sacrificado. Por permitir y darme las posibilidades de perseguir mis sueños.

Dedico mi trabajo de titulación a mis hermanos Francisco y Juan Martin, mis compañeros incondicionales de vida. Este logro también es para ellos, quienes han brindado tanto cariño y apoyo en mi carrera profesional.

Jorge Aguirre

DEDICATORIA

Dedicó de todo corazón mi tesis a mi madre, pues sin ella no lo habría logrado. Tu bendición a diario a lo largo de mi vida me protege y me lleva por el camino del bien. Por eso te doy mi trabajo en ofrenda por tu paciencia y el amor que ahora me la envías desde el cielo madre mía, a mi padre, por ser un ejemplo a seguir, a todos mis hermanas y hermanos por su apoyo incondicional.

A mi esposa Alejandra Donoso, por el apoyo que me brindó día a día en el transcurso de cada año de mi carrera universitaria ella es mi fuente de luz, convirtiéndose en un pilar fundamental para mi formación profesional.

Carlos Imbaquingo

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por las bendiciones que nos envía día a día, por darme sabiduría y fortaleza en cada momento de debilidad.

A los docentes de la Escuela de Mecánica Automotriz, por habernos impartido sus conocimientos y experiencias a lo largo de mi carrera universitaria, en particular, al Msc. Denny Guanuche tutor de nuestro proyecto de investigación, quien con paciencia profesionalismo y firmeza nos ha guiado.

A la Universidad Internacional del Ecuador por los continuos esfuerzos para formar profesionales y seres humanos de calidad reconocida.

A mis padres, Pedro y Jacinta, quienes desde pequeño han sembrado en mí, valores morales y el anhelo de superación. Me han enseñado que con trabajo duro y esfuerzo se abra el camino.

Finalmente, a mi familia, amigos y colegas que han aportado en mi desarrollo y crecimiento profesional.

Carlos Imbaquingo

AGRADECIMIENTO

La clave del éxito profesional se debe al constante trabajo y sacrificio. Dos temas enseñados con el ejemplo por parte de mis padres a quienes quiero extender mis palabras de agradecimiento por toda su entrega y apoyo durante el proceso de universidad en mi carrera de mecánica automotriz. Soy fruto de su dedicación y cariño. Agradezco su oportunidad y confianza brindada para alcanzar una meta más. Quiero agradecer a mi madre Gabriela por su amor incondicional, su paciencia y su sacrificio para poder alcanzar esa meta. No hay forma de compensar todo el sacrificio que me ha brindado, por eso siempre estaré en deuda con ella. Agradezco a mi papa Jorge, mis hermanos Francisco y Juan Martín, especialmente por compartir conmigo el mundo automotriz. Hemos disfrutado mucho juntos estos momentos.

Finalmente quiero agradecer a mi novia Emilia, la vida me permitió compartir contigo mi completa carrera de universidad. Gracias a ti he podido alcanzar también esta meta, espero cumplir muchas metas más juntos y espero la vida me permita seguir disfrutando de ti.

Jorge Aguirre

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|------|
| CERTIFICACIÓN | II |
| DEDICATORIA..... | III |
| AGRADECIMIENTO..... | V |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | VIII |
| ÍNDICE DE TABLAS | VIII |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS | VIII |
| ÍNDICE DE ECUACIONES..... | VIII |
| ÍNDICE ANEXOS | IX |
| RESUMEN..... | 1 |
| ABSTRACT..... | 1 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 2 |
| 2. FUNDAMENTACION TEORICA | 3 |
| PRINCIPIOS SISTEMAS HÍBRIDOS | 3 |
| TIPOS DE BATERÍAS DE ALTO VOLTAJE. | 4 |
| FACTORES DE DEGRADACIÓN DE BATERÍAS DE ALTO VOLTAJE..... | 4 |
| NUEVAS TECNOLOGÍAS DE ALTO VOLTAJE SP45..... | 7 |
| 3. MATERIALES Y METODOS | 8 |
| DATOS: | 8 |
| METODOLOGÍA: | 8 |
| MATERIALES | 8 |
| EQUIPO | 8 |
| NORMATIVA | 9 |
| PROCEDIMIENTOS | 9 |
| 4. MODELO MATEMÁTICO..... | 10 |
| TABLA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO..... | 12 |
| PROCESO DE SERVICIO PARA MANTENIMIENTO Y CAMBIO DE CELDAS | 13 |
| 5. RESULTADOS Y DICUSION | 13 |
| 6. CONCLUSIONES | 15 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 15 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 7 Batería Sp45..... | 9 |
| Figura 1 Vehículo de prueba BMW G20 | 9 |
| Figura 2 Vehículo de prueba G05 | 9 |
| Figura 3 Escáner ISTA PLUS BMW, ordenador..... | 28 |
| Figura 4 Conector inalámbrico “ICON” para OBD II..... | 29 |
| Figura 5 Software matemático STATA..... | 29 |
| Figura 6 Multímetro. | 29 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Mantenimiento preventivo | 12 |
| Tabla 2 Variables involucradas en la investigación | 14 |
| Tabla 3 Tabla de correlaciones BMW G11 | 14 |
| Tabla 4 Tabla de correlaciones BMW G20..... | 14 |
| Tabla 5 Tabla de correlaciones BMW G05..... | 14 |
| Tabla 6 Estimaciones del modelo propuesto..... | 15 |
| Tabla 7 Descripción de las Variables involucradas en la regresión. | 30 |
| Tabla 8 Prueba de normalidad de los residuos | 33 |
| Tabla 9 Prueba de Multicolinealidad..... | 33 |
| Tabla 10 Prueba de heterocedasticidad | 33 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 gráfico de simetría del Nivel de carga..... | 11 |
| Gráfico 2 Gráfico de simetría de la Corriente de carga..... | 11 |
| Gráfico 3 gráfico de simetría de la Tensión | 12 |
| Gráfico 4 Gráfico de simetría de la Temperatura..... | 12 |
| Gráfico 5 Evolución Nivel de carga y Corriente BMW G11 | 30 |
| Gráfico 6 Evolución Nivel de carga y Corriente BMW G20 | 30 |
| Gráfico 7 Evolución Nivel de carga y Corriente BMW G05 | 31 |
| Gráfico 8 Comportamiento Corriente y Tensión..... | 31 |
| Gráfico 9 Comportamiento Corriente y Temperatura | 31 |
| Gráfico 10 Comportamiento Tensión y Temperatura | 32 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|--------------------------------|----|
| Ecuación 1 Q | 6 |
| Ecuación 2 Q_{Li} | 6 |
| Ecuación 3 Q_{sites} | 6 |
| Ecuación 4 Nivel de carga..... | 10 |

ÍNDICE ANEXOS

| | |
|---|----|
| Anexo A. 8. Vehículo de prueba BMW G11 | 9 |
| Anexo A. 1. Arquitectura del vehículo eléctrico..... | 18 |
| Anexo A. 2. Arquitectura del vehículo híbrido en serie..... | 19 |
| Anexo A. 3. Arquitectura de vehículo híbrido en paralelo..... | 20 |
| Anexo A. 4. Arquitectura de vehículo híbrido serie paralelo..... | 20 |
| Anexo A. 5. Arquitectura de vehículo de celda de combustible | 21 |
| Anexo A. 6. Imagen referencial de una batería de litio..... | 23 |
| Anexo A. 7. Toma de lecturas..... | 24 |
| Anexo A. 9. Modelo matemático para estimar la producción de la energía, Guido Mazón..... | 48 |
| Anexo A. 10. Hibridación del sistema de propulsión de vehículos, Move to Future..... | 60 |
| Anexo A. 11. Dimensionamiento y modelo de un vehículo eléctrico, Gabriel Correa | 83 |
| Anexo A. 12. Desarrollo tecnológico en baterías e impulsión eléctrica, Alexis Mercado | 92 |

DESARROLLAR EL MODELO MATEMÁTICO PARA EL MANTENIMIENTO Y CAMBIO DE LAS CELDAS DE BATERÍA EV EN VEHÍCULOS BMW PREMIUM DE TIPO G11, G20 Y G05.

*Jorge Alfredo Aguirre Gómez; Carlos Manuel Imbaquingo Jitala
joaguirrego@uide.edu.ec;caimbaquingoji@uide.edu.ec*

RESUMEN

La necesidad del hombre por encontrar un recurso de propulsión renovable para los automóviles ha crecido durante la última década. Hoy en día los autos eléctricos proponen una nueva alternativa para el uso diario y erradicación de vehículos que contaminen en el ambiente con propulsión de motores de combustión interna. El estudio correcto del mantenimiento de estos vehículos puede ayudar a crecer el volumen de los mismos cada vez más, colaborar con el medio ambiente y ahorrar más recursos no renovables del mundo. El presente artículo detalla información específica de las nuevas tecnologías en sistemas de alto voltaje, características y detalles para la propulsión de un vehículo eléctrico a través del análisis de variables de funcionamiento tales como: estado de carga, descarga, variación de temperatura, variación de intensidad de corriente y voltaje. Aplicar un modelo matemático de desarrollo propio con el fin de pronosticar porcentajes y estado de desgaste en función al tiempo de uso del auto. Gracias a este modelo, se puede concluir que el porcentaje de carga actual de una batería de alto voltaje influye en la vida útil de la misma, podemos cuidar y mantener niveles de tensión eléctrica en las celdas adecuado. Esto se logra a través de un correcto mantenimiento y asesoramiento de conducción, donde se aprovecha al máximo el rendimiento de nuestra batería en el transcurso de los años. El buen cuidado de estas baterías promoverá la compra de vehículos propulsados por energía renovable, el mundo del automóvil hacia el futuro.

PALABRAS CLAVE: renovable, variables, análisis, modelo matemático, desgaste, mantenimiento

ABSTRACT

The man's need for finding a new renewable resource to boost vehicles has grown over the last decade. Now days, electric cars propose a new alternative for daily use and eradication of vehicles that pollute the environment with internal combustion engines. The correct study of maintenance of electric vehicles could help to increase the sales volume of this type of vehicle in great scale. Helping the environment, saving more nonrenewable resources of the world. The following script represents specific information, features and details of these new technologies in high voltage systems for boosting electric vehicles over an analysis of operating variables such as: state of charge and discharge, temperature variation, amperage variation, voltage variation. We will introduce a mathematical model developed by ourselves in order to predict percentages of wear based on care use. With this math model, we can conclude that charge percent of the high voltage battery influences directly in the useful life of the component. We could take care and make a good maintenance program to take advantage of the maximum performance in the course of years. A good care of this batteries will promote purchases of electric vehicles with renewable resources, heading the world to a new automotive future.

KEY WORDS: renewable, variables, analysis, high voltage, maintenance, useful life

1. INTRODUCCIÓN

El futuro automóvil está direccionado hacia fuentes de energía alternativa. Ferdinand Porsche construyó el primer prototipo de vehículo híbrido, mismo que tiene como definición aquel vehículo que es propulsado por dos tecnologías distintas. [1] A la fecha de hoy 2021, las marcas de más alto renombre fabrican los mejores modelos híbridos y eléctricos a lo largo del mundo. Promocionan la nueva tendencia del futuro, la electricidad como fuente de energía alternativa para propulsar un vehículo. El mercado automotor del Ecuador aún se encuentra en fases pequeñas de uso de este tipo de tecnología. Sin embargo, con el pasar de los años cada vez tenemos mayor afluencia de vehículos híbridos y eléctricos circulan en nuestras calles. Ofrecer una alternativa de propulsión muy sorprendente y prometedora a largo plazo. La tendencia es caminar de la mano de los sistemas de alto voltaje y eficiencia eléctrica.

Planteamiento, formulación y sistematización del problema

El incremento de autos híbridos en el parque automotor ecuatoriano genera cierta oportunidad de negocio a través de las posibles reparaciones que puede tener una batería de alto voltaje con el fin de alargar su vida útil. La vida útil promedio de una batería híbrida es de 10 a 15 años en tiempo y de 100.000 a 150.000 km en recorrido. [1]. Identificamos que el primer vehículo híbrido importado al Ecuador fue en el año 2005. Empiezan los años claves de deterioro de las baterías de alto voltaje. El problema hoy en día es que a la fecha no existen protocolos de reparación autorizados, estudiados y garantizados para la reparación de esta batería. ¿Cómo se puede garantizar una prolongación de vida útil viable? El presente artículo está direccionado para realizar un cálculo optimizado y poder brindar un proceso de servicio técnico que responda a esta

pregunta. Principalmente dirigida a baterías de alto voltaje de última generación en mercado Premium. Brinda así mejores alternativas de cuidado y solución, promoviendo el uso continuo de la nueva tendencia del futuro.

Se procederá a elaborar y diseñar un modelo matemático para la reparación, cambio y soporte técnico de celdas de baterías de alto voltaje de vehículos BMW Premium, modelos G11, G20 y G05

A través del presente estudio se identificará la tecnología de baterías de alto voltaje de última generación, determinar nuevas innovaciones y mejoras a través de los años en vehículos BMW (G11, G20 y G05).

Diseñar a través de un modelo matemático que nos permita calcular la frecuencia con la que las baterías de alto voltaje de última generación de vehículos BMW (G11, G20 y G05) Premium necesitarán servicio preventivo o correctivo en función al deterioro de estas en el tiempo.

La Universidad Católica realiza un estudio en el año 2010 sobre la introducción de los vehículos híbridos en el mercado automotriz.

Se detalla a través de la redacción de Javier Martínez una tesis de grado que nos brinda información detallada de su investigación. [2]

La tecnología de los vehículos híbridos evoluciona en función al avance y estudio de sostenibilidad de estos autos. Hoy en día existen ya protocolos de reparación que nos ayudarán a desarrollar procesos de servicio técnico.

Se realizará un estudio de variables para poder elaborar un modelo matemático con el fin de construir un proceso de servicio técnico. El estudio se basará en las siguientes variables:

- Tiempo de descarga y carga
- Autonomía
- Proceso de recuperación de energía de las baterías de alto voltaje
- Variación de voltaje / amperaje en procesos de carga y descarga

- Control de temperatura de batería de alto voltaje
- Control a través de códigos de falla en diagnóstico ISTA PLUS

Una vez recogida toda esta información se introducirán estas variables en el programa informático para desarrollar el modelo matemático.

2. FUNDAMENTACION TEORICA

PRINCIPIOS SISTEMAS HÍBRIDOS

Se denomina a un vehículo híbrido aquel que posee dos sistemas de propulsión de distinta naturaleza. Hoy en día cuando se habla de un vehículo híbrido refiere a la combinación de propulsión de un motor de combustión interna con un motor eléctrico. La base fundamental de nuestra investigación se basará un específico tipo de batería. La SP45 diseñada por BMW para sus últimos modelos de generación híbrida enchufable. Las baterías de alto voltaje más comunes que circulan en nuestro mercado ecuatoriano, Ford, BMW, tienen la función de administrar corriente de alto voltaje a todo el sistema eléctrico del automóvil cuando es de propulsión. Esta energía almacenada está en constante carga y descarga. Para ello los fabricantes han diseñado un principio teórico de recarga de las celdas de alto voltaje gracias a la recuperación de la energía. Al circular uno de estos autos tenemos un proceso de transformación de energía. La energía cinética que es producida con el movimiento del auto se transformará en energía eléctrica y posterior se almacenará en las celdas de alto voltaje. Cada batería híbrida depende del modelo pueden tener distintas capacidades de carga en función al número de celdas. Estas celdas trabajan bajo ciertos parámetros de carga y descarga, valores de temperatura y estado general. Todos estos valores serán descritos individualmente en la investigación a continuación. El sistema de frenado forma una parte elemental en la

regeneración de energía de las baterías. Ya que estos al tener mayor frecuencia de uso, generará una mayor recarga de energía. La gran mayoría de marcas utiliza este principio, otros fabricantes como Toyota, Hyundai o Ford utilizan principios aerodinámicos para la recarga de energía. El aire que se descarga a la circular el vehículo en un tema científico conocido como la dinámica de los fluidos. Es por eso que el diseño de la carrocería de estos vehículos juega un papel importante. Los diseños de carrocería influyen a que esta dinámica aporte a un almacenamiento de energía eficiente. Otra característica que realza en cuanto a las carrocerías de los vehículos es su gran espacio tanto en cajuela como debajo de los asientos para el almacenaje de las baterías híbridas. A medida de los avances tecnológicos en los últimos 10 años, los modelos han innovado e inclusive han reducido el tamaño de las baterías. Empresas fabrican más compactos y prácticos para aprovechar el volumen de auto. Definitivamente es importante que nuestra sociedad se llene de conocimiento valioso acerca de los vehículos híbridos. A través de este estudio se demostrara la fiabilidad que tienen las nuevas generaciones, ya que hoy por hoy el mundo en general se proporciona de desinformación acerca de estos autos, ya sea por temas comerciales o servicios de mantenimiento postventa, que desencadenan a una inseguridad de adquirir estos vehículos. Esto se resume en un aspecto muy puntual. ¿Cuánto cuesta mantener un vehículo híbrido? Si bien los vehículos híbridos generan mucha economía al extender la frecuencia con la que colocan combustible, que tan económicos son los mantenimientos de estos autos. Las generaciones de vehículos híbridos y eléctricos en el Ecuador en la última década, carecen de protocolos de mantenimiento de las baterías de alto voltaje. Con un período de vida útil promedio de 10 a 15 años, los usuarios temen a

que este componente devalúe su vehículo o al tratar de conseguir uno de segunda mano, este se encuentre con alguna avería en el sistema. Al no haber protocolos de mantenimiento para estos componentes, el camino para arreglar alguna averiada relacionada con la batería de alto voltaje implicaría directamente reemplazarla con una nueva. Mismo que tiene un valor en el mercado promedio de \$5000. [3]

A medida que los años avanzan los vehículos híbridos han evolucionado a eléctricos 100%. Cada modelo nuevo de cierta marca se enfoca en la autonomía eléctrica de los autos. Por ejemplo, la marca alemana BMW desarrolla vehículos híbridos por más de una década. Protagoniza los primeros modelos X6 E-72 y el modelo Series 7 F-04. Fueron los pioneros en el alto voltaje de esta marca. Mismos que disponían de una autonomía eléctrica de conducción de aproximadamente 15km. [4]. Esto fue en función a la aparición de las nuevas generaciones. A través de sistemas como “battery control” el cliente puede programar el uso de su sistema eléctrico de propulsión. Con la ayuda de modos de conducción el vehículo cambia parámetros de uso, carga y descarga de la batería para dar el equilibrio perfecto al cliente. La autonomía eléctrica del último modelo híbrido enchufable de BMW 320i permite circular cerca de 80km economiza de manera significativa el uso de combustible. Logran esta autonomía a través de sistemas de regeneración de energía inteligentes en la batería de alto voltaje, misma que dispone de un gran número de celdas que almacenan carga constantemente. El alto voltaje nos direcciona al futuro del automóvil. Es importante conocer cómo funcionan, como mantenerlos y sobre todo como aprovecharlos.

TIPOS DE BATERÍAS DE ALTO VOLTAJE.

Las baterías en vehículos híbridos y eléctricos son diferentes, depende su origen de fabricación. Las más conocidas son las baterías de Iones de Litio. También es común la batería de Níquel-Metal (NiMH) y la batería de ácido de plomo sellada.

BMW.- Batería de alto voltaje SP45 4ta generación.

Esta batería de última generación tiene como característica principal que dispone de cierto montaje y desmontaje de piezas que pueden llevar a un mal funcionamiento del sistema. Aplica para ciertos modelos en BMW tales como F45, F60, F48. BMW exige estrictamente la capacitación y varias certificaciones del personal para poder trabajar en estas baterías híbridas.

FACTORES DE DEGRADACIÓN DE BATERÍAS DE ALTO VOLTAJE

Las baterías de alto voltaje pueden sufrir degradación debido a factores internos como externos entre ellos se considera: la temperatura del ambiente, la capacidad, el uso, potencia de carga, resistencia interna, entre otros.

Pérdida de Capacidad

La pérdida de capacidad de la batería se ve siempre referenciada a un nivel de descarga; este es marcado o establecido por el fabricante puesto que esta pérdida se produce en cada ciclo de carga y descarga como consecuencia de la disminución de la capacidad misma que índice en la autonomía del vehículo. [3]

Aumento de resistencia interna

Este tipo de resistencia se genera cuando existe un incremento en la concentración y cambio de

potenciales del electrodo, esto provoca mayores tasas de resistencias durante los ciclos electroquímicos, provoca la oxidación de los electrolitos y la transformación irreversible de litio, lo que causa el deterioro o envejecimiento de la batería del automotor. Se debe tener presente que hoy en día no existe una definición exacta que permita establecer un nivel de resistencia interna; sin embargo, esta se puede obtener por medio de los parámetros del voltaje y corriente. [5]

$$R_B = \frac{V_0 - V}{I}$$

Donde:

R_B : Representa la resistencia interna

V_0 : Representa la Tensión de vacío

V : Representa la tensión de la batería con la carga

I : Representa la intensidad suministrada por la batería

Almacenamiento

Se debe tomar en consideración que todas las baterías sufren un auto descarga de forma gradual durante un determinado tiempo debido al uso o almacenamiento. Lo cual provoca o genera la pérdida de capacidad útil de la batería, ya que se presentan reacciones parasitas dentro de una celda de batería recargable; esta tasa de pérdida es una función de la química de la celda y del ambiente de temperatura que experimenta la célula. El almacenamiento en condiciones no óptimas y variantes de temperatura acrecentó la tasa de auto descarga lo cual genera cambios químicos en la celda, lo que conlleva a que esta no pueda recuperar su capacidad. [6]. Los principales

factores que se debe tomar en cuenta para almacenar la batería, son los siguientes:

Estado o porcentaje de carga (SOC)

Para almacenar una batería de forma óptima es cuando la misma se encuentra alrededor del 40% de carga, este rango permite mantenerla entre un rango del 15% a 85%. Tomar en cuenta que una batería almacenada al 100%, a altas temperaturas o por uso excesivo implica mayor degradación. [6]

Temperatura a la que está la batería

La temperatura a la que está la batería es relevante dado que para el almacenamiento va a depender mucho del tipo de batería; dado que el calor en exceso durante el proceso de carga o descarga tiene un efecto perjudicial sobre la misma. Es por ello que la distribución de la temperatura depende de la química celular, propiedades físicas y condiciones de operación de la batería; mismas que son relevantes en el proceso de descomposición del separador y del electrolito que da como resultado la evaporación del electrolito y que las celdas se sequen. Este proceso se acelera cuando se opera con una alta temperatura, por lo cual lo óptimo es evita las altas temperaturas, se logra mantenerla entre los 15°C a 30 °C. [3]

Lapso de almacenamiento de la batería

Considerar que a mayor lapso o periodo de almacenamiento mayor será la degradación de la batería.

Profundidad de descarga (DOD)

La profundidad de descarga (DOD) de la batería cada vez que sea mayor generará una reducción o deterioro de la vida útil de la misma, por lo que para mantener una relación exponencial se considerar los ciclos de operación. [3]

Potencia de carga

La potencia de las baterías cargadas y con motor apagado deben medir aproximadamente 12.6 voltios a 12.8 voltios; dado a que cuando están corriendo se toman de la salida del alternador, por lo que es necesario que su medición 13.3 a 15.0 voltios el cual puede variar según la temperatura.

La temperatura se la puede medir con un multímetro, en el caso de no contar con el mismo se puede probar la salida del alternador arrancado del automotor y los faros, ya que si están bajos refleja que las luces están agotan la batería y el alternados por lo que genera poca potencia. [7]

Modelo de duración de la batería

El envejecimiento de la batería es causado por múltiples fenómenos relacionados tanto con el ciclo como con la edad del calendario. La degradación de la batería se precipita con el DOD de los ciclos, la temperatura elevada y la exposición a voltaje elevado, entre otros factores. En los terminales de la batería, los efectos observables de la degradación están acrecentadas de la resistencia y una disminución de la capacidad. Estos dos efectos pueden correlacionarse con la potencia y la pérdida de energía que provocan el final de la vida útil de la batería en una aplicación. Los componentes para el crecimiento de la resistencia contienen la pérdida de rutas de dirección eléctrica en los electrodos, la fractura y el aislamiento de los sitios de los electrodos, el crecimiento de capas de película en la superficie del electrodo y la degradación del electrolito.

Los componentes de pérdida de capacidad incluyen fractura, aislamiento y degradación química del material del electrodo, así como pérdida de litio ciclable (Li) del sistema como subproducto de reacciones secundarias [8].

En entornos de almacenar o degeneración natural, el mecanismo de desvanecer el crecimiento de una capa de película resistiva en la superficie del electrodo. A medida que crece la capa, el sistema también consume Li ciclable, lo que comprime la capacidad. En el modelo actual, se supone que el crecimiento de la resistencia y la pérdida de capacidad de Li son proporcionales a la raíz cuadrada del tiempo, $t^{1/2}$, característico de los métodos de crecimiento de película limitados por difusión.

En circunstancias de ciclos intensos, la degradación es causada especialmente por la degradación estructural de la matriz del electrodo y los sitios activos. Se supone que la degradación promovida por el ciclo es proporcional al número de ciclos, N. S [9]:

$$R = a_0 + a_1 t^{1/2} + a_2 N \quad (1)$$

La capacidad de la celda está controlada por la pérdida de Li ciclable o la pérdida de los sitios de los electrodos:

Ecuación 1 Q

$$Q = \min(Q_{Li}, Q_{sites}) \quad (2)$$

Donde:

Ecuación 2 Q_{Li}

$$Q_{Li} = b_0 + b_1 t^{1/2}$$

Ecuación 3 Q_{sites}

$$Q_{sites} = c_0 + c_1 N \quad (3) \text{ y } (4)$$

Los modelos (1), (3) y (4) se ajustan fácilmente a una trayectoria de resistencia o capacidad medida a lo largo del tiempo para una condición específica de almacenaje o ciclo. Uso de múltiples conjuntos de datos de

almacenamiento y ciclo, se puede construir acatamiento funcional para las constantes de velocidad A1 (T, V, DOD), A2 (T, V, DOD), B1 (T, V, DOD) y C1 (T, V, DOD) [9].

Se debe tomar en cuenta que la duración de la batería se ajusta a los conjuntos de datos de envejecimiento de laboratorio para la química de grafito de iones de litio / níquel-cobalto-aluminio (NCA). La química de grafito / NCA tiene generalmente características de envejecimiento agradables y se espera que alcance 8 años o más de vida cuando se dimensiona apropiadamente para una aplicación de vehículo. [1]

Dicho modelo permite emplear una comparación con datos experimentales para una celda de iones de litio de grafito / NCA con hasta un 25% de desvanecimiento de la capacidad de la batería. Más allá de este nivel de desgaste, las tasas de desvanecimiento pueden acelerarse, como a veces se evidencia en datos experimentales por una fuerte caída en la capacidad restante con ciclos continuos [10].

Una de las formas para mejorar la energía de la batería de iones de litio es incorporar en su diseño silicio, el cual favorece y duplica por diez su cabida energética, superar de esa manera los problemas habituales de durabilidad y estabilidad estructural que implica el uso del material en las mismas. Se debe tomar en cuenta que las baterías de iones de litio habitualmente son colocadas en automotores eléctricos y tecnológicos, dado a que se cuándo se carga la batería la corriente eléctrica se mueve por los iones de litio del cátodo (negativo) al ánodo (positivo) por medio de electrolito. Este proceso de corrientes invierte a la hora de utilizar la batería, debido a que los iones regresan al catado, lo cual provoca una mayor liberación de corriente eléctrica. [10]

Esto evidencia que la vida útil tiene una sensibilidad débil a la variación normal de

temperatura de la batería en el transcurso de un solo día, particularmente cuando se tiene en cuenta la masa térmica de la batería. Si bien las altas tasas de generación de calor resultan de la conducción agresiva están correlacionadas con el aumento de la temperatura de la batería, el impacto de la carga rápida en lo que se refiere al desgaste inducido por la velocidad. [9]

NUEVAS TECNOLOGÍAS DE ALTO VOLTAJE SP45

Esta batería dispone de 5 módulos de células. El voltaje que puede llegar a manejar el sistema es de 320v voltaje nominal [5]. Dispone de 80 celdas de batería en línea conectadas en serie. Cada una de ellas dispone de 3,69 y 34ah. Con una potencia de 90,2 Kw la batería se enfría con un agente frigorífico que en nuestro medio usamos el freón. La gran mayoría de estas baterías se encuentran situadas en los bajos del vehículo, instaladas con un control de aislamiento que evita cortocircuitos en el sistema.

Componentes de la batería SP45:

- Carcasa
- Unidad de desgasificación:
- Membrana
- Caja de seguridad
- Sistema electrónico de gestión de acumulación SME
- Placa soporte
- Bloque de celdas
- Sensores de temperatura
- Electrónica de control
- Intercambiador de calor
- Base intermedio del módulo

Las celdas de las nuevas baterías híbridas aprovechan la longevidad de las celdas de iones de litio convencionales. Esto permite una alta densidad de las celdas de metal-litio. Marcas como Tesla, BMW han desarrollado innovaciones en sus sistemas para poder aumentar la autonomía eléctrica de sus

vehículos. La vida útil de estas baterías se ha prolongado considerablemente sobre todo que ahora disponen de procesos de reparación interna. El equipo de investigación de Tesla en Canadá, ha publicado resultados de un trabajo de estudio que describe un nuevo concepto de vehículo eléctrico de autonomía extendida. La solución de Dahn es crear una batería con celdas híbridas que aprovecha la longevidad de las de iones de litio y la densidad energética de las de metal de litio. De esta forma es posible mantener la vida útil de la batería y elevar la autonomía de un coche eléctrico en un 20%. [1]

3. MATERIALES Y METODOS

DATOS:

La presente investigación fue desarrollada en un laboratorio en la ciudad de Quito, esto fue un taller especializado en la reparación y mantenimiento de automotores híbridos, para esto, se tomó lectura de carga y descarga para los siguientes vehículos de la marca BMW: BMW 330 PHEV G20 año 2020, BMW Series 7 G11 año 2020, BMW X5 PHEV G05 año 2020, a los cuales se le hicieron 12 lecturas de carga y 11 de descarga, con diferentes porcentajes de cantidad de energía almacenada en las celdas de alto voltaje. El experimento empieza a partir del flujo positivo de electrones hacia la batería. El porcentaje de carga almacenado fue en promedio del 55% para el vehículo BMW G11, 72% para el vehículo BMW G20, y del 47% para el vehículo BMW G05. Asimismo, el flujo de carga eléctrica que recorre las celdas de alto voltaje en promedio fue aproximadamente de, 10A para el vehículo BMW G11, 12A para el vehículo BMW G20, 13A para el vehículo BMW G05. La tensión de las células de la batería de alto voltaje fue en promedio de 4V para los todos los vehículos analizados. Por último, el calor medible de trabajo dentro de las celdas de alto voltaje fue

de 27°C para el vehículo BMW G11, 26°C para el vehículo BMW G20, y de 25°C para el vehículo BMW G05.

Con el fin de presentar la información de manera más ordenada, algunas tablas y gráficos se adjuntan en la sección de anexos.

METODOLOGÍA:

Con el objetivo de calcular un factor de desgaste que mida el nivel de afectación en las baterías de los autos híbridos BMW de tipo G11, G20, y G05 debido a la acción de carga y descarga, se especifica el siguiente modelo. Este modelo fue estimado a través de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO). En el Modelo se incluye al Nivel de carga como variable dependiente, a la *Corriente* como variable independiente, asimismo, se incluyen la *Tensión* y la *Temperatura*.

MATERIALES

En este proyecto se usaron una hoja de cálculo Excel, conectividad de internet, wifi para conexión inalámbrica de lectores scanner OBD II, ordenador y Tomas 220v y 110v

EQUIPO

Los equipos utilizados serán: vehículos BMW modelos Series G11, Series 3 G20, X5 G05, escáner diagnóstico ISTA PLUS BMW, ordenador, conector inalámbrico "ICON" para OBD II, software matemático STATA, multímetro.



Figura 1 Batería Sp45
(Aguirre e Imbaquingo,2021)



Anexo A. 1. Vehículo de prueba BMW G11

Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021



Figura 2 Vehículo de prueba BMW G20

Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021



Figura 3 Vehículo de prueba G05

Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021

NORMATIVA

- Artículo 15 del Libro Siete del código social de Alemania; Normativas sobre prevención de accidentes
- Artículo 5 de la Ley de prevención de riesgos laborales de Alemania; Evaluación de las condiciones de trabajo
- Artículo 10 de la Ley de prevención de riesgos laborales de Alemania; primeros auxilios y medidas de emergencia
- Normas VDE, Asociación Alemana de ingenieros eléctricos, electrotécnicos e informáticos
- Norma VDE 0105-100: Funcionamiento de instalaciones eléctricas
- Norma VDE 1000-10: Requisitos que deben cumplir las personas activas en el ámbito de la electrónica
- Norma VDE 0113: Seguridad de las máquinas

Bibliografía de normativa: Sesión presencial “Experto en alto voltaje BMW Group”.

PROCEDIMIENTOS

1. Conectar icon inalámbrico a OBD II para realizar identificación de vehículo.
2. Lectura de memoria de averías

3. Inicio de protocolo de campaña técnica “Programación y protocolo de carga y descarga de acumulador de alto voltaje”
4. El proceso consiste en programar las unidades de mando de alto voltaje con una actualización de software dispuesto por la fábrica. Posteriormente, realizar 3 ciclos de carga y descarga de la batería de alto voltaje a través de la función de servicio proporcionada por el sistema informático de BMW ISTA PLUS. Se ejecuta la función de servicio y se monitorea visualmente variables descritas en modelo matemático. Corriente, nivel de carga, nivel de temperatura. Se registran las variables en función al nivel de descarga. Fin del primer ciclo de descarga. El tiempo de cada carga y descarga se encuentra en alrededor de 8 horas promedio.
5. Ejecutar siguiente función de servicio, ciclo 1 proceso de carga completa de acumulador de alto voltaje. Toma de variables en función al nivel de carga.
6. Realizar 3 ciclos de carga y descarga de cada vehículo toman las variables reflejadas en sistema ISTA PLUS.
7. Cuando finalizan los ciclos de carga se finaliza la función de servicio y el proceso de conexión con ISTA PLUS. Se ejecuta prueba de ruta de 15 km en cada vehículo testeado, al finalizar la misma se realiza una nueva lectura de averías a través de ISTA PLUS con el fin de controlar

Vehículo

Los vehículos escogidos para el presente trabajo de investigación fueron de la marca BMW del tipo G11, G20 y G05,

4. MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático se expresa en la siguiente ecuación:

Ecuación 4 Nivel de carga

$$= 0 + 1 \dots + 2 + 3 \dots \delta + 4 +$$

Donde:

δ , estimadores

δ : variable dependiente que representa la cantidad de energía almacenada en celdas de alto voltaje.

\dots : Variable independiente que mide el flujo de carga eléctrica que recorre celdas de alto voltaje

δ : variable dicotómica que representa el estado de *Carga o Descarga*.

δ : Variable independiente que mide tensión de las células de la batería de alto voltaje (V)

\dots : Temperatura de batería alto voltaje (Celsius)

\dots : término de error (factores inobservables en el modelo).

Cada uno de los estimadores 1, 2, 3, 4 y su signo van a mostrar los cambios marginales con respecto a cada una de las variables analizadas, demostrando que todos los demás factores permanecen constantes. Tal como se lo describe a continuación.

0: muestra la cantidad de energía almacenada en celdas de alto voltaje cuando las variables \dots , δ , toman el valor de cero, manteniendo todos los demás factores constantes.

1: mide el incremento/disminución del nivel de carga ante el incremento marginal en la variable *Flujo de Carga Eléctrica*. El nivel de carga aumenta/disminuye en 1 unidades, manteniendo todos los demás factores constantes.

2: el nivel de carga aumenta/disminuye en 2 unidades con respecto al estado de descarga, esto sucede ante el incremento marginal del flujo positivo de electrones (Estado de carga),

manteniendo todos los demás factores constantes.

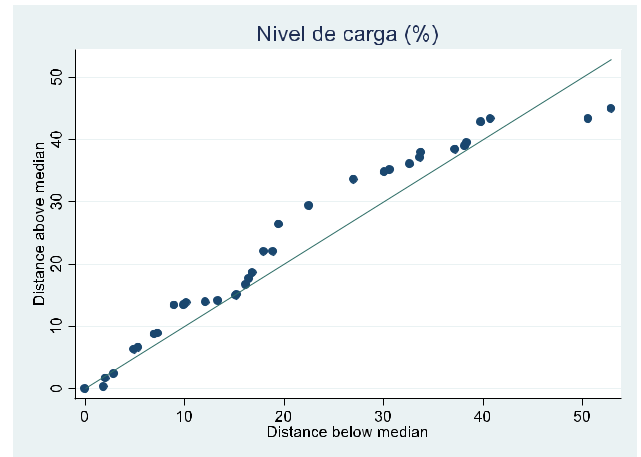
3: mide el incremento/disminución del *nivel de carga* ante el incremento marginal en la variable *Tensión*. El nivel de carga aumenta/disminuye en 4 unidades, manteniendo todos los demás factores constantes.

4: mide el incremento/disminución del *nivel de carga* ante el incremento marginal en la variable *Temperatura*. El nivel de carga aumenta/disminuye en 4 unidades, manteniendo todos los demás factores constantes.

Asimismo, con el fin de verificar si el modelo posee buenos atributos, y si es pertinente para la aplicación en el presente trabajo de investigación, se procedió a verificar si este tiene problemas de normalidad de los residuos, multicolinealidad o heterocedasticidad. Los resultados muestran que el modelo es pertinente. Las tablas de resultados se encuentran en la sección de anexos.

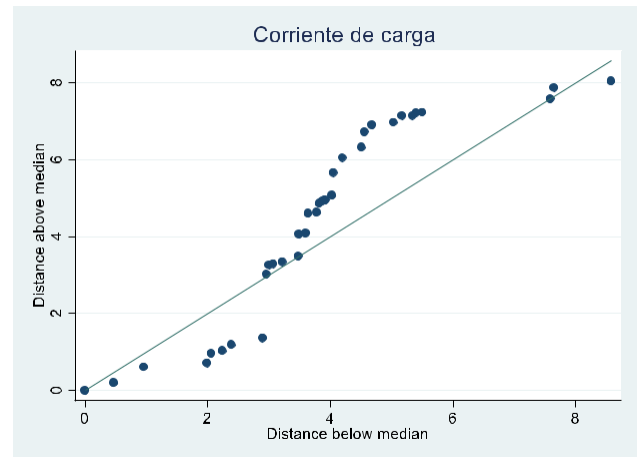
En los gráficos 7, 8 y 9 se puede notar que las observaciones de la variable Nivel de carga, Corriente de carga y Tensión no se alejan demasiado de la media, esto podría ser beneficioso ya que no existirían datos atípicos. Sin embargo, la variable temperatura presenta una mayor dispersión con respecto a su media

Gráfico 1 gráfico de simetría del Nivel de carga



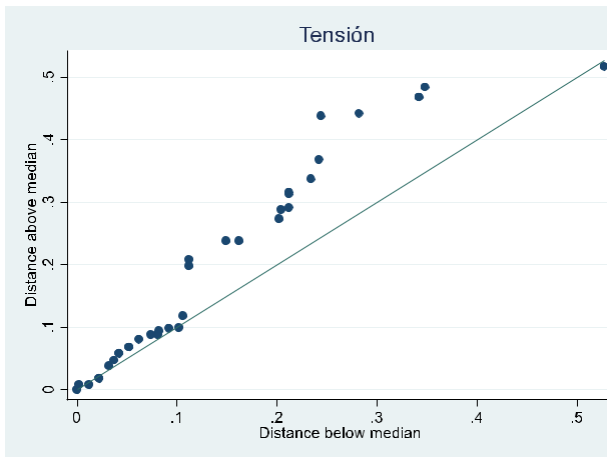
Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021

Gráfico 2 Gráfico de simetría de la Corriente de carga



Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021

Gráfico 3 gráfico de simetría de la Tensión

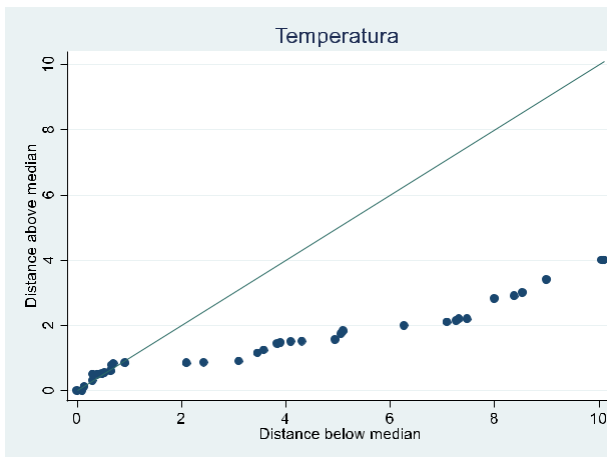


Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021

lo plantea Espinosa (2015) en su trabajo de investigación. En este sentido, se nota que la *Tensión* y el *kilometraje* se relacionan de manera inversa, es decir, a mayor kilometraje, menor tensión. Asimismo, se recomienda cargar la batería cuando el estado de celda sea regular, es decir, cuando la lectura del multímetro marque por debajo de los 3.9, o cuando el automóvil marque un kilometraje desde los 60000 a 80000 kilómetros, esto con el objetivo de dar un mantenimiento adecuado, evitar daños mayores y alargar la vida útil de la batería.

Tabla 1 Mantenimiento preventivo

Gráfico 4 Gráfico de simetría de la Temperatura



Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021

TABLA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

En la tabla 2 se puede observar las predicciones realizadas en función de la tensión y el kilometraje recorrido (*ceteris paribus*), asimismo, se creó la variable estado a partir de rangos de tensión, dentro de los cuales se considera una celda en buen estado

estado regular

| Tensión | Kilometraje | Estado |
|----------------|--------------------|---------------|
| 2 | 189967,54 | Mala |
| 3,255 | 79324,71 | Regular |
| 3,633 | 76492,09 | Regular |
| 3,69 | 74488,5 | Regular |
| 3,73 | 73999,8 | Regular |
| 3,745 | 73887,83 | Regular |
| 3,78 | 72186,44 | Regular |
| 3,79 | 69627,28 | Regular |
| 3,807 | 67191,91 | Regular |
| 3,829 | 66135,46 | Regular |
| 3,83 | 65922,94 | Regular |
| 3,876 | 62212,7 | Regular |
| 3,881 | 60561,84 | Regular |
| 4,055 | 50261,62 | Buena |
| 4,07 | 40063,99 | Buena |
| 4,073 | 39829,85 | Buena |
| 4,095 | 37265,22 | Buena |
| 4,098 | 28599,22 | Buena |
| 4,1 | 28000,75 | Buena |
| 4,119 | 21367,21 | Buena |
| 4,12 | 16816,85 | Buena |
| 4,12 | 12524,74 | Buena |
| 4,224 | 12299,1 | Buena |
| 4,26 | 10076,73 | Buena |
| 4,266 | 6214,75 | Buena |
| 4,299 | 5721,18 | Buena |

Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021

PROCESO DE SERVICIO PARA MANTENIMIENTO Y CAMBIO DE CELDAS

Basada en la tabla de mantenimiento realizada, se procede a hacer lecturas individuales de celdas en función al nivel de tensión. Los pasos para el cambio se definen en el siguiente de acuerdo al manual de reparación del usuario.

1. Asegurar el área de trabajo con aislantes, material de protección y cintas de seguridad

2. Desconectar el suministro de alto voltaje en el vehículo.
3. Desconectar carga de freón de la batería
4. Remover batería
5. Comprobación, montaje y desmontaje de celdas en función al diagnóstico. Celdas con nivel de tensión
6. Para celdas que requieran mantenimiento se procede a realizar protocolos de recarga o adecuaciones recomendadas por el fabricante $\delta \leq 2$
7. Para celdas deterioradas se procede a reemplazar por una nueva, $\delta \leq 2$
8. Prueba de estanqueidad de freón o frigorífico utilizado
9. Prueba de corriente y tensión
10. Montaje de batería en vehículo

Bibliografía: “Manual de reparación WBT Baterías alto voltaje, curso online”

5. RESULTADOS Y DICUSION

En la siguiente sección se exponen los resultados de las estimaciones del modelo matemático de regresión lineal.

Resultados de diagnósticos

Los resultados de las correlaciones, así como las estimaciones del modelo matemático muestran concordancia con la intuición y revisión de la literatura, por ende, los resultados presentados son pertinentes. Este modelo considera variables como el *Nivel de carga (%)*, *Corriente de carga*, la *Tensión*, *Temperatura* y el *Estado* de la batería.

Discusión de variables estudiadas

En la tabla 3 se encuentra una descripción completa de cada una de las variables incluidas en la investigación.

Tabla 2 Variables involucradas en la investigación

| Variable | Tipo de Variable | Descripción |
|--------------------|------------------|---|
| Nivel de carga | Continua | Cantidad de energía almacenada en celdas de alto voltaje |
| Estado | Dicotómica | Condición del flujo de electrones en la batería, flujo positivo (carga) flujo negativo (descarga) |
| Corriente de carga | Continua | Flujo de carga eléctrica que recorre celdas de alto voltaje |
| Tensión de carga | Continua | Presión de fuente de energía, o diferencia de potencial |
| Temperatura | Continua | Noción de calor medible de trabajo dentro de las celdas de alto voltaje |

Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021

Comparativa de resultados

Con el objetivo de estudiar las relaciones entre las variables cuantitativas involucradas en el modelo, se utiliza el coeficiente de correlación. Según Wooldridge (2009) se podría definir al coeficiente de correlación como la medida natural de la relación entre dos variables aleatorias.

A continuación, en las tablas 3, 4 y 5 se muestran las tablas de correlaciones entre las variables *Corriente de carga*, *Tensión*, *Temperatura*, y el *Estado (carga/descarga)* para cada uno de los vehículos BMW G11, G2, G05. En estas se puede observar que la *Tensión* y *Temperatura* se relacionan de manera inversamente proporcional, es decir, a menor *Tensión* mayor *Temperatura*, asimismo, se nota que la *Corriente* y la *Tensión* se relacionan de la misma manera, esto es, a mayor *Corriente*, menor *Tensión* y por ende mayor desgaste. Por otro lado, la *Corriente* se relaciona de manera directamente proporcional con la variable *Temperatura*, dicho en otras palabras, a mayor *Corriente* mayor *Temperatura* y mayor *desgaste*.

Tabla 3 Tabla de correlaciones BMW G11

| G11 | Corriente | Tensión | Temp. |
|------------------|-----------|---------|-------|
| Corriente | 1 | | |
| Tensión | -0,110 | 1 | |
| Temp. | 0,104 | -0,183 | 1 |

Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021

Tabla 4 Tabla de correlaciones BMW G20

| G20 | Corriente | Tensión | Temp. |
|------------------|-----------|---------|-------|
| Corriente | 1 | | |
| Tensión | -0,135 | 1 | |
| Temp. | 0,087 | -0,194 | 1 |

Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021

Tabla 5 Tabla de correlaciones BMW G05

| G05 | Corriente | Tensión | Temp. |
|------------------|-----------|---------|-------|
| Corriente | 1 | | |
| Tensión | -0,103 | 1 | |
| Temp. | 0,098 | -0,206 | 1 |

Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021

Discusión de resultados de acuerdo con el modelo matemático

La significancia estadística es una medida de confiabilidad en el resultado de un análisis, esta ayuda a tener confianza a la hora de tomar decisiones.

La tabla 6 muestra los resultados de la estimación del modelo matemático junto con los niveles de significancia estadística.

Tal como se observa en la tabla 6 de resultados, ante el incremento de una unidad adicional de *Corriente de carga* (A) el *Nivel de carga* (%) se incrementa en 2.62A. La corriente de carga es estadísticamente significativa al 1%.

Considerando el *Estado* de la batería, en el modelo se encuentra que, ante el incremento de una unidad adicional de flujo positivo de

electrones (carga), la cantidad de energía almacenada en celdas de alto voltaje (nivel de carga), se incrementa en 13.38A con respecto al estado de descarga (flujo negativo de electrones). Esta variable es estadísticamente significativa al 10%. Considera la variable *Tensión* se encuentra que, ante el incremento de una unidad adicional de voltaje en esta, el nivel de carga disminuye en 50,61A. la tensión es estadísticamente significativa al 1%.

La *Temperatura* muestra una asociación positiva y estadísticamente significativa con la variable *Nivel de carga*, es decir, ante el incremento de una unidad adicional de grados Celsius en la *Temperatura*, el nivel de carga aumenta en 0,54A. la *Temperatura* es estadísticamente significativa al 10%.

En conclusión, se observa que las variables *Corriente*, *Tensión*, *Temperatura* y *Estado* son estadísticamente significativas tanto a nivel individual, como a nivel conjunto.

Tabla 6 Estimaciones del modelo propuesto

| VARIABLES INDEPENDIENTES | MODELO COEFICIENTES (ERRORES STANDARD) |
|---------------------------------|---|
| Corriente de carga | 2,62*** |
| Tensión | -50,61*** |
| Temperatura | 0,54* |
| Estado | 13,38* |
| Cons_ | 16,98** |
| Número de Obs. | 69 |
| Pseudo R2 | 0,28 |
| AIC | 646,43 |
| BIC | 653,14 |
| Prob.>chi 2 | 0 |

Notas: errores estándar en paréntesis

***Estadísticamente significativo al 1%

**Estadísticamente significativo al 5%

*Estadísticamente significativo al 10%

Fuente: Aguirre e Imbaquingo, 2021

Con el fin de verificar los atributos del modelo, en el anexo se calculan las pruebas de

heterocedasticidad, normalidad de los residuos y multicolinealidad. En los resultados se observa que el modelo presenta buenos atributos y cumple con los supuestos de regresión lineal. Al reemplazar una celda de batería se garantiza que la batería recuperara su estado de funcionamiento en al menos un 40% de acuerdo con lo estimado.

6. CONCLUSIONES

Se identifica que el desgaste de la batería es una función importante del Flujo de carga eléctrica que recorre celdas de alto voltaje. Ya que, a mayor flujo de carga eléctrica, el nivel de carga sube a más del doble. El *Estado (carga/descarga)* impacta significativamente en el desgaste de la batería, ya que al existir una descarga profunda exige energía adicional para lograr una carga deseada por lo que generaría mayor desgaste. Se observa que, a menor *Tensión*, mayor nivel de carga y por ende ocurrirá un mayor desgaste. Asimismo, en cuanto a la *Temperatura* se pudo observar que esta tiene una relación directa con el *Nivel de carga*, es decir, a mayor temperatura mayor nivel de carga y también se podría decir que a niveles mayores de temperatura ocurre mayor desgaste.

Finalmente, al realizar mantenimiento a la batería de alto voltaje sustituyendo las celdas detectadas con mal funcionamiento puede recuperar el rendimiento de la misma. Asegurar que no sufra ninguna avería terminal en el plazo establecido de 15 años de acuerdo al fabricante.

BIBLIOGRAFÍA

Administrador Retrieve Technologies (2013). NiCad & NiMH.

Chan A., Bouscayrol A., Chen K. (2010). Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling. IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 59, no. 2.

- Choi S. & Lim H. (2002). Factors that affect cycle-life and possible degradation mechanisms of a Li-ion cell based on LiCoO₂. *Journal of Power Sources*, vol. 111, n° 1.
- Chuquimarca S., Suin K., (2017). Diseño y Desarrollo de una Batería de Alto Voltaje para un vehículo de competencia tipo fórmula Sae Eléctrico.
- Corrigan D., Masias A., (2011) Batteries for electric and hybrid vehicles.
- Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, (2016).
- Espinosa J., (2015). Análisis Del Funcionamiento De Una Batería Híbrida De Un Vehículo Prius con Una Guía De Estudio. Universidad Tecnológica Equinoccial.
- Garcia R. & Pecas J. (2013). *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks, Power Electronics and Power Systems*, 1st ed. New York: Springer.
- Gies E. (2015). Lazarus Batteries. *Nature*, vol. 526
- Howell D., (2011). Annual progress report for energy storage R&D. Veh. Technol. Program, Energy Effic. Renew. Energy, U.S. Dep. Energy, Washington.
- Huo Y., Rao Z., Liu X. & Zhao J. (2015). Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate. *Energy Conversion and Management*, vol. 89,
- INER. Eficiencia Energética en el Transporte, (2014).
- INER. Proyectos Emblemáticos, (2013).
- Klass V., Behm M., & Lindbergh G. (2014). A support vector machine-based state-of-health estimation method for lithium-ion batteries under electric vehicle operation. *Journal of Power Sources*, vol. 270.
- Lavados M. & Bianchi E. (2013). Aplicación de acumuladores electroquímicos para el almacenamiento comercial de energía eléctrica en sistemas interconectados. Santiago de Chile.
- Tang L., Rizzoni G., & Onori S. 2015. Energy Managment Strategy for HEVs Including Battery Life Optimization. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, n° 3
- Verdugo E., Reibán G., (2020). Estudio de factibilidad técnico-económica del diseño e implementación de un banco de baterías para un vehículo híbrido. Universidad de Cuenca.
- Williamson S., Emadi A. (2005). Comparative assessment of hybrid electric and fuel cell vehicles based on comprehensive well to wheels efficiency analysis. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 54, no. 3.
- Wood E., Neubauer J., Brooker A., Gonder J., Smith K. (2012). Variability of Battery Wear in Light Duty Plug-In Electric Vehicles Subject to Ambient Temperature, Battery Size, and Consumer Usage. Presented at the International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium 26 (EVS26).
- Wooldridge M. (2009). Introducción a la econometría. Un enfoque moderno, 4a. edición.

Anexos

Transformación de la energía

La energía en todas sus manifestaciones ha sido uno de los principales pilares para el desarrollo socioeconómico de las naciones. Entre las fuentes primarias de energía están los combustibles fósiles, siendo el transporte por carretera uno de los principales consumidores de este tipo de energía primaria, llega a usar del 49,7% de la demanda mundial del petróleo hasta el año 2015 (International Energy Agency, 2017). En este sentido, en el Ecuador el transporte terrestre llega a consumir el 84% de la energía total (destinada para el sector del transporte) del país (INER, 2014). Llega a ser el causante del 50% de las emisiones de gases de efecto invernadero (dentro del sector energético) como lo demuestran estudios desarrollados por Guayanlema (2013).

Para hacer frente a este modelo extractivista, mismo que es insostenible en el tiempo, debido a la cantidad limitada de recursos fósiles, a nivel global se han desarrollado tecnologías con el fin de reducir el uso de combustibles fósiles y cuidar el medio ambiente. De forma específica, el Estado ecuatoriano ha implementado algunos incentivos con el fin de promover el consumo de energía eléctrica y reducir el uso de combustibles fósiles. Esto se da luego de que la capacidad de generación eléctrica del país se ampliara a 6799 (INER, 2013).

En este sentido, los sistemas de propulsión basados en ICE (Motor de combustión interna) están siendo reemplazados por un sistema de propulsión eléctrica, ya sea parcial o total, para minimizar el consumo de combustible y la emisión de CO₂. La electrificación es la manera más viable para lograr un transporte limpio y eficiente, mismo que es crucial para el desarrollo sostenible. En un futuro, los vehículos eléctricos, incluidos los vehículos eléctricos híbridos, los vehículos eléctricos híbridos enchufables dominarán el mercado de vehículos limpios (Howell, 2011).

Las baterías de vehículos eléctricos son distintas de las que se usan en dispositivos como los ordenadores portátiles y los teléfonos móviles. Estas baterías deben ser capaces de manejar alta potencia (hasta 100 kW) y alta capacidad energética (hasta decenas de kWh) en un espacio y peso limitados y a un precio accesible. Las principales tecnologías de baterías que se utilizan actualmente en los vehículos eléctricos son el hidruro de níquel metal (NiMH) y el ion litio (Li-ion). La mayoría de los vehículos eléctricos híbridos disponibles en el mercado utilizan baterías de níquel metal debido a su tecnología madura. (Verdugo & Reibán, 2020).

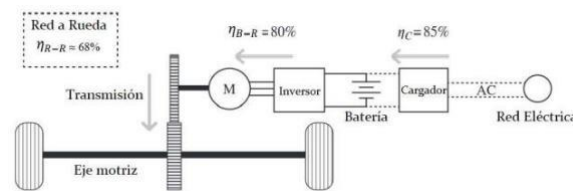
Debido a su potencial de obtener mayor energía específica y densidad, se espera que la adopción de las baterías de iones de litio aumente en los vehículos eléctricos, especialmente en los vehículos eléctricos

híbridos enchufables y vehículos eléctricos. Se debe resaltar que existen varios tipos de baterías de iones de litio basadas en una química similar, sin embargo, ciertamente diferente (Corrigan & Masias, 2011).

Vehículo Eléctrico (EV)

El vehículo eléctrico transforma la energía química de la batería en energía mecánica mediante un accionamiento eléctrico, como se muestra en la Figura 1. El accionamiento eléctrico cuenta con un inversor, motor eléctrico y controles. El inversor convierte la corriente continua en corriente alterna para alimentar de manera óptima el motor eléctrico. Si bien el EV es muy eficiente en la conversión energética, se puede presentar una limitante en el rango de autonomía del sistema de baterías, causada principalmente por una baja densidad de energía o energía específica (Wh/kg).

Un vehículo eléctrico ofrece numerosas ventajas sobre vehículos basados en combustión interna (ICE), como emisión cero, alta eficiencia, independencia de los productos del petróleo, operación más segura, silenciosa y suave. Las desventajas significativas de los vehículos eléctricos incluyen un gran tiempo de carga de la batería, menor flexibilidad y rendimiento dinámico limitado. Una limitación importante de los vehículos eléctricos con batería es su rango de funcionamiento limitado por ciclo de carga de la batería (Chan, Bouscayrol, & Chen, 2010).



Anexo A. 2. Arquitectura del vehículo eléctrico

Fuente: Verdugo & Reibán, 2020

Vehículo eléctrico híbrido (HEV)

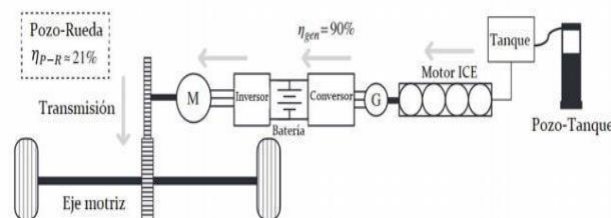
El vehículo eléctrico híbrido (HEV) ofrece ciertas ventajas como un rango de operación eléctrico extendido, buena economía de combustible, mayor eficiencia, suficiente potencia a bordo y mejor respuesta dinámica. Sin embargo, la integración de la tecnología del automóvil con la tecnología eléctrica agrega complejidad en los controles y hace que el sistema de vehículos HEV sea relativamente voluminoso y costoso (Williamson & Emadi, 2005). Los HEV mejoran la economía de combustible de los vehículos convencionales que funcionan con combustibles fósiles, ya que abordan una serie de factores críticos como los siguientes:

- Se recupera la energía de frenado regenerativa y la capacidad de almacenarla en la batería. En un vehículo convencional, la energía de frenado se disipa en forma de calor por el sistema de frenado y se pierde en el vehículo.
- El movimiento típico como paradas y arranques reiterados, bajas velocidades y bajos pares de torsión, presentes en ambientes de conducción como centros urbanos, generan una ineficiencia en un vehículo convencional, en cuanto al consumo de combustible. Por el contrario, un vehículo híbrido presenta un funcionamiento eficiente del motor, almacena y utiliza la energía de la batería solo cuando es eficiente hacerlo, es decir, se evita que el motor esté en funcionamiento consumiendo energía, cuando no se requiere movimiento o tracción alguna.
- La vida útil de la batería puede extenderse y el costo de la batería puede reducirse debido a las descargas de baterías de poca profundidad en un sistema híbrido en comparación con un automóvil eléctrico con batería.

En la actualidad existen diferentes sistemas híbridos, estos son: sistemas híbridos en serie, paralelo y serie paralelo, a continuación, se presenta un análisis de tallado de estos.

Vehículo eléctrico híbrido en serie (HEV)

El HEV en serie combina los mejores atributos del vehículo convencional ICE y el vehículo eléctrico. La arquitectura típica de un HEV se muestra en la Figura 2. Este vehículo combina la alta densidad de energía del combustible del vehículo convencional ICE y la eficiencia del vehículo eléctrico. El HEV en serie hace funcionar el motor IC en un modo de alta eficiencia, el sistema de tracción eléctrica y el sistema ICE funcionan en una conexión en serie, el motor IC está acoplado con un generador de energía eléctrica y un conversor para recargar la batería, la cual luego suministra energía a través de un inversor hacia el motor eléctrico, para luego el mismo suministrar energía mecánica al tren de transmisión (García & Pecas, 2013). Sin embargo, colocar dos accionamientos eléctricos en serie significa que el procesamiento de energía puede ser más ineficiente de lo deseado.

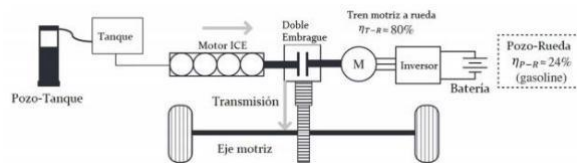


Anexo A. 3. Arquitectura del vehículo híbrido en serie

Fuente: Verdugo & Reibán, 2020

Vehículo eléctrico híbrido en paralelo

En el vehículo híbrido paralelo, el ICE y el motor eléctrico funcionan en modo paralelo, donde el ICE soporta la tracción eléctrica en ciertos puntos del patrón de conducción, por ejemplo, cuando se necesita una mayor potencia para las ruedas. La arquitectura paralela se ha implementado utilizando una transmisión de doble embrague. El motor ICE o el motor eléctrico se pueden acoplar directamente al eje de transmisión, y el ICE se puede acoplar al motor eléctrico para recargar la batería. Una arquitectura simple se muestra en la Figura 3. Si el vehículo está operando solo con el motor, entonces la eficiencia del motor puede ser alta si el motor funciona con eficiencia máxima. La eficiencia general puede disminuir a medida que la energía pasa por el sistema eléctrico debido a las ineficiencias en cada dirección a medida que la batería se carga y descarga, similar a la serie híbrida.

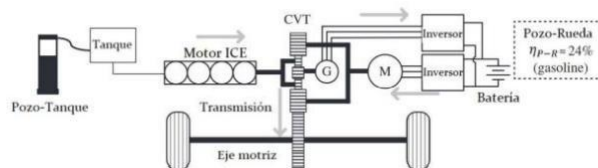


Anexo A. 4. Arquitectura de vehículo híbrido en paralelo.

Fuente: Verdugo & Reibán, 2020

Vehículo eléctrico híbrido serie-paralelo

En el vehículo híbrido serie-paralelo, el sistema está diseñado para operar tanto en serie como en configuración paralela, la arquitectura se muestra en la Figura 4. El sistema reconfigurable se hace posible mediante un engranaje planetario y solar, conocido como CVT, para dividir la potencia del motor de modo que el vehículo pueda controlarse de manera óptima para dirigir la salida del motor al tren de transmisión para la propulsión directa del vehículo o a la batería para el accionamiento eléctrico. Esto reduce la ineficiencia introducida en el HEV en serie al tener las dos etapas eléctricas en serie. El HEV serie-paralelo también tiene dos etapas en serie, pero solo necesita hacerlo cuando es ineficiente conducir directamente desde el motor IC, similar al híbrido paralelo.

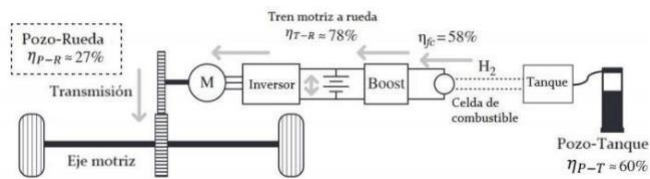


Anexo A. 5. Arquitectura de vehículo híbrido serie paralelo

Fuente: Verdugo & Reibán, 2020

Vehículo eléctrico de celda de combustible (FCEV)

Al igual que el HEV, el vehículo con celda de combustible presenta una batería que se utiliza para absorber las demandas de energía transitoria y la energía regenerativa. La energía no puede regenerarse en la celda de combustible, por lo que se requiere el sistema de batería para la regeneración. Un convertidor de refuerzo unidireccional conecta la celda de combustible con el enlace de carga continua de alto voltaje que alimenta el accionamiento eléctrico (Vimmerstedt, 2015). Una eficiencia del sistema de celda de combustible de aproximadamente 58% es razonable para una celda de combustible operada en modo de potencia óptimo y protegida por la batería para transitorios.



Anexo A. 6. Arquitectura de vehículo de celda de combustible

Fuente: Verdugo & Reibán, 2020

En pocas palabras, en un vehículo híbrido la economía del sistema de combustible depende de la capacidad del sistema de almacenamiento de energía eléctrica. Sin embargo, estas energías experimentan degradaciones tanto en la capacidad energética, como en la resistencia interna debido a varios procesos irreversibles (Tang, Rizzoni & Ono, 2015).

La tasa de pérdida de capacidad de la batería está determinada por un sin número de factores, incluyendo condiciones operativas y ambientales. Factores tales como temperatura extrema, alto o bajo estado de carga (SOC) y descarga excesiva contribuyen a la degradación de su capacidad. La temperatura ambiente afecta considerablemente ya que en ensayos realizados a una celda revelan que el ciclo de vida incide principalmente en la carga y, a las mismas condiciones de prueba se vuelve insensible a la descarga. Para diferentes ciclos de carga de una celda se ha determinado que el corte de carga es más eficiente cuando alcanza un valor de 4.2 voltios con una incidencia directa de la temperatura (Choi & Lim 2002).

Por otro lado, estos signos de progreso hacia un futuro más sostenible han desencadenado la fabricación de grandes baterías que utilizan productos químicos y metales extraídos que toman grandes cantidades de energía para obtener una batería eficiente (Gies, 2015).

El reciclaje podría minimizar el impacto ambiental de las baterías mediante la reducción de energía requerida para su producción, así como los daños medioambientales causados por los peligrosos materiales usados en su fabricación como en la de nuevas baterías (Lavados & Bianchi, 2013).

Por desgracia, la mayoría de las baterías que no son de plomo no se reciclan, ya que casi en la mayoría de países no es requerido. En algunos estados de EE.UU. fomentan el reciclado de ciertos tipos de baterías, pero no como algo obligatorio. Una ley de la Unión Europea exige el reciclaje, pero se está introduciendo progresivamente en el tiempo. Lo que deja a la parte económica como un aspecto motivacional, ya que las baterías no contienen suficientes metales preciosos para hacer el reciclaje económicamente viable. Además, los procesos de reciclaje disponibles hoy en día reducen los metales extraídos de nuevo a su forma original, lo que significa que se deben repetir múltiples procesos para construir una nueva batería (Gies, 2015).

Actualmente, una de las baterías que se ha reciclado ampliamente es la de plomo-ácido (que se utilizan en la mayor parte de vehículos a combustión), y tiene una tasa de reciclaje del 98% debido a que el plomo es tóxico y su eliminación está fuertemente regulada. El reciclaje de baterías de plomo cuesta menos que la minería del plomo, y porque este metal pesado compone aproximadamente el 65% de la masa de la batería. El proceso ahorra dinero para los fabricantes y es lucrativo para los comerciantes de chatarra (Choi & Lim 2002).

Sin embargo, mientras que las baterías de plomo-ácido son casi siempre recicladas, es menos común ver reciclar las baterías de iones de litio de los teléfonos móviles, la electrónica portátil y los autos híbridos y eléctricos. En la UE, sólo el 5% del litio de las baterías vendidas en 2010 fueron recicladas. Una de las razones de esta baja tasa de reciclaje de estas baterías corresponde a un proceso de reciclaje complejo (Klass, Behm & Lindberg, 2014)

Las baterías de plomo ácido tienen pocos materiales en el diseño. Se hace fácil recuperar el plomo ya que este producto está estandarizado. Por otro lado, las baterías de litio tienen varios elementos químicos y formas microestructurales, por ejemplo, en el cátodo se podría incluir el cobalto, níquel, manganeso, fósforo y hierro, mientras que el ánodo es típicamente carbono, y el electrolito orgánico contiene sales de litio, cobre, aluminio y acero (Huo, Rao, Liu & Zhao, 2015).

Gran parte del reciclaje de la batería de iones de litio ha sido motivada por la extracción de cobalto desde el cátodo y en menor medida el níquel y cobre, el valor de este elemento hace que el reciclaje sea económicamente atractivo. En particular, el cobalto es caro y difícil de obtener; Una de sus fuentes primarias es la zona de conflicto en la República Democrática Del Congo. Sin embargo, el cobalto se

elimina gradualmente mientras que los investigadores encuentran materiales más baratos para el cátodo (Gies, 2015).

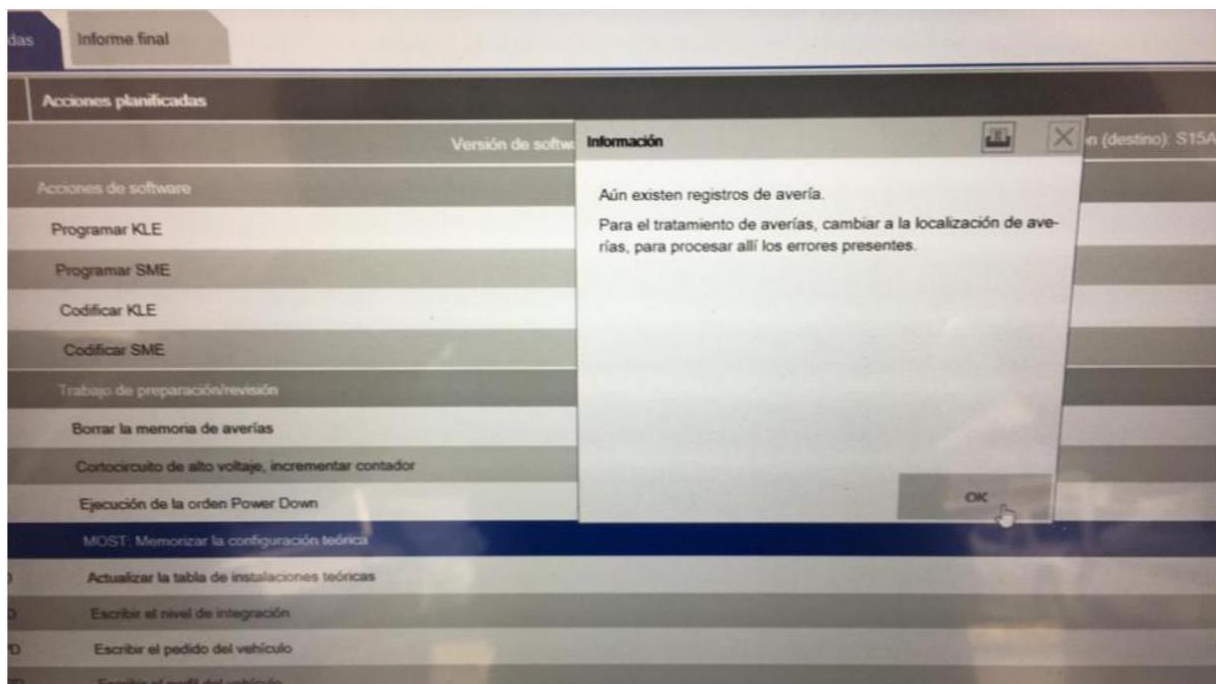
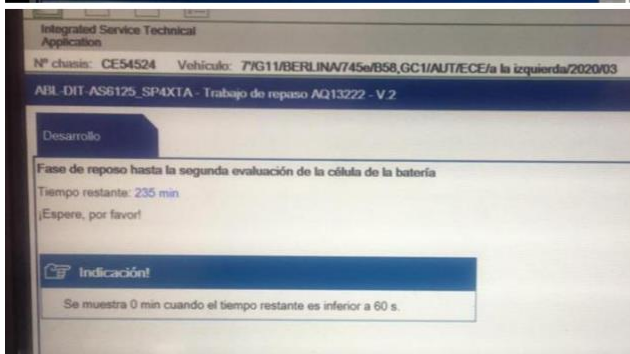
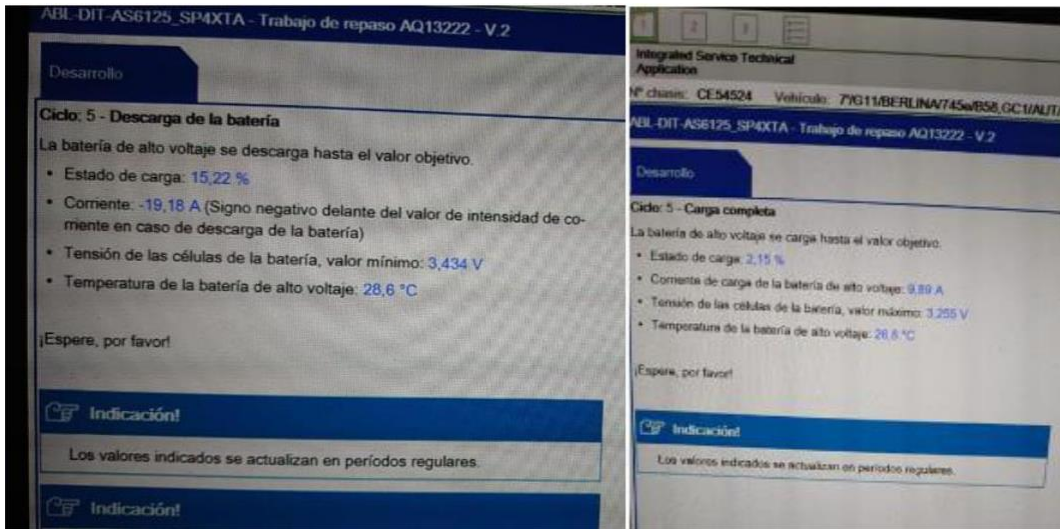
Los métodos de reciclado en la actualidad se basan en el refinado de metales, como, por ejemplo, la pirometalurgia, en la que las baterías se alimentan en una fundición y se funden para recuperar los metales. En las baterías de iones de litio más antiguas, el cobalto podría representar el 18% de la batería, pero el resto de los materiales, incluyendo litio y aluminio, terminan en escoria y luego son enterrados o incrustados en concreto. La empresa de reciclado de baterías Umicore, con sede en Bruselas, utiliza pirometalurgia para recuperar el cobalto, níquel, cobre y otros metales de las baterías de iones de litio y baterías de níquel-hidruro metálico. Otro método de reciclado es la hidrometalurgia que es utilizado por recicladores como Retrive Technologies. En este proceso, las células se separan en varias corrientes de producto sobre la base de lo que se hunde, flota o cuelga en solución. A continuación, se añaden productos químicos al agua, donde reaccionan con componentes catódicos para fabricar nuevos compuestos que son más fáciles de separar (Administrador Retrive Technologies, 2013).

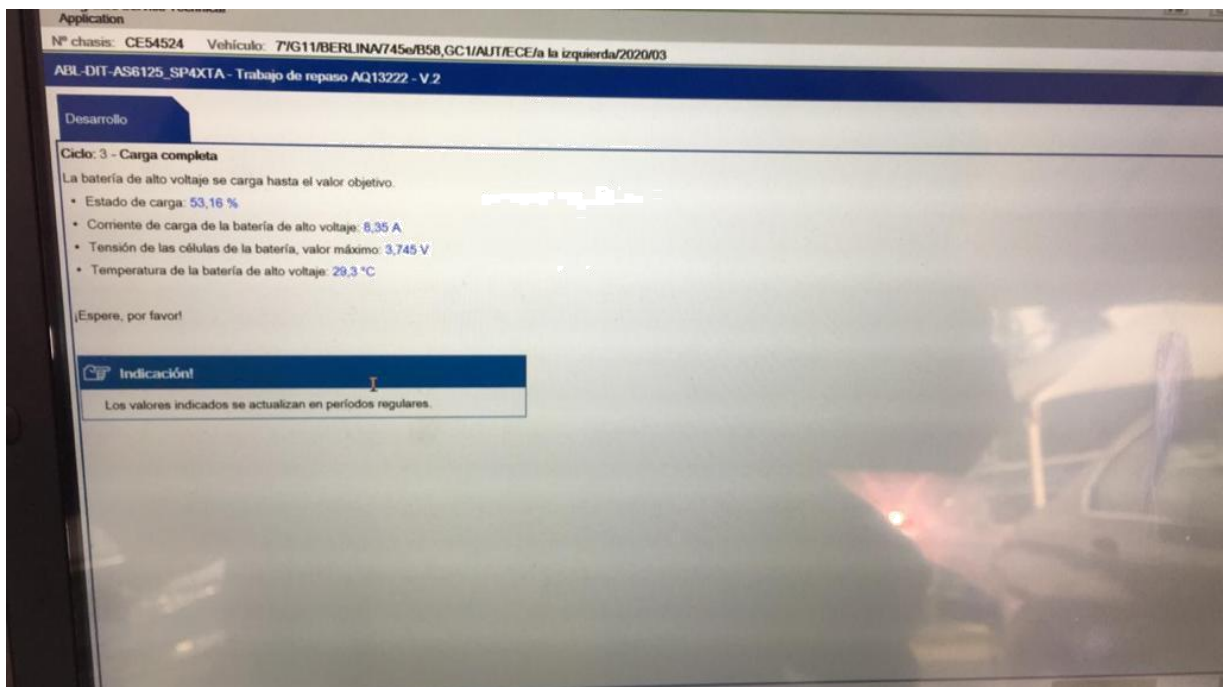
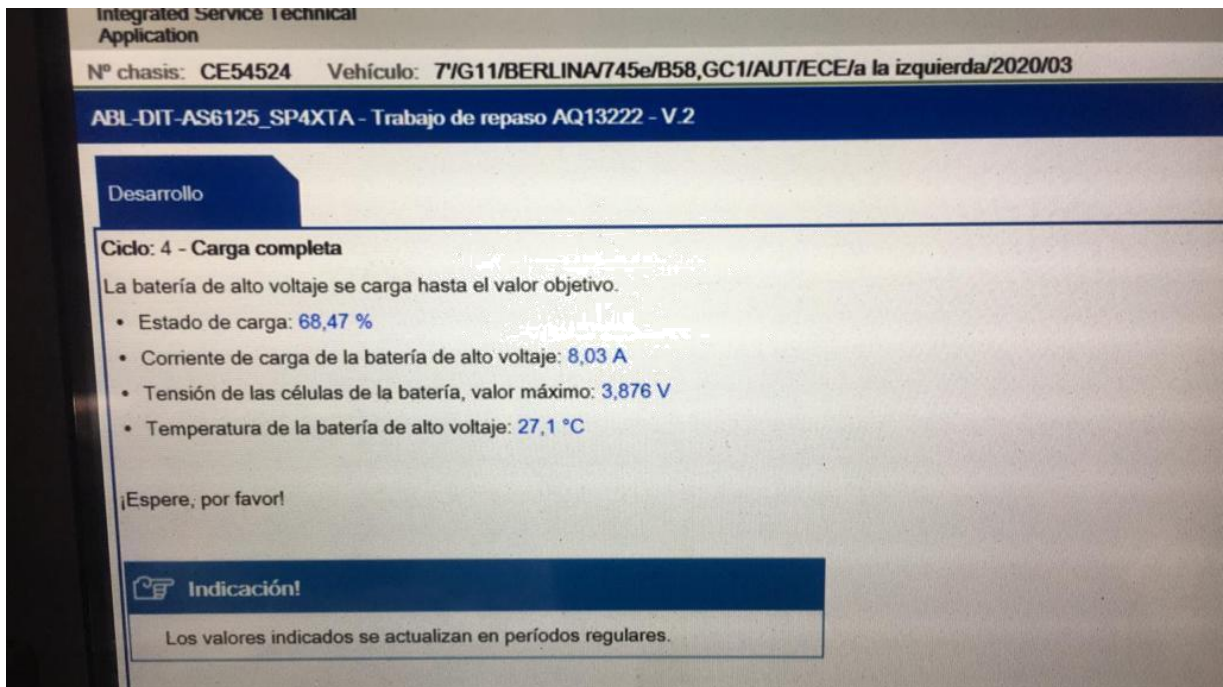
Las baterías de Litio disponen de gran energía específica, alta densidad de energía, y no necesitan mantenimiento, asimismo, no sufren del efecto memoria. Sin embargo, a pesar de sus aparentes ventajas con respecto a las demás baterías, tienen el defecto de sobrecalentarse y tener un alto costo (Chuquimarca & Suin, 2017).

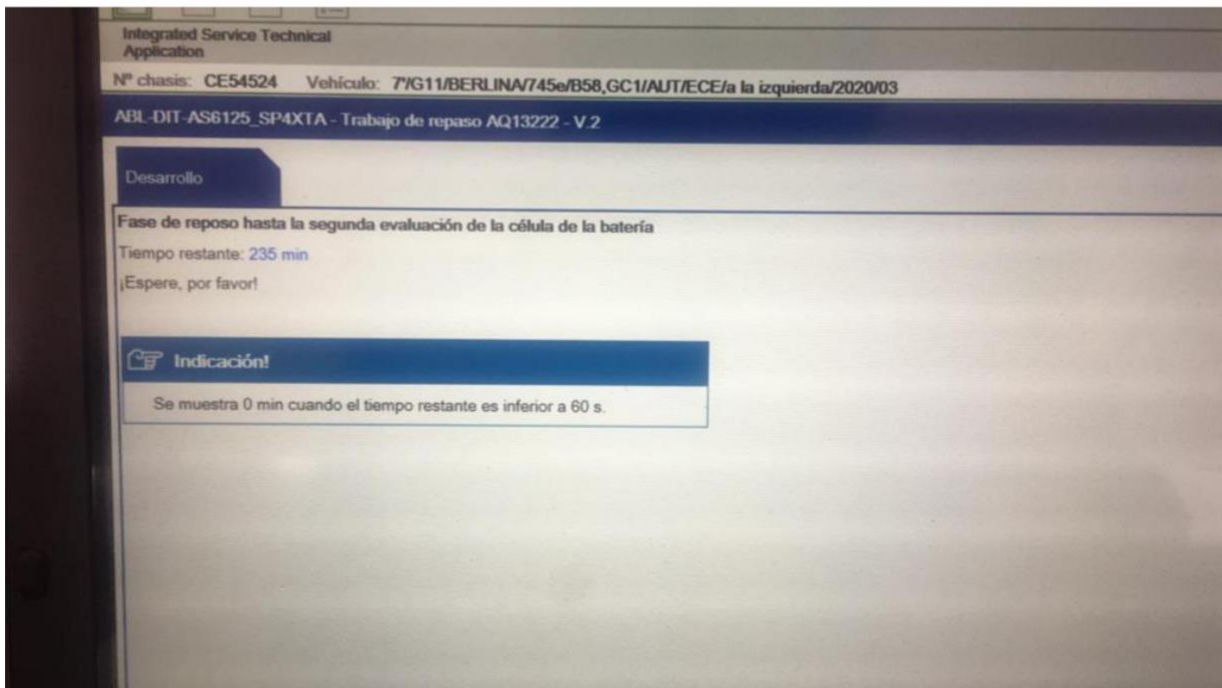
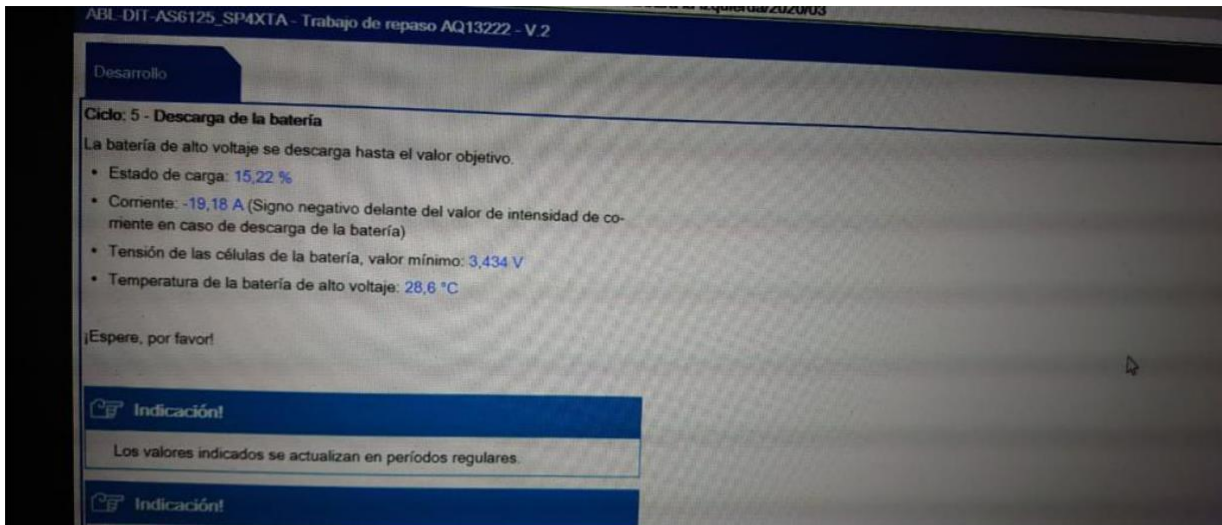


Anexo A. 7. Imagen referencial de una batería de litio

Anexo A. 8. Toma de lecturas







1 2 3
Integrated Service Technical
Application

Nº chasis: CE54524 Vehículo: 7/G11/BERLINA/745e/B58,GC1/AUT/ECE/a la izquierda/2020/03

ABL-DIT-AS6125_SP4XTA - Trabajo de repaso AQ13222 - V.2

Desarrollo

Ciclo: 4 - Carga completa

La batería de alto voltaje se carga hasta el valor objetivo.

- Estado de carga: 91,37 %
- Corriente de carga de la batería de alto voltaje: 7,58 A
- Tensión de las células de la batería, valor máximo: 4,117 V
- Temperatura de la batería de alto voltaje: 26,8 °C

¡Espere, por favor!

 **Indicación!**

Los valores indicados se actualizan en períodos regulares.

Cancelar

Equipos de
medición

Teclado

Panasonic CE-54

Autos híbridos en Ecuador

En el año 2005 ingresaron al Ecuador los primeros autos híbridos, tres años más tarde el Gobierno aprobó la primera norma para incentivar el uso de autos con tecnología eficiente lo que generó un verdadero ‘boom’ de vehículos híbridos, explica Diego Luna, presidente de la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (Aeade). Las ventas de los autos híbridos se multiplicaron y pasaron de 510 unidades vendidas en el 2008 a 4 509 en el 2010. Pero después de ese año, no volvería a alcanzar ese nivel ya que el Gobierno resolvió exonerar solo a los autos híbridos de hasta 2.000 centímetros cúbicos, el resto debería pagar aranceles que van del 10 al 35%, además del Impuesto al Valor Agregado (14%) y el Impuesto a los Consumos Especiales (del 8 al 12%, según el modelo del vehículo), esto debido a que se comenzó a importar autos híbridos de lujo de alto cilindraje que no representaba un ahorro de combustible significativo.

Para la ejecución de las pruebas se ha considerado los siguientes equipos: scáner diagnóstico ISTA PLUS BMW, ordenador, conector inalámbrico “ICON” para OBD II, software matemático STATA, multímetro.



Figura 4 Escáner ISTA PLUS BMW, ordenador.

(Aguirre e Imbaquingo,2021)



Figura 5 Conector inalámbrico “ICON” para OBD II
(Aguirre e Imbaquingo,2021)



Figura 6 Software matemático STATA
(Aguirre e Imbaquingo,2021)



Figura 7 Multímetro.

(Aguirre e Imbaquingo,2021)

A continuación, se muestra el análisis descriptivo de las variables dependientes e independientes involucradas en la investigación para los vehículos BMW G11, G20, G05.

En la tabla 7 se puede observar la estadística descriptiva (media, desviación estándar, mínimo, máximo) de las variables involucradas en la regresión. Es decir, esta tabla muestra las características de las variables de forma general. Por ejemplo, el nivel de carga almacenado en las celdas de alto voltaje en promedio es del 47%, su desviación con respecto de la media es de 29%, el mínimo valor es de 2%, su máximo es de 100%. Asimismo, el flujo de carga que recorre las celdas de alto voltaje (Corriente de carga) es en promedio 9,36A, su desviación con respecto de la media es de 7A, su valor mínimo de 0,32A, y su máximo es de 29,3A. la interpretación de la tabla 7 para las demás variables sería de forma similar.

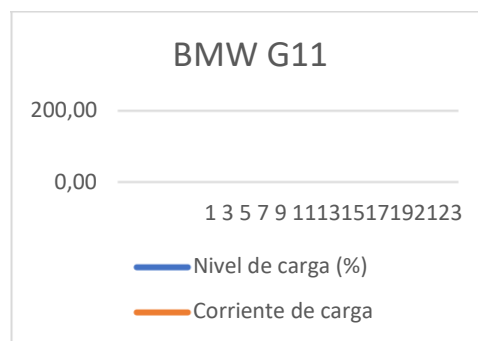
Tabla 7 Descripción de las Variables involucradas en la regresión.

| Variable | Obs | Mean | Std. Dev. | Min | Max |
|---------------------------|------------|-------------|------------------|------------|------------|
| Nivel de carga | 69 | 47,89 | 29,77 | 2,15 | 100 |
| Corriente de carga | 69 | 9,36 | 7,02 | 0,32 | 29,3 |
| Tensión | 69 | 3,81 | 0,23 | 3,255 | 4,3 |
| Temperatura | 69 | 25,82 | 3,71 | 17 | 31,1 |

(Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021)

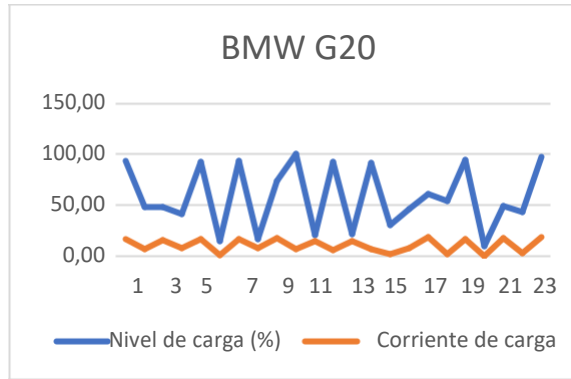
En los gráficos 1, 2 y 3 se puede observar el comportamiento del nivel de carga almacenado, y el flujo de carga eléctrica luego de la acción de carga y descarga para los 3 tipos de autos BMW. Se puede notar que estas variables se comportan de manera directamente proporcional, es decir, a mayor corriente, mayor nivel de carga.

Gráfico 5 Evolución Nivel de carga y Corriente BMW G11



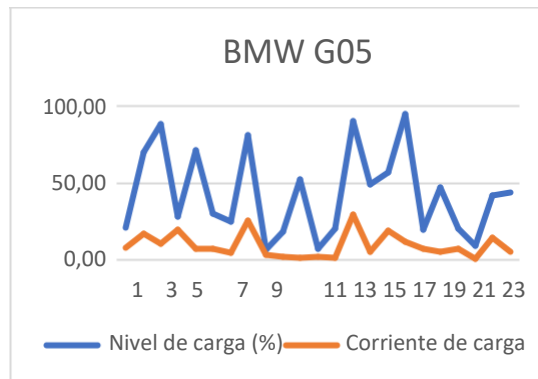
Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021

Gráfico 6 Evolución Nivel de carga y Corriente BMW G20



Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021

Gráfico 7 Evolución Nivel de carga y Corriente BMW G05



Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021

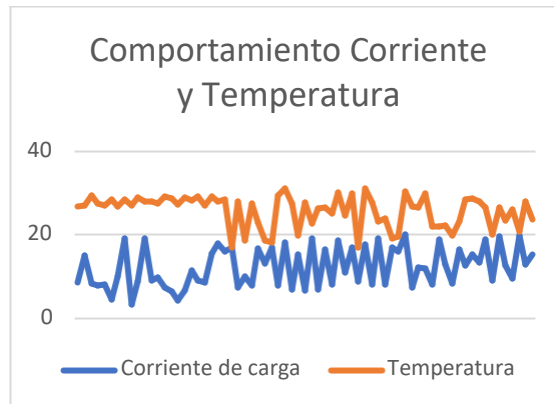
En los gráficos 4, 5 y 6 se puede observar el comportamiento de las variables *Corriente*, *Tensión* y *Temperatura*, a simple vista se puede observar que estas se comportan de acuerdo con el análisis de correlaciones, mismo que será discutido más adelante.

Gráfico 8 Comportamiento Corriente y Tensión



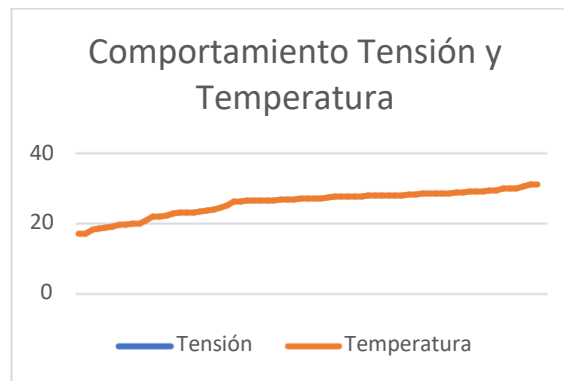
Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021

Gráfico 9 Comportamiento Corriente y Temperatura



Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021

Gráfico 10 Comportamiento Tensión y Temperatura



Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021

A continuación, en las tablas 8, 9 y 10 se presentan los resultados de las pruebas de normalidad de los residuos, multicolinealidad y heterocedasticidad.

En la tabla 8 se puede observar el resultado de la prueba de Jarque Bera de simetría y curtosis, en este se puede notar que los residuos del modelo tienen distribución normal, ya que la hipótesis nula no se rechaza debido a que $p\text{-valor} > 0,05$.

Tabla 8 Prueba de normalidad de los residuos

Skewness/Kurtosis tests for Normality

| Variable | Obs | Pr(Skewness) | Pr(Kurtosis) | —joint— | | Prob>chi2 |
|----------|-----|--------------|--------------|---------|---------|-----------|
| | | | | adj | chi2(2) | |
| residual | 69 | 0.4412 | 0.7477 | 0.71 | 0.6999 | |

Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021

En la tabla 9 se puede observar el resultado de la prueba de multicolinealidad. Se puede notar la no existencia de esta, ya que el VIF es menor a 10.

Tabla 9 Prueba de Multicolinealidad

| Variable | VIF | 1/VIF |
|--------------|------|----------|
| Corriented~a | 1.22 | 0.819944 |
| Tensión | 1.02 | 0.979046 |
| Temperatura | 1.03 | 0.967737 |
| 1.Estado | 1.19 | 0.841281 |
| Mean VIF | 1.12 | |

Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021

En la tabla 10 se puede observar el resultado de la prueba de heterocedasticidad de Breusch-Pagan. Se puede apreciar la no existencia de esta, ya que la hipótesis nula no es rechazada debido a que el p-valor>0,05.

Tabla 10 Prueba de heterocedasticidad

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity
 Ho: Constant variance
 Variables: fitted values of Niveldecarga

chi2(1) = 0.25
 Prob > chi2 = 0.6166

Fuente: Aguirre e Imbaquingo,2021



Variability of Battery Wear in Light Duty Plug-In Electric Vehicles Subject to Ambient Temperature, Battery Size, and Consumer Usage

Preprint

Eric Wood, Jeremy Neubauer, Aaron D. Brooker, Jeffrey Gonder, and Kandler A. Smith

*Presented at the International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium 26 (EVS26)
Los Angeles, California
May 6-9, 2012*

NREL is a national laboratory of the U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, operated by the Alliance for Sustainable Energy, LLC.

Conference Paper
NREL/CP-5400-53953
August 2012

Contract No. DE-AC36-08GO28308

NOTICE

The submitted manuscript has been offered by an employee of the Alliance for Sustainable Energy, LLC (Alliance), a contractor of the US Government under Contract No. DE-AC36-08GO28308. Accordingly, the US Government and Alliance retain a nonexclusive royalty-free license to publish or reproduce the published form of this contribution, or allow others to do so, for US Government purposes.

This report was prepared as an account of work sponsored by an agency of the United States government. Neither the United States government nor any agency thereof, nor any of their employees, makes any warranty, express or implied, or assumes any legal liability or responsibility for the accuracy, completeness, or usefulness of any information, apparatus, product, or process disclosed, or represents that its use would not infringe privately owned rights. Reference herein to any specific commercial product, process, or service by trade name, trademark, manufacturer, or otherwise does not necessarily constitute or imply its endorsement, recommendation, or favoring by the United States government or any agency thereof. The views and opinions of authors expressed herein do not necessarily state or reflect those of the United States government or any agency thereof.

Available electronically at <http://www.osti.gov/bridge>

Available for a processing fee to U.S. Department of Energy and its contractors, in paper, from:

U.S. Department of Energy
Office of Scientific and Technical Information
P.O. Box 62
Oak Ridge, TN 37831-0062
phone: 865.576.8401
fax: 865.576.5728
email: <mailto:reports@adonis.osti.gov>

Available for sale to the public, in paper, from:

U.S. Department of Commerce
National Technical Information Service
5285 Port Royal Road
Springfield, VA 22161
phone: 800.553.6847
fax: 703.605.6900
email: orders@ntis.fedworld.gov
online ordering: <http://www.ntis.gov/help/ordermethods.aspx>

Cover Photos: (left to right) PIX 16416, PIX 17423, PIX 16560, PIX 17613, PIX 17436, PIX 17721



Printed on paper containing at least 50% wastepaper, including 10% post consumer waste.

EVS26
Los Angeles, California, May 6-9, 2012

Variability of Battery Wear in Light Duty Plug-In Electric Vehicles Subject to Ambient Temperature, Battery Size, and Consumer Usage

Eric Wood, Jeremy Neubauer, Aaron D. Brooker, Jeffrey Gonder, and Kandler A. Smith
National Renewable Energy Laboratory, Center for Transportation Technologies and Systems
1617 Cole Blvd., Golden, CO 80401, U.S.A.
eric.wood@nrel.gov

Abstract

Battery wear in plug-in electric vehicles (PEVs) is a complex function of ambient temperature, battery size, and disparate usage, and is not well understood. Battery life simulation scenarios that capture varying ambient temperature profiles, battery sizes, and driving patterns are of great value to battery manufacturers and vehicle original equipment manufacturers. This study seeks to improve understanding of battery wear in PEVs by implementing a predictive battery wear model, developed by the National Renewable Energy Laboratory, that is capable of capturing the effects of multiple cycling and storage conditions in a representative lithium chemistry. In particular, this paper explores the sensitivity of battery wear rates to ambient conditions, maximum allowable depth of discharge, and vehicle miles traveled. The analysis focuses on two midsize vehicle platforms: a battery electric vehicle (BEV) with a nominal range of 75 mi (121 km) and a plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) with 40 mi (64 km) of nominal charge-depleting range. Current U.S. hybrid electric vehicle populations are used to focus analysis on markets where consumers have shown a tendency towards early adoption of advanced vehicle technology. Both cross-sectional and longitudinal driving distance distributions are implemented to represent the variability of vehicle use, both vehicle-to-vehicle and day-to-day. In the scenarios examined, battery wear over an 8-year period was found to be dominated by ambient conditions for the BEV with capacity fade ranging from 19% to 32% while the PHEV was most sensitive to maximum allowable depth of discharge with capacity fade ranging from 16% to 24%. In addition, the BEV and PHEV were found to be comparable in terms of petroleum displacement potential after 8 years of service due to the BEV's limited utility for accomplishing long trips. Future work may include incorporating the effects of temperature on pack internal resistance/available capacity and analyzing a range of vehicle-to-grid scenarios.

Keywords: lithium battery, battery calendar life, cycle life, BEV, PHEV

1 Introduction

Plug-in electric vehicles (PEVs) are an advanced vehicle technology capable of reducing liquid

petroleum consumption by storing and using energy from the electric grid in an on-board battery. Widespread adoption of PEVs will be impacted by the ability of original equipment

manufacturers to accurately predict battery life to produce durable vehicles at a reasonable price. Unfortunately, battery life in PEVs is inherently variable with factors such as ambient temperature, vehicle miles traveled (VMT), and charging behavior all interacting to produce potentially disparate power and energy fade rates. Battery wear is also sensitive to maximum allowable depth of discharge (DoD) and pack thermal management. The degree to which these sizing and usage conditions impact battery wear rates and the variability of wear rates is explored.

2 Project Approach

To explore the sensitivity and variability of battery wear rate in PEVs to various parameters, a predictive battery wear model developed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL) was implemented [1]. The life model is informed by vehicle powertrain and battery pack thermal modeling capabilities developed internally at NREL. By leveraging these existing capabilities, it was possible to capture the effects of drive cycle-based loading and ambient conditions on battery wear rates in a predictive and robust method. An overview of this integrated approach is provided, followed by an explanation of various sizing and usage scenarios examined.

2.1 Battery Life Model

Battery aging is caused by multiple phenomena related to both cycling and calendar age. Battery degradation is accelerated with the DoD of cycling, elevated temperature, and elevated voltage exposure, among other factors. At the battery terminals, the observable effects of degradation are an increase in resistance and a reduction in capacity. These two effects can be correlated with power and energy loss that cause battery end-of-life in an application. Mechanisms for resistance growth include loss of electrical conduction paths in the electrodes, fracture and isolation of electrode sites, growth of film layers at the electrode surface, and degradation of the electrolyte. Mechanisms for capacity loss include fracture, isolation, and chemical degradation of electrode material, as well as loss of cyclable lithium (Li) from the system as a byproduct of side reactions.

Under storage or calendar-aging conditions, the dominant fade mechanism is typically growth of a resistive film layer at the electrode surface. As the layer grows, cyclable Li is also consumed from the system, reducing capacity. In the present model,

resistance growth and Li-capacity loss are assumed to be proportional to the square-root of time, $t^{1/2}$, typical of diffusion-limited film-growth processes [2]. Under cycling-intense conditions, degradation is mainly caused by structural degradation of the electrode matrix and active sites. Cycling-driven degradation is assumed to be proportional to the number of cycles, N . Cell resistance growth due to calendar- and cycling-driven mechanisms are assumed to be additive:

$$R = a_0 + a_1 t^{1/2} + a_2 N \quad (1)$$

Cell capacity is assumed to be controlled by either loss of cyclable Li or loss of electrode sites,

$$Q = \min(Q_{Li}, Q_{sites}) \quad (2)$$

where

$$Q_{Li} = b_0 + b_1 t^{1/2} \quad (3)$$

$$Q_{sites} = c_0 + c_1 N \quad (4)$$

Models (1), (3), and (4) are readily fit to a resistance or capacity trajectory measured over time for one specific storage or cycling condition. Using multiple storage and cycling datasets, functional dependence can be built for rate constants $a_i(T, V, DoD)$, $a_i(T, V, DoD)$, $b_i(T, V, DoD)$, and $c_i(T, V, DoD)$. The present battery life model was fit to laboratory aging datasets [3]–[6] for the Li-ion graphite/nickel-cobalt-aluminum (NCA) chemistry as described in [6]. The graphite/NCA chemistry has generally graceful aging characteristics and is expected to achieve 8 or more years of life when sized appropriately for a vehicle application.

The life model employed in this analysis was matched to experimental data for a graphite/NCA Li-ion cell with up to 25% battery capacity fade. Beyond this level of wear, fade rates may accelerate, as sometimes evidenced in experimental data by a sharp drop in remaining capacity with continued cycling. The present life model does not capture possible accelerating fade mechanisms that could occur beyond 25% capacity fade.

In addition, the life model has been shown to have weak sensitivity to normal battery temperature variation over the course of a single day, particularly when the thermal mass of the battery is taken into account [7]. As such, this analysis uses

average monthly temperatures as inputs to the life model to capture the effect of seasonal variability in disparate climate regions of the United States.

While high heat generation rates resulting from aggressive driving are correlated to increased battery temperature, the impact of fast charging as it relates to rate-induced wear is not considered in the present model.

2.2 FASTSim Vehicle Model

Vehicle modeling was performed using a high-level tool developed at NREL known as FASTSim (Future Automotive Systems Technology Simulator). The analysis focuses on two midsize vehicle platforms: a battery electric vehicle (BEV) with a nominal range of 75 mi (121 km) and a plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) with 40 mi (64 km) of nominal charge-depleting (CD) range followed by charge-sustaining (CS) operation via a gasoline-fueled internal combustion engine. Table 1 summarizes the platform and component parameters selected for the BEV and PHEV models, which are roughly similar to the configuration of the production Nissan Leaf and Chevrolet Volt, respectively [8]–[9].

Table 1. FASTSim vehicle model inputs (baseline values).

| | BEV | PHEV |
|-----------------------------------|-------------------|----------------|
| Drag Coefficient (C_d) | 0.29 | 0.28 |
| Frontal Area (m^2) | 2.27 | 2.13 |
| Vehicle Mass (kg) | 1663 | 1850 |
| Engine Power (kW) | NA | 53 |
| Battery Capacity (kWh) | 24 | 16 |
| Maximum SOC | 95% | 85% |
| Maximum Allowable DoD | 90% | 65% |
| Battery Thermal Management System | No active cooling | Liquid cooling |
| Accessory Load (W) | 300 | 300 |
| Approx UDDS CD Range (mi) | 100 | 50 |
| Approx Adjusted CD Range (mi) | 75 | 40 |

Battery internal heat generation rates were correlated with drive cycles through vehicle simulations informed with cell-level test data for a representative Li chemistry. Nominal heat generation rates were determined using the California Air Resources Board LA92 drive cycle, which was found to produce moderate heat

generation rates characteristic of real-world drive cycles (see Table 2).

Table 2. Cycle attributes determined through simulation of BEV and PHEV.

| Drive Cycle | Time, s | Distance, km | Avg Speed, $km \cdot hr^{-1}$ | BEV Avg Heat Gen, W | PHEV Avg Heat Gen, W |
|-------------|---------|--------------|-------------------------------|---------------------|----------------------|
| UDDS | 1,369 | 11.99 | 31.5 | 60 | 103 |
| LA92 | 1,435 | 15.80 | 39.6 | 152 | 232 |
| US06 | 600 | 12.89 | 77.8 | 477 | 622 |

2.3 Vehicle Thermal Model

To correlate ambient conditions to battery temperature, a detailed thermal vehicle model was implemented. Based on previous analysis done by NREL on a Toyota Prius [10], the thermal model captures heating due to both ambient temperature profiles and solar loading (see Figure 1). These inputs are merged with battery internal heat generation profiles during driving and charging to calculate the average battery temperature over the course of a 24-hour period. In addition to passive heat transfer to ambient, the PHEV battery pack is equipped with an active thermal management system (TMS) capable of maintaining the battery temperature within a desired band when driven or plugged in. An active TMS was used to mitigate the effects of greater heat generation rates and smaller thermal mass in the PHEV pack whereas the modeled BEV employed passive thermal management. This methodology reflects current approaches of original equipment manufacturers and provides a means for evaluating different TMS strategies.

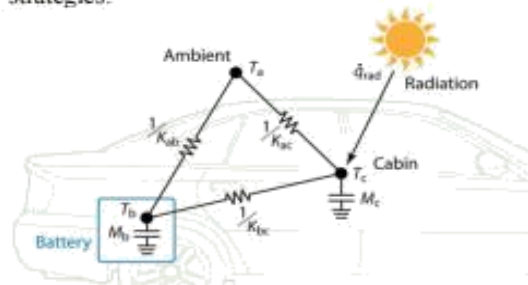


Figure 1. Vehicle thermal model employed to calculate battery temperature with respect to ambient temperature, solar loading, and thermal insulation.

Battery temperature was correlated to ambient for the passively cooled BEV in two steps (see Figure

2). First, an annual average battery temperature above ambient temperature in three different climates (shown in blue) was calculated according to the total solar loading for a given day (shown in green). In addition to solar loading, a second temperature differential was calculated as a result of battery heat generation and passive dissipation during driving and charging (shown in red). The temperature increase resulting from driving is a function of both daily driving distance and average ambient temperature.

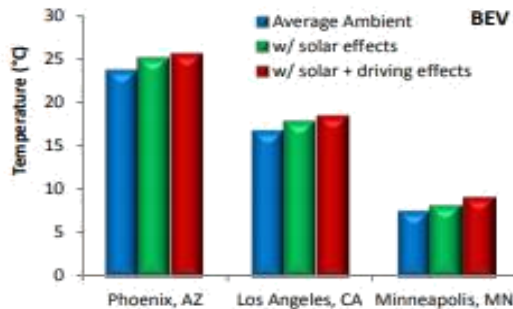


Figure 2. Average yearly battery temperature contributions from ambient, solar loading, and internal heat generation for simulated BEV.

Noticeably, contributions to average battery temperature from driving are relatively small, accounting for an increase of less than one degree Celsius in all climates. For the BEV, this can be attributed to both the large percentage of drive days with zero miles (approximately 16%) and the number of trips omitted due to distances greater than the range of the vehicle (see section 2.4.3).

Unlike for the BEV, contributions to battery temperature for the PHEV cannot be assumed to be additive due to the ability of the active TMS to heat or cool the battery as necessary. Contributions to battery temperature in the PHEV are attributed to three sources: (i) ambient temperature, (ii) solar loading and (iii) heat generation plus active cooling while driving/charging. A baseline battery temperature (shown in blue) is calculated as the difference above the ambient temperature due to solar loading (shown in Figure 3 in green). The red bar shows the adjusted temperature due to heat generated during driving/charging and the effects of the active TMS. The TMS is assumed to only operate when the vehicle is being driven or while plugged in. All scenarios assume that the PHEV is left unplugged and stationary (implying an inactive TMS) for approximately 8 hours during the course of the day.

While battery temperature calculations are performed to account for variations in driver aggression, active versus passive TMS, and daily distance, the cell-level effects of temperature on internal resistance and capacity are not captured in the present model. For example, a BEV battery pack in Minneapolis may experience significantly lower temperatures and subsequently reduced vehicle efficiency and range. In addition, auxiliary loading placed on the PHEV resulting from operation of the active TMS with the potential to limit CD range is not considered. Auxiliary climate control loading has the potential to significantly impact the CD range of PEVs as shown in [11]. Future battery wear analysis may address temperature effects on cell internal resistance and capacity to quantify the impact of active TMS on PEV efficiency and utility.

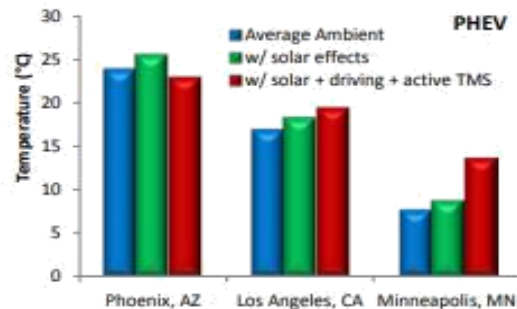


Figure 3. Average yearly battery temperature contributions from ambient, solar loading, active cooling, and internal heat generation for simulated PHEV.

2.4 Design of Experiments

Upon successful integration of the battery life model, the vehicle powertrain model, and the vehicle thermal model, the BEV and PHEV were run through a matrix of location, battery size, and usage scenarios with the primary outputs being battery resistance growth and capacity fade at 8 years. An initial sensitivity analysis revealed ambient conditions, maximum allowable DoD, and VMT to have the greatest influence on battery wear. The design of experiments used to study the effects of these variables is described in greater detail below.

2.4.1 U.S. Ambient Conditions

An expected distribution of wear rates was desired for both vehicles subject to U.S. ambient conditions. Current hybrid electric vehicle (HEV) population data were used as an estimate for the

future distribution of PEVs. HEV population statistics highlight both large markets and regions where consumers have shown a tendency towards early adoption of advanced vehicle technology. The Polk Company's 2010 light-duty vehicle registration dataset [12] was used to determine the top 100 U.S. metropolitan areas in terms of number of HEVs (see Figure 4). These locations account for approximately 75% of the total U.S. HEV population and represent a plausible estimate for the location distribution of PEV early adopters. Note from Table 3 moderate climates representative of the U.S. average.

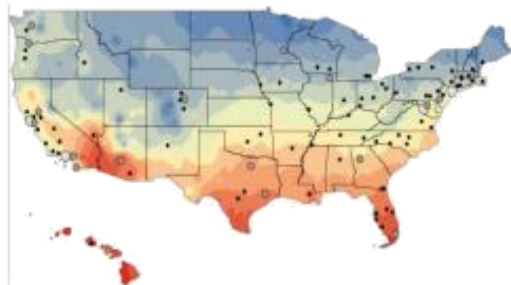


Figure 4. U.S. metropolitan areas with large HEV populations overlaid onto average ambient temperature map. (Credit: Evan Burton, NREL)

Table 3. Top five U.S. metropolitan areas in terms of HEV population.

| Metropolitan Area | # of HEVs |
|-------------------|-----------|
| Los Angeles, CA | 149,042 |
| New York City, NY | 86,773 |
| San Francisco, CA | 82,756 |
| Washington, DC | 66,720 |
| Chicago, IL | 52,158 |

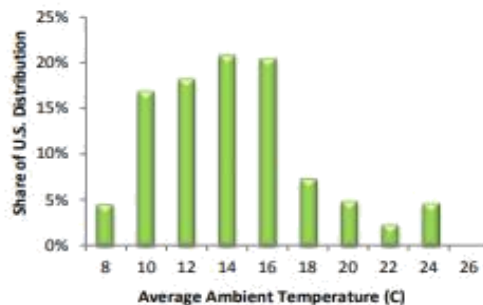


Figure 5. Weighted distribution of average ambient temperatures based on existing HEV populations.

Ambient temperature and solar irradiation data were assembled from NREL's Typical Meteorological Year Database (TMY3) [13]. The national weighted distribution of average yearly ambient temperatures can be seen in Figure 5. The TMY3 data were aggregated into monthly averages because hourly and daily battery temperature variations were shown to have a negligible effect on wear rates in the battery life model.

2.4.2 Depth of Discharge

The effect of maximum allowable DoD on battery wear is explored for both the BEV and the PHEV. Each vehicle was assigned a nominal value for maximum allowable DoD and maximum state of charge (SOC). These values are adjusted over a feasible range for both the BEV and PHEV to explore the effect on wear (80%–94% and 55%–87% maximum allowed DoD, respectively). The SOC window of the pack is adjusted relative to total energy to ensure that the available energy in the pack remains constant for all maximum allowable DoDs. By adjusting the maximum allowable DoD and maximum SOC, the life model will capture the wear effects of deep cycling and operation at high voltages.

Adjusting pack energy has an impact on vehicle mass (and cost) and is subsequently related to CD range, efficiency, and acceleration. In light of these interactions, the maximum allowable DoD was restricted to values that produced vehicle range, efficiency, and acceleration values within $\pm 1\%$ of the nominal design.

2.4.3 Vehicle Miles Traveled

This analysis uses fleet-aggregated driving distance statistics in addition to longitudinal (multi-day) travel profiles to represent the variability of travel behavior, both from vehicle to vehicle and from day to day. Fleet-aggregated statistics represent a snapshot of the travel patterns for a large fleet of vehicles on a given day. In this study, fleet-aggregated statistics are taken from the 2001 National Household Travel Survey (NHTS) [14] to reflect the behavior of the U.S. fleet. Using the NHTS, a distribution of fleet distances was created with a zero mile per day probability calculated as approximately 16% (about one day per week) such that the nominal VMT of the distribution was equal to 12,375 miles per year (19,916 km per year). This aggregated distribution is used as the default for analysis of ambient conditions and maximum allowable DoD.

To investigate the effect of VMT on battery wear, a large number of longitudinal distributions were simulated to capture the variable behavior of consumers. Longitudinal vehicle distributions track the driving behavior of individual vehicles over time and tend to exhibit a more focused set of distances with a small number of probability peaks representing routes frequently traveled. Figure 6 shows three examples of longitudinal profiles.

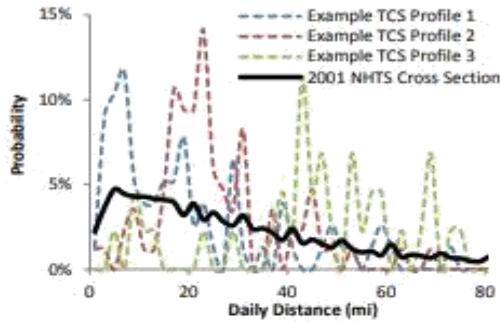


Figure 6. NHTS cross sectional distribution and three example longitudinal distributions taken from the Traffic Choices Study.

Longitudinal distributions used in this analysis are derived from the Puget Sound Regional Council's 2007 Traffic Choices Study (TCS) [15]. The TCS was an investigation of the response of travel behavior to variable toll charges in the Seattle metropolitan area. The study placed global positioning systems in 445 vehicles from 275 volunteer households that recorded driving patterns over an 18-month average per household period. The experiment started with a baseline period in which no artificial tolls were applied to affect behavior. We processed the data for use in this study by (i) only considering data collected during the approximately 3-month baseline period, (ii) eliminating vehicles for which no driving took place during the baseline period, (iii) eliminating vehicles for which significant errors in data recording were identified, and (iv) reducing detailed trip data to daily driving distance based upon the length of each trip and the date on which it was started. The resultant data were then converted into 398 longitudinal profiles of daily VMT with each profile representing one vehicle over multiple days. A distribution of annual VMT derived from this set of 398 longitudinal profiles is shown in Figure 7.

VMT calculations for the BEV do not include driving days where the expected daily distance is greater than the nominal vehicle range. This

assumption represents a conservative, near-term outlook. Alternate scenarios considering distributed charging, DC fast charging, or battery swapping could reflect greater utility for the BEV.

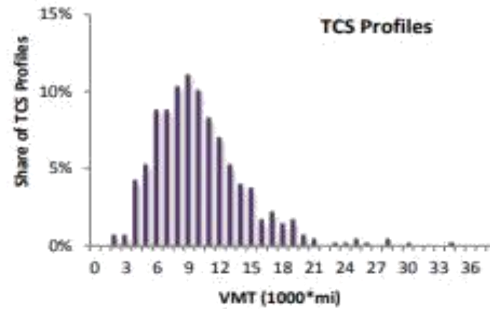


Figure 7. Distribution of annual VMT for 398 TCS longitudinal profiles.

3 Results

The BEV and PHEV were simulated to determine battery wear rates under the conditions outlined in Table 4.

Table 4. Tested wear conditions for the BEV and PHEV.

| BEV | PHEV |
|--|--|
| Distribution of U.S. ambient conditions (Portland, ME to Honolulu, HI) | Distribution of U.S. ambient conditions (Portland, ME to Honolulu, HI) |
| Range of max allowable DoD (80%–94%) | Range of max allowable DoD (55%–87%) |
| Range of VMT (398 TCS profiles) | Range of CD VMT (398 TCS profiles) |

3.1 Battery Electric Vehicle

3.1.1 U.S. Ambient Conditions

Figure 8 and Figure 9 show resistance growth and capacity loss distributions after 8 years of wear for the BEV subject to U.S. ambient temperatures and U.S. average driving distributions. Resistance growth ranges from 12% to 26% while capacity loss ranges from 20% to 32% subject to ambient conditions.

Wear rate variability is strongly linked to battery temperature variability. Figure 10 shows the distribution of yearly average battery temperatures experienced by the BEV. Pack temperature in the BEV was found to be greater than or equal to the ambient temperature in the absence of an active

TMS. The BEV battery pack is heated above ambient due to solar loading and internal heat generation during driving and charging.

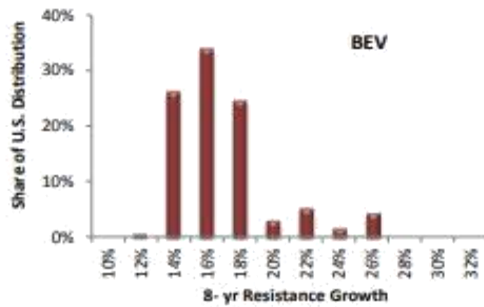


Figure 8. Weighted distribution of 8-year resistance growth for BEV exposed to 100 U.S. ambient conditions and NHTS national driving distribution.

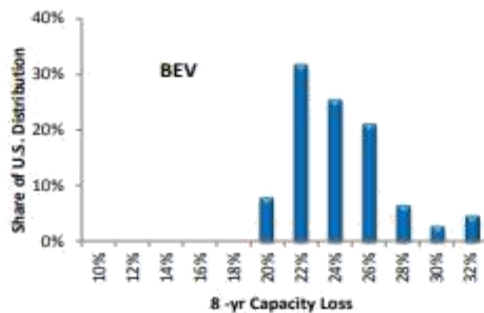


Figure 9. Weighted distribution of 8-year capacity loss for BEV exposed to 100 U.S. ambient conditions and NHTS national average driving distribution.

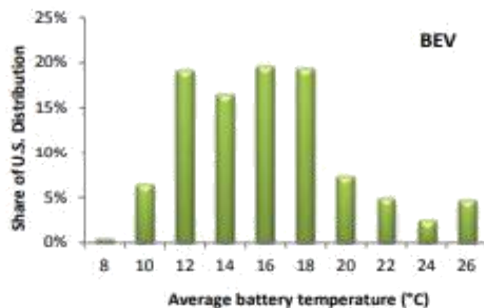


Figure 10. Weighted distribution of average yearly battery temperature for BEV exposed to 100 U.S. ambient conditions and NHTS national average driving distribution.

3.1.2 Depth of Discharge

Battery wear rate is sensitive to both maximum DoD and maximum SOC allowed by the battery management system. This sensitivity was explored

using the life model by simulating wear rates for a number of battery sizes in the BEV architecture. All battery sizes allowed the vehicle to discharge 21.6 kWh of energy from the battery and achieved consistent range, acceleration, and efficiency values to within $\pm 1\%$ of the nominal vehicle design. Figure 11 shows resistance growth and capacity loss at 8 years for multiple battery sizes subject to ambient conditions in Los Angeles, CA.

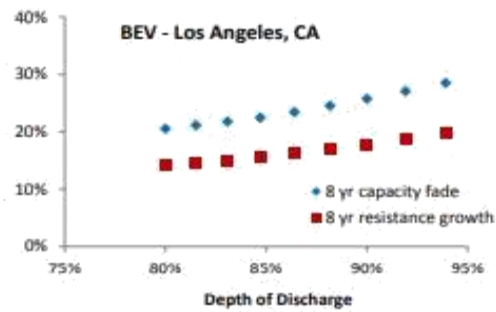


Figure 11. Eight-year resistance growth and capacity fade as a function of maximum allowable DoD for BEV exposed to ambient conditions in Los Angeles, CA and NHTS national driving distribution.

As expected, wear can be seen to increase as the maximum allowable DoD window is expanded to maintain range for smaller battery packs. Increasing the maximum allowable DoD of the pack from 80% to 94% causes 8-year resistance growth and capacity fade values to increase by 6% and 8% respectively. Using near-term battery prices (\$700/kWh production cost [16]) the 94% DoD scenario represents a beginning-of-life pack cost savings of \$700 while the 80% DoD design increases cost by \$2,100 (both relative to the 90% DoD pack).

3.1.3 Vehicle Miles Traveled

Battery wear in the BEV was subjected to 398 longitudinal distance distributions as interpreted from the TCS. Figure 12 shows the results of this simulation in terms of resistance growth and capacity fade after 8 years subject to ambient conditions in Los Angeles, CA.

Increased VMT can be seen to have opposing effects on resistance growth and capacity loss in the BEV for the simulated longitudinal profiles. Eight-year resistance growth increases by 18% over the selected range of VMT while capacity fade actually decreases by 5% at high VMT.

In the life model, capacity fade is dictated by the greater of two fade mechanisms, calendar and cycling. In this case, calendar fade is the dominant mechanism driven by average daily voltage. By increasing VMT, the battery is allowed to spend greater amounts of time resting at lower voltages (before daily recharge), which extends calendar life and thus reduces capacity fade.

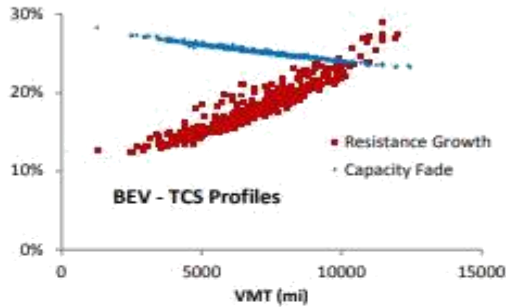


Figure 12. Eight-year resistance growth and capacity fade as a function of VMT for BEV exposed to ambient conditions in Los Angeles, CA and 398 longitudinal driving distributions.

This analysis is restricted to the single-charge-per-day scenario, and as such, driving days with distances longer than the nominal range of the vehicle are assumed to be accommodated by an alternative means of transportation. To represent the percentage of annual miles the BEV can achieve relative its original distribution, a BEV-specific, multiple day individual utility factor (IUF_{BEV}) is implemented according to Equation 5. As an example, a longitudinal distribution with an IUF_{BEV} equal to 50% would be able to achieve half of its annual miles in the BEV with one charge per day with the remaining miles accommodated by some other means.

$$IUF_{BEV} = \frac{\text{Achieved Annual Miles}}{\text{Annual Miles of Original Distribution}} \quad (5)$$

A unique IUF_{BEV} is calculated for each of the 398 longitudinal profiles. The distribution of IUF_{BEV} for the TCS is shown in Figure 13. The minimum and maximum of this distribution are 3% and 100%, respectively, with the mean occurring at an IUF_{BEV} of 75%.

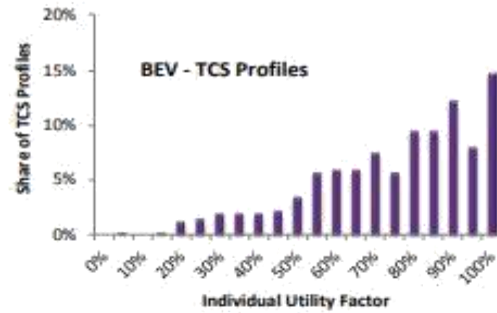


Figure 13. Distribution of IUF for BEV exposed to ambient conditions in Los Angeles, CA and 398 longitudinal driving distributions over 8 years.

3.2 Plug-In Hybrid Electric Vehicle

3.2.1 U.S. Ambient Conditions

Resistance growth and capacity fade distributions after 8 years of use for the PHEV subject to U.S. ambient temperatures and average driving distributions can be seen in Figure 14 and Figure 15. Resistance growth ranges from 18%–26%, and capacity loss ranges from 14%–20% over 8 years subject to variation in ambient temperature.

Figure 16 shows the distribution of battery temperatures experienced by the PHEV when exposed to U.S. ambient conditions. By reducing average battery temperatures and minimizing the effect of ambient conditions on the battery, the active TMS in the PHEV allows for reduced wear rates with relatively low amounts of variability with respect to regional climate differences experienced in the United States.

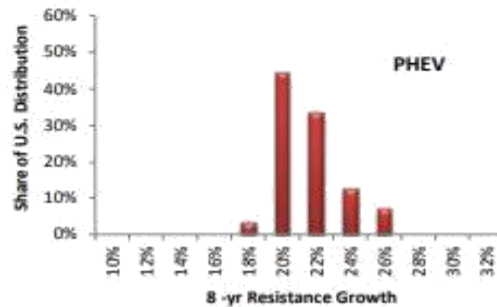


Figure 14. Weighted distribution of 8-year resistance growth for PHEV exposed to 100 U.S. ambient conditions and NHTS national driving distribution.

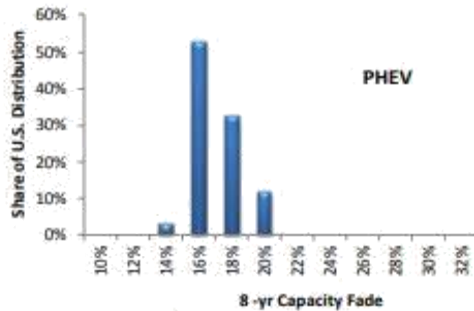


Figure 15. Weighted distribution of 8-year capacity fade for PHEV exposed to 100 U.S. ambient conditions and NHTS national driving distribution.

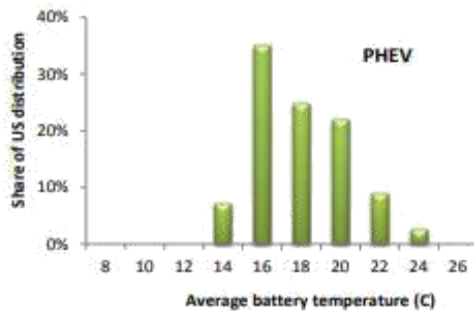


Figure 16. Weighted distribution of average yearly battery temperature for PHEV exposed to 100 U.S. ambient conditions and NHTS national driving distribution.

3.2.2 Depth of Discharge

Battery wear sensitivity to maximum allowable DoD was explored for the PHEV. All battery sizes allowed the vehicle to discharge 10.4 kWh of energy from the battery and achieved consistent CD range, acceleration, and efficiency values to within $\pm 1\%$ of the baseline case. Figure 17 shows resistance growth and capacity loss at 8 years for a range of battery sizes.

Increasing the maximum allowable DoD window of the PHEV from 55% to 87% increased resistance growth by 18% while capacity loss increased by 8% over the same range. As the maximum allowable DoD window is expanded, increased resistance growth limits the power capability of the pack. Loss of pack power would be reflected at the vehicle level in an increased degree of blended electric/petroleum operation or reduced all-electric vehicle power. The 87% DoD scenario represents a beginning-of-life pack cost savings of \$2,800 while the 55% DoD design

increases cost by \$2,100 (both relative to the 65% DoD pack).

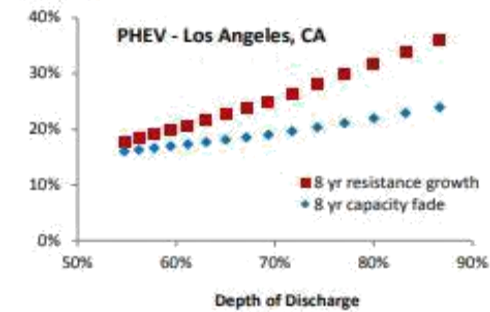


Figure 17. 8-year resistance growth and capacity fade as a function of maximum allowable DoD for PHEV exposed to ambient conditions in Los Angeles, CA and NHTS national driving distribution.

3.2.3 Vehicle Miles Traveled

The PHEV was subjected to an array of annual VMT scenarios according to the 398 longitudinal profiles derived from the TCS. Figure 18 shows the results of this analysis in terms of resistance growth and capacity fade after 8 years subject to ambient conditions in Los Angeles, CA.

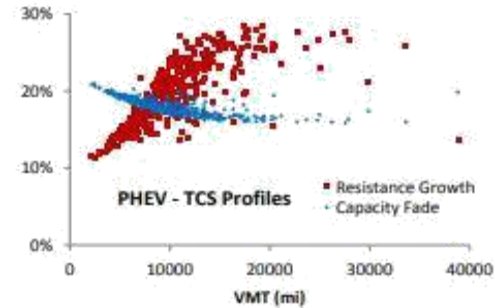


Figure 18. 8-year resistance growth and capacity loss as a function of VMT for PHEV exposed to ambient conditions in Los Angeles, CA and 398 longitudinal driving distributions.

As with the BEV, increased VMT can be seen to have opposing effects on resistance growth and capacity loss. Eight-year resistance growth increases by 17% over the selected range of VMT while capacity fade decreases by 5% at high VMT.

Note that the scatter of resistance growth and capacity fade is not as strongly correlated to VMT as was the BEV. This is due to the discrepancy in wear mechanisms between CD and CS operation in the PHEV. Wear induced by the deep cycles of CD operation significantly outweigh battery

degradation associated with the shallow cycling of CS operation. Battery wear in the PHEV can be seen to be more closely related with CD VMT, as shown in Figure 19.

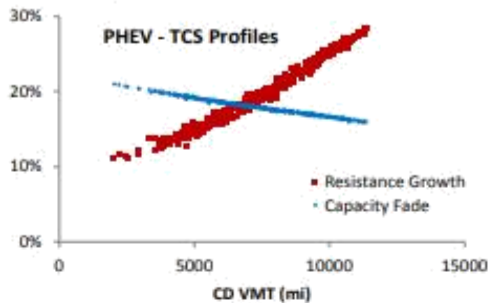


Figure 19. 8-year resistance growth and capacity fade as a function of CD VMT for PHEV exposed to ambient conditions in Los Angeles, CA and 398 longitudinal distributions.

A unique IUF is again calculated for each of the 398 longitudinal profiles. However, since the PHEV is assumed to have access to refueling stations, allowing it to operate in CS mode for a nearly unlimited distance, IUF_{PHEV} is calculated as the ratio of annual miles achieved in CD mode to the total annual miles (see Equation 6). For example, a distribution with an IUF_{PHEV} equal to 50% would be able to achieve half of its annual miles in CD mode (with one charge per day) with the remaining miles accomplished with the PHEV in CS mode.

$$IUF_{PHEV} = \frac{\text{Annual CD Miles}}{\text{Annual CD} + \text{Annual CS Miles}} \quad (6)$$

The distribution of IUF_{PHEV} for the TCS is shown in Figure 20. The minimum and maximum of this distribution are 9% and 100%, respectively, with the mean occurring at an IUF_{PHEV} of 78%.

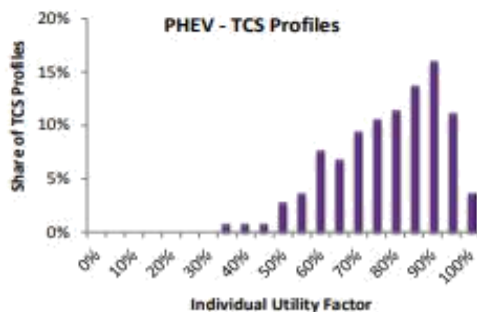


Figure 20. Distribution of IUF for PHEV exposed to ambient conditions in Los Angeles, CA and 398 longitudinal driving distributions over 8 years.

4 Conclusions

The sensitivity of battery wear to ambient conditions, battery size, and usage patterns has been explored. Major results of this analysis include:

- The spectrum of climate and usage conditions PEVs are expected to face in the U.S. market suggest that the assumption of a single average ambient condition for battery wear calculations may not be representative of observed behavior in the fleet.
- Ambient conditions have a large effect on battery wear for all variables considered in this study. The effects of ambient conditions on battery life can be mitigated by appropriate vehicle design. Thermal insulation and TMSs can be designed to improve fade rates for each vehicle platform.
- TMSs that employ active battery heating/cooling can reduce the amount of temperature variability in the pack. The passively cooled BEV experienced yearly average pack temperatures from 8°C to 26°C while the actively heated/cooled PHEV ranged from 14°C to 24°C.
- Maximum allowable DoD was found to significantly impact battery wear. Resistance growth and capacity fade were significantly reduced by designing a pack to operate with a relatively low maximum allowable DoD. However, pack design for low DoD can increase up-front vehicle costs by requiring additional total energy to achieve a desired CD range. For the modeled BEV, the extra battery capacity required for an 80% vs. 94% DoD window represents a roughly \$2,800 increment in pack cost. For the modeled PHEV, the extra battery capacity required for a 55% vs. 87% DoD window represents a roughly \$4,900 increment in pack cost. Increased battery energy may also require components such as the electric motor to be resized to maintain vehicle acceleration.
- The effect of VMT was explored for both the simulated BEV and PHEV. Battery wear was found to be a strong function of VMT for the BEV and of CD VMT for the PHEV. Under the single-charge-per-day assumption, increasing VMT was observed to decrease

capacity fade as longer driving trips reduced the amount of high voltage exposure to which the pack was subjected. This effect is believed to be pronounced by the unique characteristics of the NCA chemistry and would be expected to change significantly under alternative charge strategies (just-in-time, end-of-day, opportunity, 1x/day, 2x/day, etc.).

- The PHEV can achieve a comparable distribution of IUF to the BEV over 8 years despite the substantially shorter CD range of the PHEV. For the 398 longitudinal distributions simulated, the BEV achieved an average IUF of 75% compared to an average of 78% for the PHEV. This result is a product of the assumption that driving trips longer than the range of the BEV will be accommodated by some other means of transportation. The effects of this assumption are magnified as the BEV experiences reduced range due to capacity loss.

Future work may focus on improving the comparison of vehicle utility by incorporating effects of temperature on pack internal resistance and capacity. These effects are expected to reduce the utility of both BEVs and PHEVs as vehicle range is compromised at low pack temperatures and internal resistance increases at high temperatures. Additional analysis may also seek to develop a range of potential near term vehicle-to-grid scenarios to determine the subsequent impact on battery wear and achievable VMT.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the programmatic support of the U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Vehicle Technologies Program. The authors particularly wish to thank Vehicle Systems activity managers David Anderson and Lee Slezak for their guidance and support.

References

- [1] Smith, K., Markel, T., Kim, G.H., Pesaran, A., "Design of Electric Drive Vehicle Batteries for Long Life and Low Cost," National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 2010, NREL/PR-540-48933.
- [2] Idaho National Laboratory, "Technology Life Verification Testing," Idaho Falls, ID, 2010, INEEL-EXT-04-01986.

- [3] Broussely, M., "Aging of Li-ion batteries and life prediction, an update," 3rd Int. Symposium on Large Lithium-Ion Battery Technology and Application, Long Beach, California, May 2007.
- [4] Hall, J., Lin, T., Brown, G., Biensan, P., and Bonhomme, F., "Decay processes and life predictions for lithium ion satellite cells," 4th Int. Energy Conversion Engineering Conf., San Diego, California, June 2006.
- [5] Smart, M., Chin, K., Whitcanack, L., and Ratnakumar, B., "Storage characteristics of Li-ion batteries," NASA Battery Workshop, Huntsville, Alabama, Nov. 2006.
- [6] Broussely, M., Chap. 13 in: *Advances in Lithium-Ion Batteries*, van Schalkwijk, W., and Scrosati, B., editors. New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2002.
- [7] Smith, K., Neubauer, J., Earleywine, M., Wood, E., and Pesaran, A., "Comparison of Plug-In Hybrid Electric Vehicle Battery Life across Geographies and Drive-Cycles," Society of Automotive Engineers 2012 World Congress, 12PFL-0731.
- [8] CarsDirect, Nissan Leaf Specifications, <http://www.carsdirect.com/nissan/leaf/specs>, retrieved on 8-25-11.
- [9] GM Volt Specifications, <http://gm-volt.com/full-specifications/>, retrvd. 8-25-11.
- [10] National Renewable Energy Laboratory Strategic Initiative Working Group Report: Thermal Model of Gen 2 Toyota Prius, Kandler Smith, Ahnvu Le, Larry Chaney.
- [11] Barnitt, R.A., Brooker, A.D., Ramroth, L., Rugh, J., Smith, K.A., "Analysis of Off-Board Powered Thermal Preconditioning in Electric Drive Vehicles," National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 2010, NREL/CP-5400-49252.
- [12] R.L. Polk & Co., <https://www.polk.com>.
- [13] National Renewable Energy Laboratory, National Solar Radiation Database, Typical Meteorological Year Database 3, Golden, CO.
- [14] 2001 National Household Travel Survey, <http://nhts.ornl.gov/>.
- [15] National Renewable Energy Laboratory, Center for Transportation and Technology Systems, Transportation Secure Data Center: http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/secure_transportation_data.html.
- [16] U.S. Department of Energy, Vehicle Technologies Program, 2011 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, Energy Storage R&D, May 2011.

Authors

Eric Wood

National Renewable Energy Lab
Golden, Colorado USA
Email: eric.wood@nrel.gov



Mr. Wood is an Engineer at NREL's Center for Transportation Technologies and Systems. He holds a B.S. in Mechanical Engineering from the University of Nebraska (2009) and a M.S. in Mechanical Engineering from Colorado State University (2011).

Jeremy Neubauer

National Renewable Energy Lab
Golden, Colorado USA
Email: jeremy.neubauer@nrel.gov



Dr. Jeremy Neubauer is a Senior Engineer with NREL's Center for Transportation Technologies and Systems, where his primary responsibility lies in researching the reuse of retired automotive traction batteries and modeling the total cost of ownership of advanced vehicle types.

Prior to coming to NREL, Dr. Neubauer was Chief Engineer at ABSL Space Products, a leading manufacturer of Li-Ion batteries for the space industry. Dr. Neubauer has a Bachelors, Masters, and Doctorate in Mechanical Engineering from Washington University in St. Louis.

Aaron D. Brooker

National Renewable Energy Lab
Golden, Colorado USA
Email: aaron.brooker@nrel.gov



Mr. Brooker is a Senior Engineer at NREL. He holds a B.S. in Mechanical Engineering from Michigan Technological University (1998) and an M.S. in Mechanical Engineering from the University of Colorado (2000).

Jeffrey Gonder

National Renewable Energy Laboratory
Golden, Colorado USA
Email: jeff.gonder@nrel.gov



Mr. Gonder is a Senior Engineer at NREL's Center for Transportation Technologies and Systems. He holds a B.S. in Mechanical Engineering from the University of Colorado and an M.S. in Mechanical Engineering from Pennsylvania State University. His

research activities include both simulation and hardware testing of conventional, hybrid, plug-in and fuel cell vehicles.

Kandler A. Smith

National Renewable Energy Lab
Golden, Colorado USA
Email: kandler.smith@nrel.gov



Dr. Smith is a Senior Engineer researching energy storage systems for NREL's Center for Transportation Technologies and Systems. He holds a Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Pennsylvania State University. He is an active member of

the IEEE, the Electrochemical Society, and the Society for Automotive Engineers. His research includes electric-drive vehicles, battery electrochemical/ thermal characterization and modeling, and battery-life predictive modeling.

List of Acronyms

| | |
|---------|---|
| BEV | battery electric vehicle |
| CD | charge depleting |
| CS | charge sustaining |
| DoD | depth of discharge |
| FASTSim | Future Automotive Systems Technology Simulator |
| HEV | hybrid electric vehicle |
| IUF | individual utility factor |
| LA92 | California Air Resources Board Unified Driving Schedule |
| Li | lithium |
| NCA | nickel-cobalt-aluminum |
| NHTS | National Household Travel Survey |
| NREL | National Renewable Energy Laboratory |
| PEV | plug-in electric vehicle |
| PHEV | plug-in hybrid electric vehicle |
| TCS | Traffic Choices Study |
| TMS | thermal management system |
| TMY3 | Typical Meteorological Year Database |
| UDDS | Urban Dynamometer Driving Schedule |
| US06 | Supplemental Federal Test Procedure Driving Schedule |
| VMT | vehicle miles traveled |

Modelo matemático para estimar la producción de la energía primaria en Ecuador.



Mathematical model to estimate the production of primary energy in Ecuador.

Guido Javier Mazón Fierro.¹, Pablo Ricardo Calderón Limaico.², Ruffo Neptali Villa Uvidia.³ & Jenny Margoth Villamarín Padilla.⁴

Recibido: 10-03-2019 / Revisado: 15-03-2019 / Aceptado: 04-04-2019 / Publicado: 13-05-2019

Abstract.

DOI: <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i2.2.464>

In the present paper a series of values of primary energy production in Ecuador was estimated through the multiplicative mathematical model of time series that has as variables the trend, seasonality and noise, it was considered a time lapse of 12 years as of 2015 arriving to obtain estimated values up to the year 2027, as a first step, historical data of the national energy balance of Ecuador 2016 were taken, with these inputs as a starting point the trend was found from a linear extrapolation model, arriving to determine the behavior of the production of primary energy through the trend line: $T = 204.28 + 1.0956 * t$ where $T =$ trend, $t =$ time series, then the seasonality is analyzed which is another of the variables to be considered in the model, for this it had to adjust or soften the seasonality to reduce the noise and it was achieved with the technique of the third order moving averages, Finally, the multiplicative model with which estimated values were obtained from 2016 to 2027 was applied, it was possible to predict that for the last data of the time series the

¹ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Administración de Empresas. Riobamba, Ecuador. guido.mazon@esepoch.edu.ec

² Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Administración de Empresas. Riobamba, Ecuador. pablo.calderon@esepoch.edu.ec

³ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Administración de Empresas. Riobamba, Ecuador. ruffo.villa@esepoch.edu.ec

⁴ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Administración de Empresas. Riobamba, Ecuador. jenny.villamarin@esepoch.edu.ec

energy production is 241,832 kBEP (Kilo equivalent barrels of oil), being the highest value of registered production.

Keywords: Model, Projection, Mathematics, Energy, Predict, Production.

Resumen.

En el presente artículo se estimó una serie de valores de producción de energía primaria en Ecuador mediante el modelo matemático multiplicativo de series temporales que tiene como variables la tendencia, estacionalidad y ruido, se consideró un lapso de tiempo de 12 años a partir del 2015 llegando a obtener valores estimados hasta el año 2027, como primer paso se tomaron datos históricos del balance energético nacional de Ecuador 2016, con estos insumos como punto de partida se encontró la tendencia a partir de un modelo de extrapolación lineal, llegando a determinar el comportamiento de la producción de energía primaria a través de la línea de tendencia: $T = 204,28 + 1.0956 * t$ donde $T = \text{tendencia}$, $t = \text{serie de tiempo}$, a continuación se analiza la estacionalidad que es otro de las variables a considerar en el modelo, para esto se tuvo que ajustar o suavizar la estacionalidad para disminuir el ruido y se lo consiguió con la técnica de las medias móviles de tercer orden, se obtuvo como resultado el índice de estacionalidad corregido, finalmente se aplica el modelo multiplicativo con el cual se consiguió valores estimados desde el año 2016 hasta 2027, se pudo predecir que para el último dato de la serie temporal la producción de energía es 241.832 kBEP (Kilo barriles equivalentes de petróleo), siendo el valor más alto de producción registrado.

Palabras claves: Modelo, Proyección, Matemática, Energía, Predecir, Producción.

Introducción.

La energía es un pilar en el desarrollo de los países. (Garrido, 2009) menciona que “Uno de los principales vectores de nuestra evolución ha sido y es, sin lugar a dudas, la energía. Ésta ha hecho posible que el ser humano no solo poblara prácticamente la totalidad de la superficie del planeta, sino que se ha llegado al espacio. La energía es fuente de calor, de luz, hace posible que nos desplazemos, que cocinemos nuestros alimentos, que fabriquemos máquinas entre otras cosas”.

El modelo actual de desarrollo se sustenta, en gran medida, sobre el consumo de combustibles fósiles: petróleo, gas natural y carbón, que según el Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo representan, conjuntamente, más del 80% del suministro de energía primaria a nivel mundial, los combustibles fósiles tienen su origen en la fotosíntesis de las plantas, las cuales extraen del sol la energía necesaria para desarrollarse gracias a ella absorben dióxido de carbono de la atmósfera y se quedan con la parte que les interesa, esto es, el carbono, devolviendo el oxígeno al medio ambiente. En definitiva, se podría

considerar a las plantas como unos captadores y acumuladores de energía solar, transformando ésta en carbono. Además, la acumulación de grandes cantidades de materia orgánica en estructuras sedimentarias, sometida a altas presiones y temperaturas, tras un largo periodo de transformación del orden de millones de años, da lugar a los combustibles fósiles. Normalmente, se considera que el carbón procede de depósitos de materia orgánica vegetal terrestre, mientras que el petróleo y el gas natural proceden de depósitos de materia orgánica de origen marino, como algas, plancton. (Garrido, 2009).

Nadie puede desconocer que la energía es el motor que mueve el mundo, sin embargo, involucra problemas serios para la humanidad y el planeta, (Cano, 2014) señala que existe una estrecha relación entre desarrollo, energía y entorno ambiental, la necesidad de utilizar combustibles fósiles va acompañado por el deterioro medioambiental asociado al cambio climático, es un fenómeno que desafía a todos los modelos estadísticos de predicción energética, esto genera un reto para propiciar el incremento en la actividad científica dirigida a identificar y desarrollar fuentes primarias de energía sustentables, sostenibles y con balance energético positivo.

Es por esto que se pretende realizar un aporte en el sector energético mediante un estudio de un modelo matemático para estimar la producción de la energía primaria del Ecuador debido a la importancia de la energía en el desarrollo de cada país y sus implicaciones en el ambiente, como datos para el estudio, se cuenta con el balance energético de Ecuador del año 2016, el cual describe en detalle la matriz energética de manera global y desglosa datos históricos estadísticos anuales de la oferta de energía primaria y la demanda de energía, en kilo barriles equivalentes de petróleo (Kbep), es por ello que el objetivo de este trabajo es determinar la producción de energía primaria en Ecuador al año 2027 para contribuir a las acertadas toma de decisiones.

Metodología

Marco Teórico Referencial

Para estudiar un sistema, un modelo matemático comienza con la identificación de los aspectos principales o determinantes del sistema y los caracteriza a través de las expresiones matemáticas. La idea en la construcción es encontrar un equilibrio entre la simplicidad y una reproducción del comportamiento que permita comprender, analizar y predecir, al cambiar el valor de la o las variables que lo describen, la respuesta del sistema en su conjunto. Un modelo matemático es la representación simplificada de la realidad, mediante el uso de funciones que describen su comportamiento, o de ecuaciones que representan sus relaciones. (Bocco, 2010).

En el área energética se puede evidenciar varios casos de estudio sobre las proyecciones a mediano y largo plazo sobre la producción y la demanda de recursos energéticos, se va a citar el estudio realizado en Argentina sobre el Informe de actualización de prospectiva

energética del año 2016 desarrollada por el Área de prospectiva Energía Eléctrica de ese país, en el cual contiene análisis y reflexiones sobre la problemática de la prospectiva energética en argentina y algunas ideas de orientación para el trabajo a desarrollar por los grupos de investigación para hacer pronósticos en series de tiempo, se ha trabajado en colaboración con la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional General Pacheco y con destacados especialistas, con el propósito de asociar el trabajo de investigación con las necesidades genuinas de la sociedad, entendiendo el concepto de planeamiento energético como un conjunto de actividades específicas orientadas no a predecir el futuro sino a emitir hipótesis razonables fundadas en el análisis y el conocimiento, acciones capaces de transformar y modificar el sector energético.(Canabal & Marcel, 2009)

Otro caso de estudio es el desarrollado en México el cual lleva por título Consumo de electricidad y crecimiento económico en México análisis de series de tiempo y prospectiva en donde se considera el desarrollo de algoritmos de diagnóstico y predicción de activos en el sector energético, con la finalidad de conocer su estado real y, analizar la operatividad y vida útil de los mismos en el futuro.(Recalde, 2010)

Por serie de tiempo nos referimos a datos estadísticos que se recopilan, observan o registran en intervalos de tiempo regulares diario, semanal, semestral, anual, entre otros. Las componentes de la serie de tiempo son tres tipos básicos de variación, los cuales sobrepuestos o actuando en conjunto, contribuyen a los cambios observados en un periodo de tiempo y dan a la serie su aspecto característico. Estas tres componentes son: Tendencia, estacionalidad, y variación irregular.(Peña, 2010)

En ambos casos se realizan análisis de pronóstico a futuro, Ahora bien, qué se entiende por pronóstico y cuál es su diferenciación con proyección y perspectivas, términos que se confunde frecuentemente. Por pronóstico se entiende una afirmación sobre el futuro, la cual informa que, bajo determinadas condiciones, en un momento y lugar determinados sucederá un acontecimiento o acontecimientos con una probabilidad muy próxima a la seguridad. Por lo que todo pronóstico significa una afirmación basada en una teoría perfecta, según la moderna lógica científica. En la práctica muy raras veces puede establecerse un pronóstico en el sentido exacto del término, ya que las teorías ni son perfectas ni lo suficientemente amplias para que puedan abarcar todos los factores endógenos y exógenos. Por consiguiente, en la práctica, no se trata de definir con el término pronóstico ninguna predicción cuya certeza esté vinculada al máximo grado de probabilidad o cuyas hipótesis no tengan contenido informativo o sean meras tautologías. En la práctica, sin embargo, sería más adecuado en la mayoría de los casos hablar de proyección y no de pronóstico. Por proyección se entiende una afirmación sobre el futuro desarrollo condicionando a determinadas premisas que sólo posee una probabilidad limitada. Por consiguiente, las predicciones son, hoy por hoy, proyecciones y no

pronósticos, aunque si bien se utilizan ambos términos. Se puede distinguir las proyecciones de puntos y las de intervalos. El término perspectivas se utiliza más en casos de previsiones a largo plazo, basándose en magnitudes futuras y no en meras extrapolaciones tendenciales. (Martínez et al., 2012)

Marco Metodológico

En el presente trabajo se va a utilizar un modelo matemático para obtener una proyección o estimación a futuro de la energía primaria en Ecuador, en base a lo mencionado se considera como punto de partida el balance energético nacional del Ecuador año 2016, el cual cuenta con datos históricos de la producción primaria de energía, los mismos que son la base para poder hacer la predicción en el futuro, en el modelo se han considerado dos parámetros como son la tendencia y la estacionalidad, para obtener una confiable proyección de la variable a analizar se utilizó el modelo de secuencia temporal.

Como primer paso se representan los datos años y producción primaria de energía mediante un gráfico de líneas Gráfico 1, en el cual se describe la relación que ha sucedido en pasados años con los datos, después de este paso se utiliza un modelo de extrapolación lineal para obtener una línea de tendencia de los datos esto para proyectar patrones establecidos del pasado hacia el futuro.

Una vez obtenida la línea de tendencia, esta servirá para proyectar o extrapolar la variable producción de energía primaria, se necesita utilizar una serie de tiempo en años para predecir los valores con un modelo de extrapolación lineal.

A continuación, para que el modelo brinde un nivel de confianza y se pueda aceptar su predicción se va a ajustar el modelo a partir de dos componentes tendencia y estacionalidad se analizan los datos históricos a ver si responden a un modelo aditivo o un modelo multiplicativo para esto se calcula la serie de diferencias y de cocientes consecutivos con estos dos conjuntos de datos se procede a encontrar su desviación estándar y la media, la relación entre estas dos medidas estadísticas permiten encontrar el coeficiente de variación (CV), siendo el discriminante para determinar a qué modelo obedecen los datos de producción de energía primaria, como el resultado de CV es menor en la serie de cocientes consecutivos se establece que el modelo multiplicativo es el idóneo para ser utilizado.

$$\text{Modelo multiplicativo: } Y = T * E * R \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

Y = Datos originales

T = Tendencia

E = Estacionalidad

R = Ruido

De la ecuación 1 se despeja el producto estacionalidad y ruido obteniendo:

$$E * R = \frac{Y}{T} \quad \text{Ecuación 2}$$

Como se puede apreciar la estacionalidad se encuentra interferida por el ruido para aislar y disipar la variable ruido y obtener un modelo óptimo, se utilizó las medias móviles de orden tres, para hallar un índice de estacionalidad con el menor ruido posible se dividió la estacionalidad con ruido por las medias móviles y se multiplico por cien.

$$I_{est} = \frac{E * R}{Mm3} * 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

I_{est} = Índice de Estacionalidad

*E * R* = Estacionalidad con ruido

Mm3 = Medias móviles de grado 3

Se prosigue con la sumatoria de *I_{est}* este valor tiene que ser igual a 1200 puesto que tenemos 12 datos originales y estamos utilizando un índice de estacionalidad, como el resultado excede al esperado se lo corrigió mediante la siguiente razón:

$$IEC = \frac{I_{est}}{\sum_{i=1}^{n=12} I_{est}} * 1200 \quad \text{Ecuación 4}$$

Finalmente se hace uso del modelo matemático multiplicativo para la estimación o predicción de la energía primaria a partir de las componentes de tendencia y estacionalidad:

$$Y_E = \frac{T * IEC}{100} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

Y_E = Valores estimados

T = Tendencia

IEC = Índice de Estacionalidad Corregido

Estos valores estimados se los calcula para 12 años que es considerado como plazo de tiempo medio, como se poseen datos originales del año 2004 al 2015 se extrapola el mismo número de datos originales empleando la ecuación 5, mediante este procedimiento que se obtienen valores futuros de la producción de energía primaria en Ecuador hasta el año 2027.

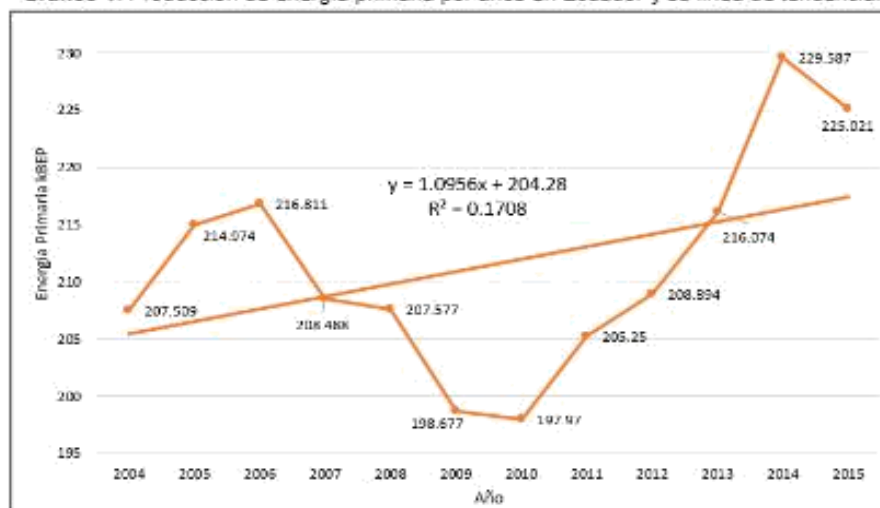
Análisis de los Resultados.

Tabla 1. Producción de energía primaria por años en Ecuador.

| Año | Producción Energía Primaria en kBEP (Kilo barriles equivalentes de petróleo) |
|------|--|
| 2004 | 207.509 |
| 2005 | 214.974 |
| 2006 | 216.811 |
| 2007 | 208.488 |
| 2008 | 207.577 |
| 2009 | 198.677 |
| 2010 | 197.970 |
| 2011 | 205.250 |
| 2012 | 208.894 |
| 2013 | 216.074 |
| 2014 | 229.587 |
| 2015 | 225.021 |

Fuente: Balance energético nacional del Ecuador año 2016.

Gráfico 1. Producción de energía primaria por años en Ecuador y su línea de tendencia.



Fuente: Elaboración propia tomado datos del balance energético nacional del Ecuador año 2016.

Con los datos de la Tabla 1 se aplica un modelo de extrapolación lineal para obtener una línea de tendencia: $T = 204,28 + 1.0956 * t$ Ecuación 6

Donde:

$T =$ Tendencia

$t =$ Serie de tiempo

Tabla 2. Tendencia de la producción de energía primaria por años en Ecuador.

| Año | Tiempo t | Tendencia $T = 204,28 + 1,0956 * t$ |
|------|------------|-------------------------------------|
| 2004 | 01 | 205.3756 |
| 2005 | 02 | 206.4712 |
| 2006 | 03 | 207.5668 |
| 2007 | 04 | 208.6624 |
| 2008 | 05 | 209.7580 |
| 2009 | 06 | 210.8536 |
| 2010 | 07 | 211.9492 |
| 2011 | 08 | 213.0448 |
| 2012 | 09 | 214.1404 |
| 2013 | 10 | 215.2360 |
| 2014 | 11 | 216.3316 |
| 2015 | 12 | 217.4272 |

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de datos históricos mediante la serie de diferencias y de cocientes consecutivos nos arroja los siguientes resultados.

Tabla 3. Serie de diferencias y de cocientes consecutivos.

| Año | Producción Energía Primaria kBEP | Serie diferencias consecutivas | Serie cocientes consecutivos |
|------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 2004 | 207.509 | 7.465 | 1.03597 |
| 2005 | 214.974 | 1.837 | 1.00855 |
| 2006 | 216.811 | -8.323 | 0.96161 |
| 2007 | 208.488 | -0.911 | 0.99563 |
| 2008 | 207.577 | -8.900 | 0.95712 |
| 2009 | 198.677 | -0.707 | 0.99644 |
| 2010 | 197.970 | 7.280 | 1.03677 |
| 2011 | 205.250 | 3.644 | 1.01775 |
| 2012 | 208.894 | 7.180 | 1.03437 |
| 2013 | 216.074 | 13.513 | 1.06254 |
| 2014 | 229.587 | -4.566 | 0.98011 |
| 2015 | 225.021 | | |
| | Media | 1.59200 | 1.00790 |
| | Desviación estándar sd | 6.75757 | 0.03188 |
| | Coefficiente de variación CV | 4.24471 | 0.03163 |

Fuente: Balance energético nacional del Ecuador año 2016.

El coeficiente de variación (CV), determina a qué modelo obedecen los datos de producción de energía primaria: *CV Serie de cocientes* < *CV Serie de diferencias*

$$0.03163 < 4.24471$$

como el resultado de CV es menor en la serie de cocientes consecutivos se establece que el modelo multiplicativo es el idóneo para ser utilizado.

Posteriormente en la Tabla 4 se presentan valores de estacionalidad con ruido o fluctuaciones.

Tabla 4. Estacionalidad con ruido.

| Año | Producción Energía Primaria kBEP Y | Tendencia T | Estacionalidad con Ruido $E * R = \frac{Y}{T}$ |
|------|---|----------------|--|
| 2004 | 207.509 | 205.3756 | 1.010388 |
| 2005 | 214.974 | 206.4712 | 1.041182 |
| 2006 | 216.811 | 207.5668 | 1.044536 |
| 2007 | 208.488 | 208.6624 | 0.999164 |
| 2008 | 207.577 | 209.7580 | 0.989602 |
| 2009 | 198.677 | 210.8536 | 0.942251 |
| 2010 | 197.970 | 211.9492 | 0.934045 |
| 2011 | 205.250 | 213.0448 | 0.963412 |
| 2012 | 208.894 | 214.1404 | 0.975500 |
| 2013 | 216.074 | 215.2360 | 1.003893 |
| 2014 | 229.587 | 216.3316 | 1.061274 |
| 2015 | 225.021 | 217.4272 | 1.034926 |

Fuente: Balance energético nacional del Ecuador año 2016.

Para ajustar o modelizar la Estacionalidad y disipar el ruido se calcula el Índice de estacionalidad corregido cuyas soluciones se indican en la siguiente tabla:

Tabla 5. Índice de estacionalidad corregido.

| Año | Estacionalidad con Ruido $E * R = \frac{Y}{T}$ | Medias Móviles de grado 3 Mm3 | Índice de estacionalidad $I_{est} = \frac{E * R}{Mm3} * 100$ | Índice de estacionalidad corregido IEC |
|------|--|---|--|---|
| 2004 | 1.010388 | | 99.929478 | 99.340571 |
| 2005 | 1.041182 | 1.032035 | 100.886250 | 100.291704 |
| 2006 | 1.044536 | 1.028294 | 101.579520 | 100.980888 |
| 2007 | 0.999164 | 1.011101 | 98.819441 | 98.237075 |
| 2008 | 0.989602 | 0.977006 | 101.289296 | 100.692374 |
| 2009 | 0.942251 | 0.955299 | 98.634110 | 98.052836 |
| 2010 | 0.934045 | 0.946569 | 98.676830 | 98.095304 |
| 2011 | 0.963412 | 0.957652 | 100.601472 | 100.008604 |

| | | | | |
|------|----------|------------------|------------------|-------------|
| 2012 | 0.975500 | 0.980935 | 99.445923 | 98.859865 |
| 2013 | 1.003893 | 1.013556 | 99.046692 | 98.462987 |
| 2014 | 1.061274 | 1.033364 | 102.700821 | 102.095581 |
| 2015 | 1.034926 | | 105.503970 | 104.882211 |
| | | Sumatoria | 1207.1138 | 1200 |

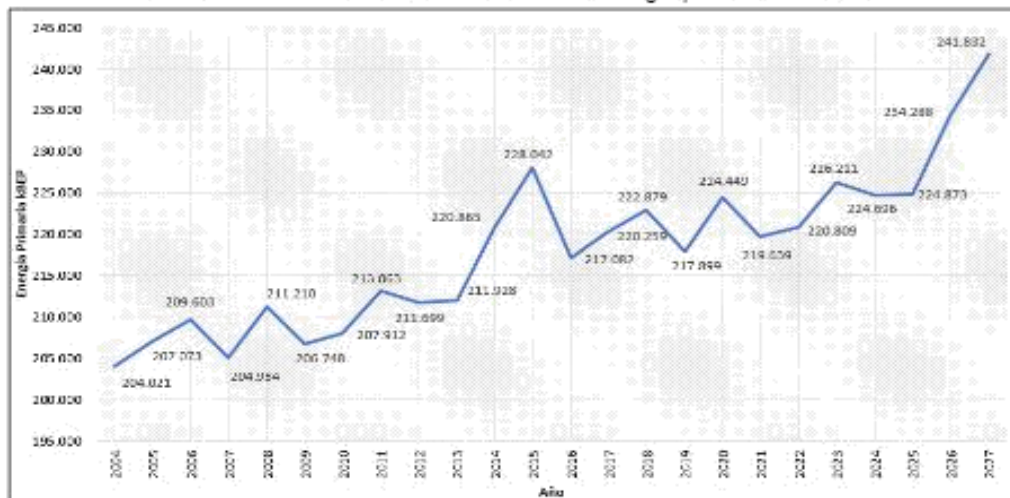
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Estimación de la producción de la energía primaria en Ecuador.

| Año | Tiempo t | Tendencia T | Índice de estacionalidad corregido IEC | Valores Estimados Y_E |
|------------|------------------------------|---------------------------------|--|---|
| 2004 | 1 | 205.3756 | 99.340571 | 204.021 |
| 2005 | 2 | 206.4712 | 100.291704 | 207.073 |
| 2006 | 3 | 207.5668 | 100.980888 | 209.603 |
| 2007 | 4 | 208.6624 | 98.237075 | 204.984 |
| 2008 | 5 | 209.758 | 100.692374 | 211.210 |
| 2009 | 6 | 210.8536 | 98.052836 | 206.748 |
| 2010 | 7 | 211.9492 | 98.095304 | 207.912 |
| 2011 | 8 | 213.0448 | 100.008604 | 213.063 |
| 2012 | 9 | 214.1404 | 98.859865 | 211.699 |
| 2013 | 10 | 215.236 | 98.462987 | 211.928 |
| 2014 | 11 | 216.3316 | 102.095581 | 220.865 |
| 2015 | 12 | 217.4272 | 104.882211 | 228.042 |
| 2016 | 13 | 218.5228 | 99.340571 | 217.082 |
| 2017 | 14 | 219.6184 | 100.291704 | 220.259 |
| 2018 | 15 | 220.714 | 100.980888 | 222.879 |
| 2019 | 16 | 221.8096 | 98.237075 | 217.899 |
| 2020 | 17 | 222.9052 | 100.692374 | 224.449 |
| 2021 | 18 | 224.0008 | 98.052836 | 219.639 |
| 2022 | 19 | 225.0964 | 98.095304 | 220.809 |
| 2023 | 20 | 226.192 | 100.008604 | 226.211 |
| 2024 | 21 | 227.2876 | 98.859865 | 224.696 |
| 2025 | 22 | 228.3832 | 98.462987 | 224.873 |
| 2026 | 23 | 229.4788 | 102.095581 | 234.288 |
| 2027 | 24 | 230.5744 | 104.882211 | 241.832 |

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 2. Valores estimados de Producción de energía primaria en Ecuador.



Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones.

- Se ha estimado mediante un modelo matemático multiplicativo una serie de valores de la producción de energía primaria en Ecuador a mediano plazo en 12 años, se puede predecir que para el año 2027 aumentara la producción de energía a 241.832 kBEP (Kilo barriles equivalentes de petróleo), siendo el valor más alto de producción que se tiene que generar para llegar a este requerimiento, esto anuncia que se debe desarrollar otras fuentes de energía posiblemente renovables para cubrir los kBEP que se necesitan a mediano plazo.
- El modelo matemático para la naturaleza de los datos que se analizaron se comprobó que cumple con un modelo multiplicativo y se lo considera como confiable debido a que relaciona la tendencia, estacionalidad y el ruido, que son los factores de mayor influencia en una serie temporal, aplicando un modelo de extrapolación lineal se estudió la tendencia llegando a determinar mediante los datos históricos que la $T = tendencia$ es igual a $T = 204,28 + 1.0956 * t$, sabiendo que $t = serie\ de\ tiempo$
- Mediante medias móviles de grado tres se ha realizado el suavizado o ajuste o los parámetros de estacionalidad y ruido para que la estimación sea aceptada y los valores calculados se los considere dentro del margen de tolerancia, es por eso que se tiene en el modelo encontrado el índice de estacionalidad corregido IEC .

Referencias bibliográficas.

- Bocco, M. (2010). *Funciones elementales para construir modelos matemáticos*. 217.
- Canabal, C., & Marcel, A. (2009). Energía y cambio climático. Recuperado 4 de mayo de 2019, de Cerlalc website: <https://cerlalc.org/rilvi/energia-y-cambio-climatico/>
- Cano, J. E. S. (2014). *Gobernanza estratégica para el cambio de la matriz productiva y energética del caso del Ecuador*. 20.
- Cortés, E. A., & Villamizar, G. O. (2000). *Apuntes sobre energía y recursos energéticos*. UNAB.
- ECONOMÍA, C. D. (2015). *FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS*. 84.
- Garrido, A. A. (2009). *La energía como elemento esencial de desarrollo*. 61.
- Gras, J. A. (2001). *Diseños de series temporales: técnicas de análisis*. Edicions Universitat Barcelona.
- Henley, E. J. (1973). *Cálculo de balances de materia y energía: métodos manuales y empleo de máquinas calculadoras*. Reverte.
- Lazo, L. (s. f.). *MODELOS MATEMATICOS*. Recuperado de https://www.academia.edu/7309281/MODELOS_MATEMATICOS
- López, J. C. C. (2006). *Problemas y modelos matemáticos para la administración y dirección de empresas*. Editorial de la UPV.
- Martínez, C. D. la F., Machín, M. C., Ruiz, J. L. G., Martínez, P. J., Rincón, T. O. D., Muñiz, T. J. R., ... López, M. J. G. (2012). *Construcción de modelos matemáticos y resolución de problemas*. Ministerio de Educación.
- Navarro, F. S. (2011). *El reto energético: Gestionando el legado de Prometeo*. Universitat de València.
- Peña, D. (2010). *Análisis de series temporales*. Alianza Editorial.

A2: HIBRIDACIÓN / ELECTRIFICACIÓN DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN DE LOS VEHÍCULOS Y GESTIÓN DE LA ENERGÍA

1. Descripción

Las tendencias actuales en el suministro y uso de la energía son económica y medioambientalmente insostenibles. Sin acciones decisivas, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se duplicarán hacia el 2050 y el incremento en la demanda del combustible amenazaré la seguridad en su suministro. Las tecnologías de energía con bajo o nulo contenido en carbono son las que tendrán que jugar un papel relevante si se quiere hacer un cambio radical para frenar dicha tendencia. Existe una fuerte convicción para acometer acciones concretas y giros en los estamentos políticos para apoyarlas. Para canalizar estos retos, la Agencia Internacional de la Energía (IEA – International Energy Agency), está desarrollando hojas de ruta para algunos de las tecnologías más importantes necesarias para que en el 2050 las emisiones de CO₂ sean un 50% menor que las actuales. Un vehículo híbrido eléctrico (VEH) es una combinación de un sistema de propulsión convencional y un sistema de propulsión eléctrico, incluyendo el sistema de almacenamiento de energía eléctrica. Dependiendo del grado de electrificación, estos vehículos se clasifican en varios subgrupos: microhíbridos, híbridos medio, híbridos completos, enchufables (VEHE) y eléctricos de rango extendido (VERE). Los VEH y los vehículos puramente eléctricos (VE) disponen de conducción parcial o totalmente eléctrica a través de motores eléctricos alimentados por dispositivos de almacenamiento de energía a bordo. El más extendido de estos dispositivos son las baterías, aunque en la actualidad se empiezan a introducir los supercondensadores y los volantes de inercia. El éxito comercial de estos vehículos, con su potencial de reducir las emisiones de GEI, vendrá determinado, principalmente, por el desarrollo tecnológico de las baterías, y en concreto, en lo referente a la densidad de energía, la densidad de potencia, la duración, el coste y la seguridad.

2. Soluciones existentes

Después de un relativo arranque lento en los últimos años, la producción y previsión de los nuevos VE, VEH, VEHE y VERE está acelerándose en todo el mundo. El incremento en la actividad está teniendo lugar con la introducción de nuevos modelos de vehículos en el rango desde los más pequeños hasta los de gama alta. La actividad

también está aumentando en las áreas de las baterías con una mayor densidad de energía y alta capacidad de descarga, trenes de potencia con motores eléctricos de mayor densidad de potencia y rendimiento y en las infraestructuras de recarga.

3. Temas a desarrollar

- **Sistemas de almacenamiento de energía.**

Recientemente la tecnología de las baterías ha supuesto un avance importante, pero todavía el coste, peso, seguridad, duración y mantenimiento son temas a desarrollar de forma significativa. Las baterías basadas en el litio están ofreciendo un gran potencial, pero algunos tipos de celdas necesitan mayores niveles de seguridad. Los esfuerzos de I+D se están centrando en la actualidad en las baterías de Li-ión, que se supone serán las que se implanten en un futuro en las siguientes generaciones de VEH y VE. En general, debe considerarse que la selección del adecuado tipo de celda, de modulo y de string, así como de la refrigeración, depende de la aplicación dada. Un sistema prometedor es la hibridación baterías-ultracondensadores. La energía específica y la potencia específica se pueden desacoplar, así se puede optimizar el diseño de la batería para energía específica y ciclos de vida, no prestando mucha atención a la potencia específica. Debido al efecto de carga del ultracondensador, la descarga rápida de la batería y la carga rápida en frenada regenerativa se minimizan, así la energía disponible y vida se incrementan significativamente.

- **Máquinas eléctricas y electrónica de potencia**

Algunos de los temas a desarrollar en las máquinas eléctricas son una alta relación par/inercia, que permita buenas aceleraciones, elevada densidad de par y de potencia, alto par en el arranque y en pendiente y alta potencia en autopista, amplio rango de velocidades, con potencia constante alrededor de 3 o 4 veces la velocidad base siendo un buen compromiso entre el requerimiento de pico de par de la máquina y el valor nominal de tensión-intensidad del inversor, alto rendimiento en un amplio rango de velocidades y de par, incluso a bajos pares, bajo ruido, mantenimiento, coste y bajas emisiones electromagnéticas.

- **Reducción de coste y aumento de densidad de potencia**
- **Entrada del 3er voltaje en el vehículo: 48V**

Desarrollo de baterías de 48 V. Cada vez se le va a dar más protagonismo a la electricidad que se genera a bordo aprovechando la energía procedente de la frenada regenerativa y en las retenciones y que se puede almacenar en las baterías y aprovecharla para consumir en la aceleración sin sobrecargar el motor térmico (microhíbridos).

- **Gestión térmica y sistemas de gestión de baterías (BMS)**

Desarrollo de metodologías de diseño e integración de sistemas de gestión térmica basados en herramientas de modelación virtual multinivel. Desarrollo e implementación de modelos matemáticos avanzados y eficientes que describen el comportamiento térmico de baterías de litio-ion y su sistema de gestión térmica asociada.

- **Desarrollo de controladores con sus estrategias de control**

- **Optimización de auxiliares**

El accionamiento de los auxiliares con motores eléctricos tiene bastantes ventajas. Los dispositivos auxiliares pueden colocarse en cualquier lugar ya que no requieren la proximidad a la correa o engranaje de la transmisión del motor térmico, consiguiendo arquitecturas de vehículo más flexibles y mejorando el acceso para el servicio de mantenimiento. El funcionamiento del dispositivo auxiliar es, también, independiente de régimen del motor, por lo que permite variar la velocidad, controlar su potencia y mejorar su fiabilidad. Por otra parte, y muy importante, es la descarga de potencia del motor térmico, reduciendo así, el consumo de combustible y las emisiones contaminantes. Para impulsar eléctricamente estos auxiliares, el alternador convencional debe ser sustituido por otro de mayor potencia y rendimiento, que también pueda proporcionar potencia a otros elementos del vehículo.

- **"Energy harvesting"**

- **Soluciones integradas para optimizar la eficiencia energética del vehículo**

- **Integración del vehículo y la red energética en entornos urbanos y áreas industriales**

Investigación del comportamiento de los VEH y VE sobre la infraestructura eléctrica local y su impacto en el conjunto del sistema eléctrico, funcionando como consumidor y almacenador de energía. Modelado y estudios de penetración y estabilidad eléctrica e impacto sobre la red actual. Optimización de la carga de los

VEH y VE mediante el uso de energías renovables. Mejora de la estabilidad del sistema eléctrico con gran penetración de renovables usando la flexibilidad de la carga del VEH y VE. Gestión estratégica de la oferta y demanda energética, conocimiento de la localización del VE, control del transporte, la distribución y la carga. Modelado y planificación del flujo de energía sobre VEH y VE.

4. Impacto esperado

El desarrollo tecnológico tanto en el entorno de motores, como de combustibles, y de la infraestructura necesaria para facilitar al consumidor la utilización de los sistemas de propulsión y combustibles alternativos, tiene que permitir a la industria española que desarrolle su actividad en estos sectores para facilitar su penetración en el mercado y desarrollar una serie de conocimientos alrededor de los productos y los procesos productivos. Los factores que podrían facilitar su implementación son:

- Establecer unos objetivos ambiciosos, bien planificados y basados en la neutralidad tecnológica que podrían conducir a resultados positivos relacionados con nuevas oportunidades de empleo, nuevos avances tecnológicos, resultados y retorno de las inversiones en investigación y desarrollo, aumento de los ingresos para los estados miembros y liderazgo tecnológico europeo continuado
- Las tecnologías híbridas pueden ofrecer importantes oportunidades para resolver cuestiones relacionadas con la contaminación del aire en las zonas densamente pobladas, mientras que en el transporte de larga distancia (de viajeros y mercancías) las emisiones pueden reducirse mediante tecnologías de combustión interna de alta eficiencia, en las que la UE goza de una ventaja competitiva.
- Amplio desarrollo de infraestructuras de combustibles alternativos de acuerdo con los objetivos marcados por la Unión Europea, y según lo acordado por los Estados miembros, potenciando el uso de la infraestructura existente, en lugar de acometer importantes inversiones en infraestructuras paralelas nuevas.
- Los consumidores apoyarán el desarrollo del mercado si no hay un incremento del coste o si experimentan un valor añadido en el transporte a través de una infraestructura europea adecuada.

5. Programa/Instrumentos de financiación

- Europeos:

- H2020-GV
 - H2020-MG
 - H2020-LC-BAT
- <http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/index.html>

- Nacionales:

- INNOGLOBAL 2018:
<https://www.cdti.es/index.asp?MP=4&MS=0&MN=1&textobuscado=innoglobal&tipo=1&TR=A&IDR=38&tipoO=Contenido&id=2687&xtmc=innoglobal&xtcr=4>
- CIEN 2018:
<https://www.cdti.es/index.asp?MP=100&MS=803&MN=2>
- EUREKA 2018:
http://www.cdti.es/index.asp?MP=4&MS=0&MN=1&TR=C&IDR=2249&r=1920*1080
- CLIMA 2018:
https://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/proyectos-clima/convocatorias-proyectos-seleccionados/Convocatoria_FES_CO2_2018.aspx

6. Proyectos relacionados

3CCAR

Integrated Components for Complexity Control in affordable electrified cars
Presupuesto: 53,764,943 EUR
Duración: 01/2015 – 12/2018
Programa: ECSEL-01-2014 ECSEL Key Applications and Essential Technologies (RIA)

Descripción y objetivos

El proyecto 3Ccar desarrollará componentes altamente integrados de ECS (sistemas de control embebidos) para el Control Complejo de coches electrificados. Los nuevos semiconductores para el Control Complejo ofrecerán un nivel superior de eficiencia energética en los sistemas de transporte.

Participantes:

Tecnalia, Infineon Technologies AG, Ixion Industry & Aerospace, AVL, Siemens, Valeo, Daimler, etc.

Resultados obtenidos: alta

Descripción y objetivos:

El objetivo principal del presente Proyecto es la obtención de un prototipo demostrador de vehículo de transporte operativo militar de tracción puramente eléctrica y con rango extendido.

ATHEMTO

Aplicación de tecnología de tracción híbrida/eléctrica serie a un vehículo militar de transporte operativo

Presupuesto: 545.883 €
Duración: 7/2015 - 10/2017
Programa: COINCIDENTE. Ministerio de Defensa

ATLANPYCAT

Presupuesto: 400.000 €
Duración: 2016-2019
Programa: Poctefa
<https://www.poctefa.eu/>

Batteries 2020

Batteries 2020: Towards realistic European competitive Automotive batteries
Presupuesto: 8,398,727 €
Duración: 09/2013 - 08/2016
Programa: FP7-GC-Materials
www.batteries2020.eu

BETRACTION

Desarrollo de propulsión eléctrica para transporte de personas en entornos urbanos
Presupuesto: 5 M €
Duración: 1/2014 - 12/2015
Programa: Gobierno Vasco - ETORGAI

BIO-FT-LNG

Co-Production of FT liquids from biomass
Presupuesto: 6 M €
Duración: 6/2016 - 6/2020
Programa: Horizon 2020

CENIT ecoTRANS

Integración del vector hidrógeno y las pilas de combustible en el sector ferroviario
Presupuesto: 23.828.279 €
Duración: 01/2008 - 12/2011
Programa: CENIT (CDTI)

Participantes:

INSIA, UROVESA

Resultados obtenidos:

Proyecto en desarrollo.

Descripción y objetivos:

Desarrollo de sistemas electrolizadores basados en catalizadores a temperatura ambiente.

Participantes:

Consortio de empresas Francesas y españolas

Resultados obtenidos: proyecto en desarrollo.

Descripción y objetivos:

Son dos los objetivos del proyecto. Por un lado garantizar la durabilidad de las baterías, para ello se está trabajando en los modelos de degradación, y con el fin de minimizar y garantizar una metodología más eficiente se está extrapolando estos modelos a distintas celdas. Por otro lado el objetivo también se reducir el precio de las baterías mediante baterías de segunda vida. Es decir, reducir el coste mediante la reutilización de las baterías.

Participantes:

Umicore, Leclanche, CRF, Abengoa, Ikerlan, ISEA-RWTH, VuB

Resultados obtenidos:

Modelos de degradación y metodología para garantizar la segunda vida. Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:

Desarrollo de electrónica de potencia para los sistemas auxiliares del autobús urbano 100% eléctrico, desarrollo de máquinas eléctricas de tracción.

Participantes:

IRIZAR, JEMA Energy S.A., CEIT-IK4, ALCONZA, DATIK, Tecnalia

Resultados obtenidos:

Diseño, implementación y puesta en marcha en autobuses urbanos 100% eléctricos de sistemas TRL7-8 para la electrónica de potencia asociada a los sistemas auxiliares y al motor de tracción. Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:

Desarrollo de una planta piloto de co-producción de alta eficiencia de Biocombustibles líquidos y gaseosos a partir de biomasa lignocelulósica mediante un proceso FT.

Participantes:

ECN, Sintef Energi AS, Ibercat SL, Osomo, Dahlman

Resultados obtenidos:

Proyecto en desarrollo.

Descripción y objetivos:

Analizar la viabilidad de las tecnologías del hidrógeno en el sector ferroviario, enfocado, principalmente, a trenes ligeros

Participantes:

Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles (CAF), S.A. New Technologies, Castrosúa, Ariño, Acumene, Tram, ADIF, Elyt Energy, GreenPower, HISPACOLD, HYNERGREEN, METRO de MADRID, IDOM, LETAG Y ARIÑO, Trainelec, Traintic, CIDAUT

Resultados obtenidos:

Dimensionado de plantas de potencia ferroviarias aplicadas a distintos trayectos y tipo de tren. Proyecto finalizado.

Cityelec

Electric-Vehicle Control of individual wheel Torque for On- and Off-Road Conditions

Presupuesto: 3.988.014,60 €

Duración: 01/08/2009 - 31/12/2010

Programa: Proyecto Singular Estratégico financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación en el marco del Programa Nacional de Colaboración Público-Privada del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011
<http://www.cityelec.es/>

Descripción y objetivos:

El principal reto del proyecto es la definición de un sistema adecuado para satisfacer las necesidades de transporte urbano actuales y futuras, permitiendo la movilidad personal con una huella de carbono mínima, mediante el desarrollo de una flota de vehículos eléctricos ligeros, el desarrollo de elementos de infraestructura y nuevos conceptos para la gestión de energía eléctrica de fuentes renovables en la red.

Participantes:

Automatismos Masser, Ayuntamiento Donostia, Ayuntamiento Zaragoza, Compañía del , rnvía de San Sebastián, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Ente Vasco de la Energía, Exide Technologies, Fundación AITIIP, Fundación Cidaut, Hidroeléctrica del Cantábrico, Infranor Spain, INTA, Integral Park System, Lear Corporation, Luma Industrias, Ormazabal Corporate Technology, Relvaj, Rücker Lypsa, Saft Baterías, Sernauto, Temper, Ugo, Equipos de Transmisión, Unión Fenosa Distribución, Universidad de Extremadura, Universidad del País Vasco, Universitat Politècnica de Caralunya, Usyscom, Valeo Térmico, Zytel Automotive.

Resultados obtenidos:

Identificación de la tecnología más adecuada para la implementación de la movilidad eléctrica en el entorno urbano. Desarrollo de infraestructura eléctrica y vial específicamente diseñada para cubrir los requerimientos de la movilidad eléctrica urbana. Integración de fuentes de energía renovables en el suministro de electricidad en entorno urbano. Proyecto finalizado.

COOPERAUTOS

Plataforma de comunicaciones infraestructura-vehículo para Servicios Cooperativos y de Conducción Semi-automatizada en Entornos de Ciudades Inteligentes

Presupuesto: 1,56 M €

Duración: 04/2013 - 12/2014

Programa: Feder Innterconecta 2012 - CDTI

Descripción y objetivos: Desarrollo de una plataforma integral de comunicación cooperativa infraestructura-vehículo que permitiese integrar nuevos servicios cooperativos y de conducción semi-automatizada en entornos de ciudades inteligentes para una movilidad mucho más segura, eficiente y sostenible, incluida la movilidad eléctrica.

Participantes:

ESYCSA (España), AUTELEC (España), Rodríguez López Auto (España), Little Cars (España), Vitrasa (España) y CTAG (España)

Resultados obtenidos:

Plataforma de comunicación integral compuesta por unidad de comunicación embarcada, infraestructuras dotadas de comunicación cooperativa (semáforos, puestos de recarga y zonas de aparcamiento), centros de gestión de movilidad y gestión de flotas y aplicaciones cooperativas (entre otras, aplicaciones cooperativas para recarga de vehículos eléctricos). Proyecto finalizado.

Desarrollo de sistemas de almacenamiento basado en tecnología de Litio Ion para aplicaciones de transporte

Presupuesto:

Duración:

Presupuesto: Financiación privada

Diseño y construcción de un prototipo de pila de combustible PEM para aplicación vehicular

Presupuesto: (fondos propios)

Duración: 2015 – 2016

**ECOCHAMPS
European Competitiveness in
Commercial Hybrid and Automotive
Powertrains**

Presupuesto:

Duración: 05/2015 – 05/2018

Programa: H2020-GV-2014

<http://www.ecochamps.eu/>

**ECUB
ALMACENAMIENTO EFICIENTE DE
ENERGÍA**

Presupuesto: 265.000 €

Descripción y objetivos:

IK4-CIDETEC participa en diversos proyectos privados de desarrollo de battery packs para aplicación de transporte. Típicamente el proceso parte de la selección del tipo y proveedor de celda, y siguen con una caracterización eléctrico-térmica exhaustiva.

En base a esa información se diseña el módulo y pack, incluyendo los necesarios elementos de control y estimación de SOC, SOH, así como soluciones constructivas y de refrigeración.

Participantes:

IK4-CIDETEC, Clientes Industriales

Resultados obtenidos: proyecto en desarrollo.

Descripción y objetivos:

Se trabaja en el diseño y construcción de una pila PEM de baja temperatura, de cuyo diseño (electroquímico y mecánico) y construcción se encarga EPHISA, contando además con la posible colaboración de laboratorios, centros y grupos de investigación de cara a la resolución de cuestiones o tareas técnicas que escapen del alcance de nuestra ingeniería. En lo referido al resto de subsistemas que conforman el sistema completo de la pila, se han formalizado contratos específicos con Centros de Investigación (INSIA, CEI) para su desarrollo.

Participantes: EPHISA, INSIA-UPM (Instituto Universitario de Investigación del Automóvil), CEI-UPM (Centro de Electrónica Industrial)

Resultados obtenidos:

Se ha diseñado y construido una pila de combustible tipo PEM de 200W que consta de 26 celdas y refrigeración por aire. Dicha pila se ha caracterizado en bancos de pruebas externos para la obtención de sus curvas de polarización y potencia. Así mismo, para analizar su comportamiento bajo carga se han hecho ensayos con diferentes dispositivos electro-electrónicos. Finalmente, se está analizando la posibilidad de instalarla en una aplicación móvil, aunque se está barajando la posibilidad de mejorarla técnica y económicamente con otro diseño de placa bipolar del que se espera un rendimiento mucho mayor.

Descripción y objetivos:

El objetivo es obtener powertrains (sistemas de propulsión) eficientes, compactos, robustos de bajo peso y coste, para turismos y vehículos comerciales (autobuses, camiones de servicios medianos y pesados) con mayor funcionalidad, mejor rendimiento, confort, seguridad y emisiones por debajo de Euro6 o VI, todo probado bajo condiciones de conducción real.

Participantes:

Tecnalia, DAF, CRF, Daimler, Iveco, Man, Renault, Bosch, GKN, ZF, AVL, etc.

Resultados obtenidos: proyecto en desarrollo.

Descripción y objetivos:

Desarrollo de supercapacidades y sistema de gestión electrónica de la supercapacidad.

Participantes:

Duración: 2014 - 2017
Programa: Nuclis de la Innovació
<http://accio.gencat.cat/cat/>

ELVA
Advanced Electric Vehicle Architectures
Presupuesto: 2,9 M €
Duración: 12/2010-05/2013
Programa: FP7
www.elva-project.eu

Idiada y FAE
Resultados obtenidos:
 Módulo de supercapacidad de 100f/g 1000W. Proyecto en desarrollo.

Descripción y objetivos:
 Aplicar opciones tecnológicas y expectativas de cliente para desarrollar la tercera generación de vehículos eléctricos. Desarrollo de conceptos innovadores de vehículo para explotar plenamente las libertades y alternativas de diseño y arquitectura de línea motriz, derivadas de la propulsión eléctrica. Estudio del impacto de las diferentes soluciones en la funcionalidad, autonomía, peso...

Participantes:
 Continental Automotive, Centro Recherche Fiat, IDIADA, Renault, Chalmers Tekniska Hoegskola, Volkswagen.

- Resultados obtenidos:**
- Identificación de las expectativas de cliente para vehículo eléctrico.
 - Identificación de las mejores tecnologías a aplicar.
 - Desarrollo de 3 concept cars a nivel de diseño virtual de detalle.
 - Determinación de necesidades futuras de desarrollo.
 - Creación de guía de recomendaciones para diseño de conceptos innovadores
 - Desarrollo de una herramienta de estimación de volúmenes para Package a partir de requerimientos de prestaciones del vehículo como autonomía o aceleración.

Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:
 El proyecto contribuye al desarrollo de una economía sostenible mediante la generación de conocimiento en el área de la eficiencia energética en máquinas y vehículos eléctricos. Para ello se desarrollarán 14 proyectos de tesis en torno a la temática central del proyecto la eficiencia energética.

Participantes:
 KULeuven (Coordinador), UniUD, USP, TUB, FhG, FMTC, CNR-ITIA, IKERLAN, AIT, LMS, BMW, 3T.

Participantes a modo de observación: ORONA, GDM, MU, TUD, ITA, PolIMI, CLEPA,

Resultados obtenidos:
 Al finalizar el proyecto se habrán desarrollado 14 trabajos de tesis en torno a varias áreas con una temática común la eficiencia energética. Las áreas de trabajo son:

- Control de vibración y recolección de energía (Energy harvesting) en máquinas.
- Uso de tecnologías Hardware-in-the-loop (HIL) para la optimización energética.
- Desarrollo de modelos holísticos para la gestión de energía en vehículos eléctricos con tecnología basado en baterías, pilas de combustible, ultracapacidades y motores de combustión eficientes

EMVeM
Energy efficiency Management for Vehicles and Machines (Project number: 315967)
Presupuesto: 3.526.437,6 €
Duración: 01/2013 - 12/2016
Programa: Marie Curie Initial Training Networks (ITN) - Call: FP7-PEOPLE-2012-ITN (FP7)
<http://www.emvem.org/>

ER-EV

Nuevas motorizaciones Range Extender para ER-EV automóviles eléctricos

Presupuesto: 8.098.808€

Duración: 01/2010 - 12/2012

Programa: GV-ETORGA

EPISOL

Vehículo eléctrico híbrido de pila de combustible

Duración: 01/2005 - 12/2008

<http://insia-upm.es/portfolio-items/proyecto-episol/>

EU-LIVE

Efficient Urban Light Vehicles

Presupuesto: 6 M €

Duración: 10/2015 - 02/2018

Programa: H2020

<http://eu-live.eu/>

- Desarrollo de recolectores de energía integrados en las fuentes de energía.
- Desarrollo e integración sostenible de drives eficientes para máquinas eléctricas.
- Herramientas de Eco-desarrollo para el diseño de máquinas.
- Estrategias de Gestión óptima para sistemas de almacenamiento en máquinas y vehículos eléctricos
- Nuevos materiales de almacenamiento eficiente para vehículos verdes.
- Desarrollo de modelos numéricos reducidos para el análisis de eficiencia energética en vehículos.
- Optimización energética en máquinas textiles
- Desarrollo de recolectores de energía en vehículos con motores de combustión.

Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos: Nuevos Powertrains RANGE EXTENDER para vehículos eléctricos. Diseñar y desarrollar nuevos RANGE EXTENDER de automoción integrando el eco-motor y el generador en un GEN-SET de 15kw a 50kw, y su integración en un sistema de demostración de vehículos, una VAN eléctrica comercial ligera.

Participantes: FAGOR EDERLAN, FAGOR AUTOMATION, CEGASA, ECENARRO, MONDRAGON Automocion.

Resultados obtenidos: diseños realizados y desarrollos avanzados

Descripción y objetivos:

El objetivo principal de este proyecto es el diseño de un vehículo eléctrico ligero híbrido propulsado por pila de combustible:

- Diseñar un modelo modular del vehículo ligero urbano y construcción/ensamblaje de un prototipo
- Desarrollar una metodología de gestión de control del sistema propulsor compatible con la configuración de vehículo buscado.
- Desarrollar una metodología de ensayo para el establecimiento de un ensayo funcional tipo de integración pila de combustible - vehículo

Participantes:

INSIA, CEMUSA, CSIC

Resultados obtenidos:

Prototipo demostrador. Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:

El Proyecto EU-LIVE aportará una solución Europea para la próxima generación de vehículo eléctrico ligero optimizado en coste y energéticamente eficiente, para hacer frente a los futuros retos en movilidad urbana, principalmente orientados a las necesidades del usuario y a la aceptación de este tipo de vehículos.

Participantes:

Mondragon Goi Eskola Politeknikoa, J.M.A. S.COOP, Kompetenzzentrum Das Virtuelle Fahrzeug Forschungsgesellschaft mbH, Peugeot Citroen Automobiles S.A., Peugeot Scooters, Continental Automotive GmbH, Magna Steyr

EUNICE

Eco-design and Validation of In-Wheel Concept for Electric Vehicles

Presupuesto: 68.993 €

Duración: 09/2012 - 08/2015

Programa: FP7

Battery Systems GmbH & CO OG, Fraunhofer-Gesellschaft zur Foerderung der Angewandten Forschung E.V., fka Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, Spirit Design Innovation and Brand GmbH, IFP Energies nouvelles, Freni Brembo Spa, Elaphe Pogonske Tehnologije Doo - Elaphe Propulsion Technologies LTD.

Resultados obtenidos: proyecto en desarrollo.

Descripción y objetivos:

Diseño, desarrollo y validación de un prototipo completo de motor eléctrico integrado en rueda compuesto por el motor eléctrico, electrónica de potencia, reductor, componentes estructurales y rueda) basado en la tipología de suspensión McPherson.

Participantes:

FUNDACION TECNALIA RESEARCH & INNOVATION (Líder), PININFARINA SPA, SISTEMI SOSPENSIONI SPA, Fundación CIE I+D+i (CIE Automotive), INDUSTRIAS PUIGJANER S.A, IVL SVENSKA MILJOEINSTITUTET AB, INFINEON TECHNOLOGIES AG, FUNDACION AIC AUTOMOTIVE INTELLIGENCE CENTER FUNDAZIOA, OSTERREICHSCHES FORSCHUNGS- UND PRÜFZENTRUM ARSENAL GES.M.B.H., HAYES LEMMERZ SRL, GKN EVO EDRIVE SYSTEMS LIMITED, COMITE DE LIAISON DE LA CONSTRUCTION D'EQUIPEMENTS ET DE PIECES D'AUTOMOBILES CLEPA AISBL, EVO ELECTRIC LTD

Resultados obtenidos:

Prototipo de motor en rueda integrado en vehículo demostrador. Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:

Desarrollo de (i) una base de datos experimental de neumáticos que se pueda utilizar en el diseño de nuevos sistemas de control de chasis y susceptible de ser incluida en el piloto de H2020 Open Data Research, (ii) modelos avanzados de vehículos y sus subsistemas para aplicaciones en tiempo real, y (iii) nuevos métodos de control integrado de chasis.

Participantes: Instituto Tecnológico de Aragón, Technische Universitaet Ilmenau, Tenneco Automotive Europe BVBA, Technische Universiteit Delft, dSPACE Digital Signal Processing and Control Engineering GmbH, SKF BV, Chalmers Tekniska Hoegskola AB, Aktiebolaget SKF

Resultados obtenidos:

- base de datos experimental de neumáticos que se pueda utilizar en el diseño de nuevos sistemas de control de chasis
- modelos avanzados de vehículos y sus subsistemas para aplicaciones en tiempo real
- nuevos métodos de control integrado de chasis. Proyecto en desarrollo.

Descripción y objetivos:

Control individual de par de motores eléctricos a rueda en vehículos puramente eléctricos para el incremento de la seguridad, el confort y la experiencia de conducción, tanto en

EVE

Innovative Engineering of Ground Vehicles with Integrated Active Chassis Systems

Presupuesto: 571.500 €

Duración: 01/2015 – 12/2017

Programa: H2020-MSCA-RISE-2014

Research and Innovation Staff Exchange (RISE)

<http://www.eve-project.eu/>

eVectoorC

Electric Vehicle Control of Individual Wheel Torque for On- and Off- Road Conditions

Presupuesto: 3.094.997 €
Duración: 09/2011 – 09/2014
Programa: FP7-2011-ICT-GC Small or Medium Scale Focused Research Projects (STREP)
Web: <http://www.e-vectoorc.eu/>

e-Vectoorc
Electric-VEHICLE Control of individual wheel Torque for On- and Off-Road Conditions
Presupuesto: 4.763.986 €
Duración: 36 meses
 01/09/2011 - 31/08/2014
Programa: Proyecto Europeo GC-ICT-2011.6.8 FP7-284708
<http://www.e-vectoorc.eu/>

FREE-MOBY
People centric easy to implement e-mobility
Presupuesto: 6.160.055,00€
Duración: 36 meses
 01/09/2013 - 31/08/2016
Programa: Proyecto Europeo FP7-SST-2013-RTD-1 FP7-608784
<http://www.moby-ev.eu/freemoby/>

carretera como en campo. Desarrollo y demostración de algoritmos de control de la rotación (yaw rate) y el deslizamiento lateral y nuevas estrategias para la regulación del par en las ruedas.

Participantes: Instituto Tecnológico de Aragón, University of Surrey, Kompetenzzentrum Das virtuelle Fahrzeug, Forschungsgesellschaft mbH, Flanders' Drive cvba-so, Inverto NV, Skoda Auto A.S., Technische Universitaet Ilmenau, Lucas Varity GmbH, Fundación Cidaut, Land Rover, Jaguar Land Rover limited

Resultados obtenidos:

- algoritmos de control de la rotación (yaw rate) y el deslizamiento lateral.
- nuevas estrategias para la regulación del par en las ruedas para mejorar la recuperación de energía de frenado, la función anti-bloqueo de frenos y de la función de control de tracción
- caracterización de EMC

Descripción y objetivos:

Abordar el control individual de los pares de tracción en vehículos con cuatro motores eléctricos en rueda, para mejorar la seguridad y el confort. Desarrollar para ello un algoritmo de control de la velocidad de guiñada (yaw rate) y del ángulo de deslizamiento lateral (sideslip angle), basado en la combinación del control de tracción individual de cada uno de los cuatro motores con los que cuenta el vehículo.

Participantes:

Cidaut, Flanders Drive, Instituto Tecnológico de Aragón, Inverto, Jaguar, Land Rover, Skoda, TRW, Universidad de Ilmenau, Universidad de Surrey, VIF

Resultados obtenidos:

Sistema de frenado regenerativo de alta capacidad. Gestión de las baterías (600V) para el almacenamiento óptimo de la energía generada. ABS: Modulación completa del sistema antibloqueo mediante el control de los motores eléctricos. Mejora del comportamiento dinámico gracias al control de tracción optimizado. Reducción de la amplitud de las oscilaciones de la velocidad de guiñada en las maniobras altamente dinámicas. Mejora de la seguridad activa y el control. Implementación de todas las soluciones adoptadas en un demostrador real. Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:

Implementar una movilidad eléctrica basada en micro-vehículos y centrada en las necesidades de movilidad urbana de la población. El proyecto se centra tanto en el vehículo como en la infraestructura, utilizando paneles fotovoltaicos, intercambio parcial de baterías y creando una comunicación entre el hogar, la infraestructura, el vehículo y el usuario.

Participantes:

BAEPS, Bitron, Cidaut, Cisc, Enel, ICPE, IMBGIS, IFEVS, Lithium Balance, Polimodel, Ricerca sul Sistema Energetico (RSE), ST Microelectronics, Torino e-District, Universidad de Surrey

GREENLION
Advanced manufacturing processes for Low Cost Greener Li-Ion batteries
Presupuesto: 8,6 M €
Duración: 11/2011 – 10/2015
Programa: FP7-2011-GreenCars-ELECTROCHEMICAL-STORAGE
<http://www.greenlionproject.eu>

GTA-BATT
Gestión Térmica Avanzada de Baterías
Presupuesto: 1,6 M €
Duración: 09/2011 - 01/2014
Programa: INNPACTO Ministerio de Economía y Competitividad.

HEMIS
Electrical powertrain HEalth Monitoring for Increased Safety of FEVs
Presupuesto: 2.924.470 €
Duración: 6/2012 - 2/2015
Programa: FP7
<http://www.hemis-eu.org/>

Resultados obtenidos:

Se han desarrollado diferentes arquitecturas eléctricas inteligentes para todos los elementos que participan en el sistema: baterías, hogar, vehículo y elementos de recarga. Los elementos protagonistas han sido dotados de sistemas de comunicación para garantizar el máximo aprovechamiento de energías renovables y la máxima eficiencia de la energía necesaria para alimentar el sistema. Uno de los objetivos del proyecto es maximizar el aprovechamiento de la energía solar, obteniendo 20km de autonomía diaria a partir de esta fuente de energía. Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:

El proyecto GREENLION ha tenido por objetivo el desarrollo de una serie de tecnologías de diseño y fabricación de baterías de ion litio de altas prestaciones orientadas al vehículo eléctrico, siempre bajo criterios de ecodiseño, minimización del impacto medioambiental, reciclabilidad y por disminución de costes.

Participantes:

IK4-CIDETEC (Coordinador), POLYTYPE, KEMET Electronics POLIMI, KIT-HIU, ENEA, Celaya Empanza y Galdós SA, University of LIMERICK, SOLVAY, TIMCAL, MONDRAGON ASSEMBLY, AIT, RESCOLL, TECNICAS REUNIDAS, SEAT, VOLKSWAGEN AG

Resultados obtenidos:

Diseño, construcción y validación de seis módulos de Li Ion bajo especificaciones OEM con celdas diseñadas y ensambladas en el proyecto. Más de 150 celdas de litio ion producidas y testeadas, a partir de materiales y procesos ecológicos de fabricación innovadores desarrollados en el proyecto.

Descripción y objetivos:

Desarrollo de soluciones que permiten la correcta gestión térmica del Battery Pack, con un incremento de la seguridad, mejorando el rendimiento en condiciones climatológicas adversas y aumentar la vida de la batería.

Participantes:

ASCAMM, Ficosa, Estamp

Resultados obtenidos:

Diferentes soluciones que incluyen la integración de los sistemas de disipación en los módulos de baterías, sistemas de conexión de celdas que impiden la generación de puntos calientes y acondicionamiento de la batería y estrategias de protección en climas fríos. Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:

La introducción a gran escala de vehículos 100% eléctricos en el mercado se ve limitada por la relativa inmadurez tecnológica de los nuevos sistemas que integran el vehículo, que afecta a la seguridad y mantenibilidad de los vehículos. En el proyecto se analiza la detección, diagnóstico y pronóstico de fallos del tren de potencia eléctrico, y se analiza el nivel de emisiones electromagnéticas generadas por estos sistemas.

Participantes:

IEB

Autobús 100% eléctrico para uso urbano

Presupuesto: 6 M €

Duración: 1/2012 - 12/2013

Programa: Gobierno Vasco - ETORGAI

ieHCB

Autobús 100% eléctrico para uso urbano

Presupuesto: 5 M €

Duración: 2014 - 2016

Programa: Gobierno Vasco - ETORGAI

IMPROVE

Integration and Management of Performance and Road efficiency Of electric Vehicle Electronics

Presupuesto: 4,9 M €

Duración: 07/2013 - 06/2016

Programa: FP7

improve-fp7.eu

CEIT-IK4, JEMA Energy, IDIADA AUTOMOTIVE TECHNOLOGY SA, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, POLITECNICO DI MILANO, YORK EMC SERVICES (2007) LIMITED, MIRA LTD United Kingdom

Resultados obtenidos:

Diseño, desarrollo y validación de sistemas de monitorización embarcados para la detección y pronóstico de los modos de fallo principales y la estimación del tiempo de vida útil restante de los componentes: rodamientos, bobinado del motor, condensadores del bus de alta tensión, IGBTs del inversor y nivel de campos EM en cabina (respecto a estándares ICNIRP).

Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:

Desarrollo de un autobús urbano 100% eléctrico sin necesidad de recargas intermedias durante el servicio. Desarrollo de algoritmos de gestión de la energía en sistema híbridos compuestos por baterías y supercondensadores. Electrónica de potencia para la hibridación de sistemas de almacenamiento de energía.

Participantes:

IRIZAR, JEMA Energy S.A., CEIT-IK4, DATIK, IK4-Vicomtech, Tecnalia

Resultados obtenidos:

Desarrollo de un autobús urbano 100% eléctrico operativo en diferentes ciudades (San Sebastian, Barcelona)

Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:

Desarrollo de un autobús urbano articulado de alta capacidad. Capacidad de carga rápida intermedia mediante pantógrafo para optimizar el dimensionamiento del sistema de almacenamiento embarcado.

Participantes:

IRIZAR, JEMA Energy S.A., CEIT-IK4, ALCONZA, DATIK, Tecnalia

Resultados obtenidos:

Desarrollo de un autobús urbano 100% eléctrico articulado de alta capacidad con capacidad de recarga rápida intermedia.

Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:

Desarrollo de un sistema de control avanzado y de una arquitectura que utilice los diferentes subsistemas instalados dentro de vehículos eléctricos de flota, sin dejar de tener en cuenta las partes externas del sistema, tales como la nube, la red y la infraestructura, ofreciendo tanto un ahorro energético y el aumento de la comodidad y la seguridad de los pasajeros.

Participantes:

Virtual Vehicle Competence Center, TOFAS Turk Otomobil Fabrikasi, Continental Temic Automotive Electric Motors, LMS Imagine, IDIADA, Fraunhofer-Gesellschaft Zur Förderung Der Angewandten Forschung, Czech Technical University in Prague, The Università degli Studi di Firenze, Brusa Elektronik, SIC! Software

Resultados obtenidos:

INNEXTRAN

Tecnologías innovadoras para el desarrollo de un vehículo ligero eléctrico enchufable con extensión de rango

Presupuesto: 2.023.274,91 €

Duración: 7/2012 - 12/2014

Programa: Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011. Subprograma INNPACTO 2011 del Programa Nacional de Cooperación Público-Privada. Cofinanciados por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). IPT-2011-1798-370000.

<http://insia-upm.es/portfolio-items/proyecto-innextran-2/>

MARS-EV

Materials for Ageing Resistant lithium ion energy Storage for the Electric Vehicle

Presupuesto: 9.2ME

Duración: 10/2013 – 10/2017

Programa: FP7-2013-GreenCars-MATERIALS

www.mars-ev.eu

MOBI2GRID

Experiencia piloto de movilidad eléctrica en la Eurorregión Norte de Portugal/Galicia

Presupuesto: 1,87 M€

Duración: 10/2010 - 12/2015

- Definición y desarrollo de una arquitectura ICT mejorada respecto el estado del arte
- Electrificación de un modelo Fiat Dobló
- Desarrollo de algoritmos de simulación
- Desarrollo de un sistema que consume menos que los vehículos con los que se compara
- Desarrollo de un algoritmo de estimación de la autonomía mejorado

Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:

El objetivo general y común del proyecto es el desarrollo, experimentación e integración sobre una plataforma ya existente, de un vehículo eléctrico ligero enchufable con extensión de rango y todo el conjunto de tecnologías asociadas a este tipo de vehículos, como son el bastidor y su carrocería, la tracción eléctrica, su gestión y almacenamiento, así como los aspectos relativos a su impacto medioambiental y a la seguridad, para lograr una alternativa de transporte eficaz, eficiente energéticamente y respetuoso con el medio ambiente.

Participantes:

INSIA, CETEMEC, MECACONTROL

Resultados obtenidos:

Prototipo demostrador. Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:

MARS-EV es un proyecto orientado al desarrollo de materiales de electrodo de alta energía y electrolitos seguros avanzados, persiguiendo una mejora sustancial en el ciclo de vida de las baterías, con unos procesos de síntesis de materiales escalables y sostenibles, todo ello enfocado al contexto del vehículo eléctrico. El proyecto comprende también la validación de los materiales en prototipos de celda de litio ion a escala semi-industrial, sobre los que se realizará un modelado de los procesos de envejecimiento y análisis de ciclo de vida.

Participantes:

IK4-CIDETEC (Coordinador), KIT-HIU, POLITO, Johnson Matthey, SGL Carbon, Tel Aviv University, ENEA, SOLVIONIC, LITHOPS, Celaya Emparanza y Galdós SA, CTP, Imperial College, FHG-ISE, Oxford Brookes University, RECUPYL, Johnson Matthey Battery Systems.

Resultados obtenidos: Proyecto en desarrollo.

Descripción y objetivos:

El objetivo principal del proyecto era posicionar a la Eurorregión como pionera en la adopción de la movilidad eléctrica basada en fuentes de energía renovables a través de la implementación de un sistema integrado e interoperable entre las dos regiones con

Programa: POCTEP
www.mobi2grid.eu

MOBIEUROPE
Integrated and Interoperable ICT Systems and Services for Electro-Mobility in Europe
Presupuesto: 2,4 M€
Duración: 01/2012 - 12/2014
Programa: CIP-ICT-PSP
www.mobieurope.eu

MobiOne
Consolidación de la plataforma CEIIA / CTAG a través del desarrollo y prueba de nuevos productos y servicios de movilidad sostenible
Presupuesto: 1,47 M€
Duración: 01/2008 - 12/2010
Programa: POCTEP

NCV2015
Networked Clean Vehicle 2015
Presupuesto: 768.581 €
Duración: 30 meses
02/06/2008 - 31/12/2010
Programa:

la realización de una prueba piloto con vehículos eléctricos en el corredor de movilidad eléctrica Vigo-Porto.

Participantes:
CEIIA (Portugal) y CTAG (España).

Resultados obtenidos: Entre los principales resultados del proyecto cabe destacar la creación de un Observatorio de la movilidad eléctrica para la Euroregión Galicia-Norte de Portugal, la puesta en marcha de un corredor de movilidad eléctrica Vigo-Oporto, el desarrollo y prototipado de un sistema de monitorización en tiempo real de datos de vehículo eléctrico y comportamiento del conductor, y el desarrollo de un HMI específico para reducir el "range anxiety". Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:
El principal objetivo del proyecto MOBI.Europe era integrar cuatro iniciativas (Amsterdam Electric en Amsterdam, e-car Ireland en Irlanda, MOBI.E en Portugal, y Vigo en Galicia), generando servicios de electromovilidad adicionales, en beneficio del usuario de vehículos eléctricos, basados en la integración y la experiencia acumulada de los socios.

Participantes:
INTELI (Portugal), Electricity Supply Board ecars (Irlanda), Geemente Amsterdam (Países Bajos), Renault (Francia), Critical Software (Portugal), Centro de Excelência e Inovação na Indústria Automóvel (Portugal), INTEL (Irlanda), Liander (Países Bajos), Welgood Solutions (España), Fundación Agencia Intermunicipal de la Energía de Vigo (España), Limerick City Council (Irlanda), CTAG (España).

Resultados obtenidos:
Desarrollo de un protocolo de interoperabilidad abierto y libre para servicios de movilidad eléctrica; puesta en marcha de un servicio de car sharing de vehículos eléctricos en los parkings de Welgood en Vigo; y diseño y desarrollo de una aplicación para smartphone interoperable entre los pilotos. Cabe destacar también la realización del I Roadshow de movilidad eléctrica de la ciudad de Vigo. Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:
El objetivo del proyecto MobiOne era posicionar la euroregión Galicia – Norte de Portugal como una comunidad de concepción, desarrollo y prueba de nuevos productos y servicios de movilidad urbana sostenible asociados a vehículos eléctricos.

Participantes: CEIIA (Portugal) y CTAG (España).
Resultados obtenidos: Desarrollo y construcción de 2 prototipos demostradores tecnológicos: vehículo eléctrico urbano multifuncional y plataforma con motores eléctricos en rueda. Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:
Se trata de una iniciativa estratégica de tres centros tecnológicos españoles clave en el sector de la automoción, para la investigación en tecnologías, sistemas y componentes aplicables a las futuras generaciones de vehículos de bajo impacto medioambiental, con un horizonte temporal 2015.

OPTIVE

Investigación de algoritmos de control para la optimización de vehículos con motor en rueda

Presupuesto: 374.594,12 €

Duración: 24 meses

01/01/2010 - 31/12/2011

Programa:

Plan ADE - Nº exp.: CTT/10/VA/0002

OSIRIS

Optimal Strategy to Innovate and Reduce energy consumption in urban rail Systems

Presupuesto: 4.299.951 €

Duración: 01/2012 – 03/2015

Programa: FP7-SST-2011-RTD-1

centrado en el hombre, teniendo en cuenta los requerimientos de espacio, coste y complejidad. Concretamente, OPTEMUS pretende desarrollar una serie de tecnologías centrales innovadoras (sistema HVAC localizada junto con subsistemas EVCRU, alojamiento y aislamiento de baterías con capacidad de almacenamiento de energía eléctrica y térmica, sistema de suspensión con capacidad de generación de energía, asientos inteligentes con células peltier integradas, paneles radiantes) complementadas con tecnologías state of the art (paneles fotovoltaicos inclinables, estrategias eco-driving y eco-routing, materiales de acristalamiento y salpicadero).

Participantes:

Mondragon Unibertsitatea, Virtual Vehicle Competence Centre, Centro Ricerche FIAT ScpA, ESI Group, Fraunhofer Gesellschaft, Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule Aachen, IFP Énergies nouvelles, Continental AG, Sistemi Sospensioni SpA, Università degli Studi di Salerno, BAX & WILLEMS, Scuola Superiore Sant'Anna, DENSO Thermal Systems SpA, DENSO Automotive Deutschland GmbH

Resultados obtenidos: proyecto en desarrollo.

Descripción y objetivos:

Desarrollar algoritmos de control que permitan optimizar el comportamiento de los vehículos con motores eléctricos en rueda. Para validar los resultados alcanzados se desarrolló un vehículo demostrador que respaldase las conclusiones alcanzadas mediante desarrollos matemáticos.

Participantes:

Cidaut

Resultados obtenidos:

Creación de nuevos algoritmos de control aprovechando la versatilidad de la ubicación de motores en rueda que permiten los motores híbridos y eléctricos. Con estos algoritmos se ha conseguido mejorar el comportamiento dinámico, la seguridad, el confort y el consumo de los vehículos. Implementación de motores en rueda de alta densidad energética lo que supone la eliminación del sistema de transmisión mecánica. Validación de los resultados sobre un vehículo a escala reducida con cuatro motores en rueda y sobre un vehículo a escala real con dos motores en rueda. Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:

Enfoque holístico para la reducción del consumo de energía de sistemas ferroviarios urbanos considerando los vehículos, la infraestructura y la operación: definición de indicadores clave de rendimiento y ciclos de trabajo estándar para medir el consumo de energía, a nivel de sistema, y validación por medio de simulaciones y pruebas piloto.

Participantes: Instituto Tecnológico de Aragón, Union des Industries Ferroviaires Europeennes (UNIFE), Alstom Transport S.A., Ansaldo STS S.p.A., Société Technique pour l'Energie Atomique, Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles S.A., Siemens AG, Azienda Trasporti Milanesi, Regie Autonome des Transports

**PCBBUS
SIMULACIÓN Y CONTROL DE LA GESTIÓN
ENERGÉTICA DE UN SISTEMA HÍBRIDO
BASADO EN PILA DE COMBUSTIBLE,
SUPERCAPACITADOR Y BATERÍA PARA
UN AUTOBÚS ELÉCTRICO**

Presupuesto: 127.050 €

Duración: 2015 - 2017

Programa: Ministerio de Ciencia e Innovación.

<http://www.idi.mineco.gob.es/portal/site/MICINN/>

**PLUS-MOBY
Premium Low weight Urban Sustainable
e-MOBility**

Presupuesto: 3.056.686 €

Duración: 36 meses

01/09/2013 - 31/08/2016

Programa:

Proyecto Europeo FP7-SST-2013-RTD-1
FP7-605502

<http://www.moby-ev.eu/plusmoby/>

**Reemain
Resource and Energy Efficiency
Manufacturing**

Presupuesto: Ikerlan: 450.828 €;

financiación 318.722 €

Duración: 10/2014 - 09/2017

Programa: FP7

www.reemain.eu

Parisiens, Istanbul Ulasim Sanayi ve Ticaret AS, Union internationale des Transports Publics, D'Appolonia Spa, Saft SAS, Azienda per la Mobilita del Comune di Roma Spa, Universidad de Chile, Technische Universitaet Wien, University of Newcastle upon Tyne

Resultados obtenidos:

- definición de indicadores clave de rendimiento y ciclos de trabajo estándar para medir el consumo de energía.
- validación por medio de simulaciones y pruebas piloto.

Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:

Control electrónico de un sistema híbrido basado en pila de combustible para autobuses. Este proyecto presenta un método de gestión de la energía en una fuente de potencia eléctrica híbrida para autobuses eléctricos. Esta fuente de energía eléctrica híbrida se compone de un sistema de pila de combustible como fuente principal y dos fuentes de almacenamiento de energía, un conjunto de ultracondensadores y un conjunto de baterías, como fuente auxiliar. Con esta hibridación, el volumen y la masa de la fuente de energía eléctrica híbrida se pueden reducir, ya que la alta densidad de energía de la batería y la alta densidad de potencia de supercondensador se pueden combinar para optimizar dichos factores.

Participantes:

INSIA

Resultados obtenidos:

Proyecto en desarrollo.

PLUS-MOBY

Premium Low weight Urban Sustainable e-MOBility

Presupuesto: 3.056.686 €

Duración: 36 meses

01/09/2013 - 31/08/2016

Programa:

Proyecto Europeo FP7-SST-2013-RTD-1 FP7-605502

<http://www.moby-ev.eu/plusmoby/>

Descripción y objetivos:

Innovar en los recursos de los procesos productivos, optimizándolos e integrando energías renovables incluyendo la integración sistemas de almacenamiento eléctrico. Para ello los objetivos perseguidos son:

- Desarrollar una herramienta de diseño y dimensionamiento de sistemas de baterías considerando los costes, la gestión de la energía y la seguridad.
- Mejorar el rendimiento de los sistemas de baterías en entornos industriales.
- Desarrollar un prototipo de sistema de baterías basado en tecnología ion litio compacto, escalable con un sistema de gestión innovador.

Sistema de pila de combustible PEM de baja potencia en configuración híbrida con baterías para aplicación a un vehículo: Sistema de control electrónico.

Presupuesto: 22.000€

Duración: 2015

Programa: financiación privada

SPAIN 2017

Sistema de Propulsión Avanzado

INtegrado 2017

Presupuesto: 2.010.719 €

Duración: 08/2014 - 12/2017

Programa: CIEN

Participantes:

Solera GmbH, Youris.com, Fraunhofer IWU, R2M Solution, Eurac, Bossa, Galletas Gullón S.A., DMU De Montfort University, Est Enerji, IES Integrated Environmental Solutions, dr. Jacob energy research GmbH Co. & KG, Ikerlan S. Coop, SCM Group SpA Fonderie, Fundación CARTIF, CRIT Research, AENOR Spanish Association for Standardization and Certification.

Resultados obtenidos:

- Sistema de gestión de baterías
- Herramienta de diseño y dimensionamiento de sistemas de almacenamiento
- Sistema de almacenamiento basado en ion litio compacto y escalable. Proyecto en desarrollo.

Descripción y objetivos:

Control electrónico de un sistema híbrido basado en pila de combustible. Este proyecto presenta un método de gestión de la energía en una fuente de potencia eléctrica híbrida para vehículos eléctricos. Esta fuente de energía eléctrica híbrida se compone de un sistema de pila de combustible (0,5Kw) como fuente principal y una batería, como fuente auxiliar.

Participantes:

EPHISA , INSIA y CEI (Universidad Politécnica de Madrid)

Resultados obtenidos: Proyecto finalizado

Descripción y objetivos:

- Desarrollar nuevas gasolinas y lubricantes fuel economy que permitan incrementar un 2% la eficiencia del motor Otto avanzado.
- Realizar intervenciones y modificaciones en el sistema de inyección directa del motor Otto para optimizar el uso de las nuevas formulaciones de gasolinas y lubricantes.
- Desarrollar un nuevo concepto de motor de tracción eléctrico y sus sistemas de gestión electrónica: tracción, energética y de control de potencia.
- Desarrollar el sistema de control energético del vehículo, que permitirá optimizar la gestión de energía dependiendo del ciclo de trabajo, y aplicar estrategias de funcionamiento híbrido que maximicen las prestaciones y autonomía de vehículo.
- Desarrollar una turbina y un sistema de termoelectrónicos para aprovechar la energía perdida en los gases de escape del motor.
- Desarrollar una tecnología avanzada de conversión para la generación de energía.
- Desarrollar los componentes mecánicos, carcasas y acoplamientos necesarios para poder integrar las tecnologías desarrolladas en un sistema plenamente funcional.
- Integrar los sistemas desarrollados en bancadas de pruebas para validar los subsistemas separadamente y en funcionamiento conjunto.

Participantes:

SPECTRA
SMART PERSONAL CO2 FREE
TRANSPORT IN THE CITY
 Presupuesto: 680.000 €
 Duración: 2015-2019
 Programa: CDTI-CIEN
www.cdti.es

SYRNEMO
Synchronous Reluctance Next
Generation Efficient Motors for Electric
Vehicles
 Presupuesto: 3,757,303 EUR
 Duración: 10/2013 – 11/2016
 Programa: FP7 - COOP - TRANSPORT
<http://www.syrnemo.eu/>

TRANVÍA
Desarrollo de un tranvía eléctrico con
tracción a baterías y pila de combustible
como solución de movilidad en la zona
del río Sella
 Presupuesto: 1.626.000 €
 Duración: 03/2009 - 12/2010
 Programa: PLAN DE CIENCIA,
 TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN DEL
 PRINCIPADO DE ASTURIAS Gobierno del
 Principado de Asturias. Exp. PEST08-21

TRUSS BATTERY

REPSOL, S.A. (Lider), Microelectónica Maser, S.L., Lancor 200, S. Coop., Infranor Spain, S.L.U., Grupo Componentes Villanova, S.L. (CIE Automotive), CIE Mecauto, S.A. (CIE Automotive)
Resultados obtenidos: Proyecto en desarrollo

Descripción y objetivos:
 Desarrollo de un sistema de generación de electricidad y acumulación de energía basado en baterías de flujo

Participantes:
 Consorcio de ámbito nacional

Resultados obtenidos:
 Electrodo basado en composites carbono-cerámica de alta resistencia a la corrosión. Proyecto en desarrollo.

Descripción y objetivos:
 SyrNemo es un innovador motor de reluctancia síncrona (SYRM) con mayor densidad de energía y mayor eficiencia del ciclo de conducción a un menor costo que las máquinas síncronas de imanes permanentes (PM) según el estado del arte actual.

Participantes: Tecnalia, Austrian Institute of Technology, AVL, CRF, Vrije Universiteit Brussel, THIEN eDrives GmbH, University of Bologna, Leibniz University of Hannover.

Resultados obtenidos: proyecto en desarrollo.

Descripción y objetivos:
 Definir, desarrollar y validar experimentalmente una nueva planta de potencia basada en pila de combustible alimentada con hidrógeno como solución de tracción para vehículos ferroviarios de reducidas dimensiones "tipo tranvía".

Participantes:
 FEVE y CIDAUT

Resultados obtenidos:
 Las especificaciones de una nueva generación de sistemas de propulsión basados en las tecnologías del hidrógeno para aplicaciones ferroviarias del tipo tranviario de pequeñas dimensiones. Validación experimental de la integración de sistemas no contaminantes basados en pila de combustible como experiencia piloto a nivel nacional alcanzar un alto grado de desarrollo tecnológico en tecnologías energéticas de vanguardia con posibilidad de aplicación al transporte ferroviario por parte del segundo operador ferroviario a nivel nacional. Desarrollar modelos y algoritmos de control y gestión eficiente de los flujos energéticos de un vehículo con el objetivo de extrapolar estos desarrollos a otras aplicaciones ferroviarias. Determinar la viabilidad de aplicación de una tecnología emergente y respetuosa con el medioambiente como solución ferroviaria de pequeña potencia en zonas de alto valor ambiental y con posibilidad de desarrollo turístico. Determinar la viabilidad técnica del uso del biogás como una fuente de H2 renovable. Desarrollar tecnologías novedosas para la producción de hidrógeno renovable. Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:

Electric and Hybrid Bus and Truck Smart Battery System

Presupuesto: 1,8 M €

Duración: 03/2015 - 01/2018

Programa: Privado

Desarrollo de un sistema de almacenamiento de energía modular para autobuses y camiones urbanos híbridos y eléctricos, con vida mejorada y un mejor rendimiento.

Participantes:

ASCAMM, Millor Battery

Resultados obtenidos:

Sistema de batería inteligente comercial para camiones y autobuses eléctricos e híbridos con el ciclo de vida más largo y mejor flexibilidad de integración a un costo competitivo. Proyecto en desarrollo

Descripción y objetivos:

Investigar cómo el uso de carga por inducción de vehículos eléctricos (EV) en entornos urbanos mejora la comodidad y la sostenibilidad de la movilidad basado en el coche.

Participantes:

ENIDE Solutions, Centro Recherche Fiat, Università degli Studi di Firenze, Volvo Technology, Continental Automotive, Hella KGaA Hueck & Co, Vrije Universiteit Brussel, IDIADA, TRL Limited, Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives, ENDESA, Enel Distribuzione, Fundación Circe Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos, Politecnico di Torino, Transport for London, BAE Systems

Resultados obtenidos:

- Dos prototipos de cargadores inductivos e integración en vehículos
 - Construcción de una estación de carga inductiva
 - Validación técnica y económica de la solución en Florencia
- Proyecto finalizado.

Descripción y objetivos:

Aplicar innovadoras tecnologías de fabricación sobre materiales ligeros avanzados para producir un vehículo urbano eléctrico de dos plazas de gran autonomía. El sistema de almacenamiento consiste en una hibridación batería-ultracap que permite optimizar el rendimiento del vehículo al mismo tiempo que aumenta la duración de las baterías.

Participantes:

Casple, Cidaut, Fraunhofer, Fonderia Maspero, Grupo Antolín Ingeniería, LKR – AIT, NBC, PST, Thinkstep, Tubitak.

Resultados obtenidos:

La utilización de ultracaps permite optimizar el dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía, reduciendo su coste y masa al mismo tiempo que se cubren las necesidades de autonomía y potencia. Se han desarrollado innovadores sistemas de control para la gestión energética del sistema de almacenamiento, de tal forma que el flujo de energía minimiza el consumo, mejora el rendimiento y aumenta la durabilidad de las baterías. El vehículo es plegable para reducir la ocupación de espacio urbano cuando no está siendo utilizado. La función plegado ha sido integrada en el sistema propulsor del vehículo y se realiza con el motor principal del mismo. Desarrollo de leyes de

UNPLUGGED

Wireless Charging for Electric Vehicles

Presupuesto: 3,9 M €

Duración: 10/2012 - 03/2015

Programa: FP7

unplugged-project.eu

URBAN-EV

Super Light Architectures for Safe and Affordable Urban Electric Vehicles

Presupuesto: 3.617.496,00€

Duración: 36 meses

01/09/2013 a 31/08/2016

Programa: Proyecto Europeo FP7-SST-2013-RTD-1 FP7-605634

<http://www.urban-ev.eu/>

VENTESU

Desarrollo de Plataformas Vehiculares, Modulares y Autoportantes de Tracción Eléctrica de Alta Eficiencia para

Servicios Urbanos

Duración: 7/2014 - 12/2017

Programa: CDTI. Programa Estratégico de Consorcios de Investigación Empresarial. CIEN.

VENTESU

Desarrollo de Plataformas Vehiculares, Modulares y Autoportantes de Tracción Eléctrica de Alta Eficiencia para Servicios Urbanos

Presupuesto:

Duración: 12/2014 - 12/2018

Programa: CIEN

VENUS

Switched/Synchronous Reluctance Magnet-free Motors for Electric Vehicles

Presupuesto: 2,939,897€

Duración: 01/2013 - 10/2016

Programa: FP7-TRANSPORT

<http://www.venusmotorproject.eu/>

Volar-e

Electric supercar

Presupuesto: 3,9 M €

Duración: 09/2012-01/2013

Programa: EC Tender Promotion of electric vehicles Technologies (29/G/ENT/CIP/12/NOSS00)

www.applusidiada.com/en/new/Electric_prototype-1340222851925

frenado regenerativo específicas, teniendo en cuenta el sistema de almacenamiento híbrido, maximizando la energía recuperada.

Descripción y objetivos:

El objetivo principal del proyecto es la definición, diseño y desarrollo de un prototipo de vehículo eléctrico con baterías y ultra-condensadores, con extensión de rango, enchufable, de carrocería auto-portante y cabina baja para la prestación de servicios urbanos.

Participantes:

FCC, IRIZAR, IVECO, JOFEMAR, JEMA, INSIA, TECNALIA

Resultados obtenidos:

Proyecto en desarrollo

Descripción y objetivos:

Definición, diseño y desarrollo de un prototipo de vehículo eléctrico con baterías y ultra-condensadores, con amplia autonomía, enchufable, estructura autoportante y baja cabina para favorecer la prestación de servicios urbanos. Se trata de un vehículo 100% eléctrico y sin transmisión mecánica, con baterías y ultra-condensadores, que opera en servicio (entorno urbano).

Participantes:

Tecnalia, FCC, Irizar, Jema, Jofemar, IVECO, INSIA, Universidad Politécnica de Madrid.

Resultados obtenidos: proyecto en desarrollo.

Descripción y objetivos: Diseñar máquinas eléctricas con menos material de imán permanente, con materiales diferentes de las tierras raras o incluso completamente libres de imán. Desarrollar nuevos powertrains, competitivos en costes, fiables y fabricable, hacia una alternativa en densidad de potencia, eficiente y a las máquinas actuales de imanes permanentes

Participantes: IK4-TEKNIKER, FAGOR Electrónica, LOTUS Cars, Dr. BRAUN, MOTOR Design, MONDRAGON University.

Resultados obtenidos: diseños realizados y desarrollos avanzados.

Descripción y objetivos:

Desarrollo y demostración de un prototipo deportivo eléctrico de alto rendimiento, comparable o incluso mejor que los coches deportivos con motores convencionales.

Participantes:

IDIAIDA

Resultados obtenidos:

- 800 KW (1.088 cv) de potencia y 1.000 Nm de par motor
- Carga rápida de las baterías en 15 minutos
- Sistema de 4 motores (uno por rueda, lo que lo convierte en un coche con tracción total) denominado ITORQ
- Velocidad máxima de 300 km/h, a la que es capaz de llegar en apenas 14 segundos, 6 segundos después de haber alcanzado los 200 km/h
- Sistema de frenado regenerativo.

Proyecto finalizado.

WEEVIL
Ultralight and ultrasafe adaptable 3-wheeler
Presupuesto: 6.293.944€
Duración: 06/2015 - 06/2019
Programa: HORIZON-2020-GV
<http://www.dewiproject.eu/domains/automotive/>

Descripción y objetivos: Nuevo concepto de vehículo ultraligero y ultraseguro adaptable de 3 ruedas, con una estructura de composite utilizando nuevos procesos de fabricación para una introducción asequible de estos materiales en vehículos nuevos. La modularidad de los elementos, incluyendo los battery packs, la integración del sistema y la arquitectura innovadora del vehículo se considera en el diseño del vehículo. El vehículo tiene un mecanismo de variación de anchura de rueda para permitir la adaptación a diferentes velocidades

Participantes: IK4-TEKNIKER, Comarth Engineering, IADA SRL, HEXAGON, PIMOT, AUTOMON, KAITEK, FAGOR AUTOMATION, IRURENA.

Resultados obtenidos: diseños realizados y desarrollos avanzados.

ZeEUS
Zero Emission bUs Systems
Presupuesto: 13,4 M €
Duración: 11/2013 – 12/2018
Programa: FP7
zeus.eu

Descripción y objetivos: Demostración de la viabilidad económica, ambiental y social de sistemas de autobuses urbanos eléctricos que combinan tecnologías innovadoras para vehículos eléctricos e infraestructura.

Participantes:

Transports Metropolitans de Barcelona (TMB), Endesa, Enide Solutions, UPC, IDIADA y otros (consorcio total, 41 socios).

Resultados obtenidos:

- Definición del mejor procedimiento de medida de consumo en un vehículo eléctrico
- Determinación de la correlación entre ensayos en pista y ensayos de campo

Realización del protocolo SORT-E para medición del consumo eléctrico de los vehículos en pistas y posterior correlación en rutas reales. Proyecto en desarrollo.

Dimensionamiento y Modelado de un Vehículo Eléctrico Propulsado por Pilas de Combustible. Análisis Económico y de Factibilidad

Gabriel Correa Perelmuter¹, Ladislao Mathé², Emanuel Moschen², Pedro Muñoz²

¹CONICET -UNCa, Maipú 662, 4700, San Fernando del Valle de Catamarca, Argentina.

²Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - U.N.C., Av. Vélez Sarsfield 1611, 5000, Córdoba, Argentina.

Fecha de recepción del manuscrito: 26/12/2013

Fecha de aceptación del manuscrito: 14/02/2014

Fecha de publicación: 28/03/2014

Resumen—El presente trabajo aborda el diseño, el dimensionamiento y la simulación de un auto eléctrico propulsado por pilas de combustible a hidrógeno y baterías de ion-litio. Para ello se seleccionaron recorridos representativos del tránsito vehicular dentro de la ciudad de Córdoba y se recolectaron los datos a través de un GPS (velocidad, tiempo y altitud) para confeccionar ciclos de manejo y sus respectivos perfiles de elevación. El modelado matemático y simulación de los sistemas integrados se realizó en entorno MatLab/Simulink, tomando en cuenta las ecuaciones que gobiernan los distintos fenómenos físicos. Además se realizó la simulación de los sistemas según los ciclos de manejo y se obtuvo el comportamiento dinámico de los mismos. Finalmente se estudiaron los resultados obtenidos de la simulación, se elaboraron comparaciones entre éste sistema y el convencional de combustión interna y se calculó el hidrógeno necesario para el parque automotor de la ciudad de Córdoba.

Palabras clave — auto eléctrico, pilas de combustible, baterías, modelado, simulación.

Abstract—This paper addresses the design, sizing and simulation of an electric car powered by fuel cells and li-ion batteries. This was achieved by selecting representative traffic routes within the city of Córdoba and gathering the data with a GPS (speed, time and altitude) to make the driving cycles, with their respective elevation profiles. The mathematical modeling and numerical simulation of the systems was carried out in MATLAB/Simulink environment, taking into account the governing equations involved in the different physical phenomena. The Dynamic responses of the systems were obtained running the Simulink model using the different driving cycles as inputs. Finally, the simulations results were analyzed, the internal combustion vehicle was compared with the proposed system analyzing benefits and drawbacks, and the amount of hydrogen necessary for the fleet of the city of Cordoba was calculated.

Keywords — electric vehicle, fuel cell, battery, modeling, simulation.

INTRODUCCIÓN

La acumulación de personas en grandes urbes intensifica la necesidad de movilizarse, provocando que las distancias recorridas sean cada vez mayores y hace del transporte una necesidad básica. Esto conlleva un crecimiento de la demanda de energía por parte del sector de transporte. Actualmente casi un tercio de la energía total producida en Argentina por diferentes fuentes está destinada a este fin, y esta demanda es cubierta en un 94% por combustibles fósiles (Secretaría de Energía, 2013). En vista de que este recurso es limitado y favorece la contaminación ambiental, es necesario buscar alternativas más eficientes, sustentables y limpias.

Hasta el momento se han desarrollado varios modelos dedicados al estudio de la dinámica de las pilas de combustible y los vehículos eléctricos (Adcock, et al., 2008) (Cunningham, et al., 1999) (Gao, et al., 2010) (Genta,

2006) (Guzzella, 1999) (Miotti, et al., 2005). Los resultados mejoran la comprensión de los fenómenos, pero son difíciles de ensamblar con otros modelos que garanticen una buena y rápida simulación de comportamiento de los sistemas. El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de un modelo dinámico de Vehículo eléctrico de pilas de combustible con su respectivo tren de potencias con el fin de lograr un óptimo dimensionamiento del mismo acorde a las necesidades de la ciudad de Córdoba. Para ello se utilizó un modelo de pila de combustible ya validado (Correa, et al., 2011) y se desarrollaron modelos de simulación numérica del vehículo, del motor y de la batería de ion-litio. Con estas simulaciones se logró obtener datos relativos a consumos y comportamiento característicos. Para las simulaciones y dimensionamiento se emplearon recorridos típicos dentro de la ciudad de Córdoba con los perfiles de alturas correspondientes.

La operación de las Baterías de ion-litio y las pilas de combustible PEM implica algunos fenómenos multifísicos complejos, incluyendo reacciones electroquímicas, difusiones de gas y las generaciones de calor (Gao, et al., 2010) (Yoona & Huang, 2010) (Boulon, et al., 2012). Debido a la complejidad de los fenómenos físicos en ellos,

Dirección de contacto:

Gabriel Correa Perelmuter, Dr. Luis Novillo Martínez 1250 CP 5016, Córdoba. Tel: 0351-153337718, gabrielcorrea.cba@gmail.com

así como la falta de información sobre los materiales utilizados, y con el fin de obtener un modelo de menor esfuerzo computacional, que conserve el significado físico de cada elemento, se realizó el mismo con parámetros concentrados con tratamiento unidimensional. El modelo de elementos concentrados simplifica la descripción del comportamiento de los sistemas físicos distribuidos espacialmente en una topología que consiste en entidades discretas que se aproximan al comportamiento del sistema distribuido bajo ciertos supuestos.

Los modelos dinámicos son herramientas poderosas, que, sobre la base de varios perfiles de ciclos de manejo y condiciones de contorno, hacen que sea posible llevar a cabo simulaciones de todo el ciclo, analizar el rendimiento del sistema de pila de combustible y baterías, y prever posibles problemas antes de que se lleven a cabo las pruebas de campo. En particular, después de una debida validación a través de sistemas reales, estos pueden representar una herramienta potente para proyectos futuros, así como para el diseño y desarrollo de componentes de sistemas con el fin de mejorar la configuración para su uso específico. Además, podrían ser de ayuda en el diseño de los componentes de pila y el balance de planta de la misma, por ejemplo, sistemas de humidificación, el circuito de refrigeración, así como la lógica de control de la temperatura y la interfaz eléctrica.

SELECCIÓN DE VEHÍCULO Y COMPONENTES (TREN DE POTENCIA)

La selección de la carrocería base con la cual trabajar se ha realizado en función de un aspecto fundamental: el vehículo debería ser de producción local. Las empresas que fabrican autos de manera completa en la ciudad de Córdoba son Fiat y Renault, actualmente con los modelos Palio y Siena por la primera y Clio, Symbol, Fluence y Kangoo por la segunda. Se optó por la elección de un auto pequeño y compacto, ya que incurre en menor gasto energético, son más económicos y son los más aceptados por el público en general.

Debido a las características tales como peso y precio se decidió trabajar con el Renault ClioMio 3 puertas.

Tren de potencia

La principal fuente de energía es el hidrógeno almacenado en un recipiente a presión (350 bar), el cual se transforma en electricidad en la pila de combustible (FC Stack), con el auxilio de una batería de ion-litio para los momentos en que ésta no llega a generar la potencia requerida, lo cual puede deberse a retrasos en la respuesta de la pila, picos de potencia o simplemente porque supera la capacidad de la misma.

Esta electricidad se transforma en movimiento en un motor eléctrico y a través de un diferencial se transmite el torque a las ruedas delanteras. Aunque en este trabajo no se lo considera, el motor brushless elegido para la impulsión del vehículo tiene la capacidad de funcionar como freno regenerativo absorbiendo energía mecánica y transformándola en energía eléctrica para almacenar en las baterías. El sistema de control del vehículo toma el orden del conductor y gestiona el flujo de energía necesaria para cumplir con lo requerido habilitando el paso de electricidad desde el FC Stack o, si la potencia no es suficiente, desde la

Batería a través de los convertidores DC/DC y alimentando el motor con el Inversor DC/AC. Cada subsistema, a su vez, tiene su propio sistema de control y dispositivos auxiliares necesarios para su correcto funcionamiento.

En la Fig. 1 se puede ver un diagrama con tren de potencia adoptado.

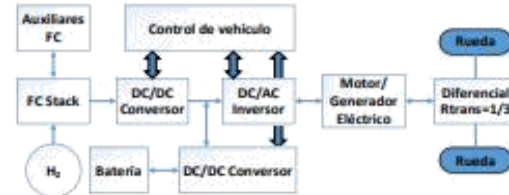


Fig. 1: Tren de potencia adoptado.

Como la mayoría del tiempo la pila de combustible funciona a potencias menores de 20 kW (ver sección SIMULACIÓN COMPUTACIONAL) y tendríamos un sistema completamente sobredimensionado, se seleccionó una pila de combustible que entregue la mayoría de la energía requerida (según nuestro criterio entre el 80 y el 90 %) y una batería que tenga una capacidad de potencia suficiente para abastecer al sistema en los momentos picos o cuando la pila no alcance la potencia requerida, además de poder almacenar energía residual de las pilas o proveniente del freno regenerativo. Por lo tanto se decidió utilizar una pila de combustible de 15 kW con un tanque de H2 de 1,79 kg complementada con una batería de 30 Ah capaz de drenar una potencia pico de al menos 60 kW.

MODELO DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN

Modelo de las fuerzas en el auto y potencia eléctrica requerida

Para computar la energía necesaria para la automoción se consideraron los efectos de rodadura de la rueda, de fuerza gravitatoria en una pendiente y de resistencia aerodinámica (Gao, et al., 2010). Estos efectos se modelan como fuerzas aplicadas al automóvil, las cuales deben ser vencidas por el torque aplicado a la rueda.

Los efectos de rodadura se calculan como se indica en la ecuación(1). Donde f_r es el factor de resistencia a la rodadura y se puede obtener con la ecuación(2), tomando $f_0 = 0,013$ y $K = 6,51 \cdot 10^{-6} [s^2/m^2]$ (Genta, 2006).

$$F_r = M \cdot f_r \cdot \cos(\alpha) \quad (1)$$

$$f_r = f_0 + K \cdot V^2 \quad (2)$$

La ecuación (3) considera la sumatoria de fuerzas teniendo en cuenta el torque producido por la rueda y el radio deformado de la misma.

$$\begin{aligned} M \cdot a &= M \cdot \frac{dV}{dt} = T_r / r_d - F_r - F_a - F_g \rightarrow \\ \rightarrow T_r / r_d &= M \cdot \frac{dV}{dt} + F_r + F_a + F_g \end{aligned} \quad (3)$$

La rueda se acopla al motor a través de un diferencial con una relación de reducción $i = \omega_r / \omega_m = 1/3$. La pila de combustible y la batería se conectan al motor a través de un convertor DC/DC primero y un inversor DC/AC luego.

Para conocer la potencia necesaria se deben tener en cuenta los rendimientos de los diversos componentes que integran el sistema. Para los componentes electrónicos se consideró un rendimiento 0,95 para cada componente, $\eta_{elec}=0,95, 0,95$, de acuerdo con la literatura; el rendimiento del diferencial se consideró como $\eta_{mec}=0,85$ (Heißing & Ersoy, 2011). Para definir el rendimiento del motor (η_{mot}) se utilizaron las especificaciones del fabricante y se construyó un mapeo del rendimiento en función de la potencia requerida en el motor y las revoluciones del mismo.

$$T_m = T_r \cdot i / \eta_{mec} \rightarrow P_m = T_m \cdot \omega_m \rightarrow P_r = \frac{P_m}{(\eta_{elec} \cdot \eta_{mot})} \quad (4)$$

Finalmente

$$P_r = \frac{\left(\frac{dV}{dt} + (f_0 + K \cdot V^2) \cdot \cos(\alpha) + \frac{1}{2} C_D \cdot \rho \cdot V^2 + g \cdot \sin(\alpha) \right) \cdot M \cdot V}{(\eta_{elec} \cdot \eta_{mec} \cdot \eta_{mot})} \quad (5)$$

Modelo de Batería

Se ha optado por el empleo de un Stack de baterías Li-Po. El modelo desarrollado está basado en resultados experimentales sobre una batería nueva no teniendo en cuenta el envejecimiento de la misma, factor que influye de manera inversa en la cantidad de energía que se puede almacenar.

Las variables de entrada son la temperatura ambiente y la potencia requerida; y las salidas son la potencia entregada y el calor cedido a la atmósfera.

La batería puede simplificarse a un simple acumulador de carga que entrega una tensión variable (E) con una cierta resistencia interna (R_{si}, R_o) y una característica de respuesta transitoria (representada por C_n) (Huria, et al., 2012).

$$V_{(s)} = E_{(s)} - I_{(s)} \left(R_s + \frac{R_o}{R_o C_n s + 1} \right) \quad (6)$$

Estado de descarga (SOD)

$$SOD(I_{(t)}, t) = SOD_{inicial} + \frac{1}{Cap_{bat}} \int_0^t I_{(t)} dt \quad (7)$$

$$E(I_{(t)}, T_{(t)}, SOD(I_{(t)}, t), t) = f_1(SOD(I_{(t)}, t), I_{(t)}) + f_2(SOD(I_{(t)}, t), T_{(t)}) \quad (8)$$

Donde, $I(t)$ es la corriente de descarga de la batería, Cap_{bat} es la capacidad máxima de la batería, $SOD_{inicial}$ es el estado de descarga en el que quedó la batería del estado anterior y f_1 y f_2 son funciones empíricas de descarga de una batería determinada.

Características de descarga

Este modelo está basado en resultados experimentales de los fabricantes de baterías, de modo que haciendo uso de las características de descarga se determina la tensión a bornes de la batería para cada instante.

El fabricante provee, entre otros datos, las curvas de descarga $E=f(SOD)$ para distintas tasas de descarga y las de $E=f(SOD)$ para distintos valores de temperatura.

En primer lugar, se obtuvo la función $f_1(SOD(I_{(t)}, t), I_{(t)})$, la cual determina la tensión para cada par de valores [SOD, I] (Fig. 2); esta función tiene implícita la curva de

polarización de la batería $E=f(I_{(t)})$. Esta función f_1 , se cumple solamente para cuando la temperatura de la batería es de 25 °C, por lo que se debió adicionar la función $f_2(SOD(I_{(t)}, t), T_{(t)})$, que tenga en cuenta los cambios de temperatura. Esta función f_2 , para cada par de valores [SOD, T] (Fig. 3), entrega la corrección de tensión por temperatura ΔE (González & Acevedo, 2010).

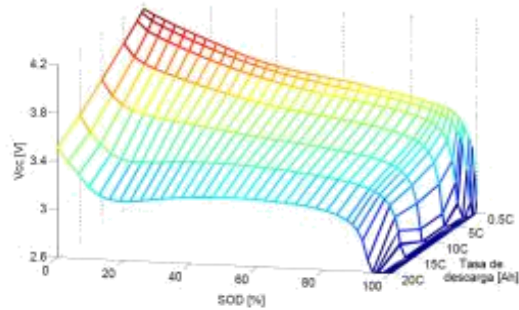


Fig. 2: Característica de descarga a 25 °C.

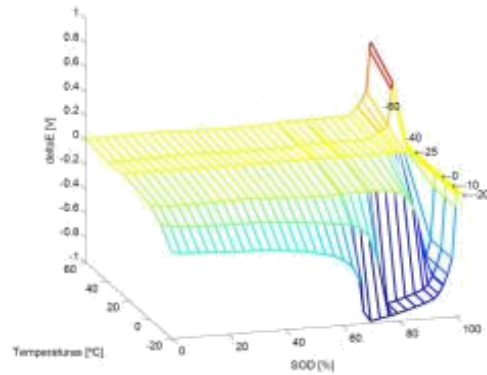


Fig. 3: delta E en función de la Temperatura y el SOD a 1 C.

Modelo térmico

Como la tensión de vacío depende de la temperatura interna de la batería, esta debe ser calculada dinámicamente durante la simulación. El cambio de temperatura de la batería está gobernado por el balance de energía que se describe a continuación:

$$m_{bat} \cdot C_p \frac{dT_{(t)}}{dt} = I_{h_0}^2 \cdot R_s + I_{h_0}^2 \cdot R_o - h_c \cdot A (T_{(t)} - T_{amb}) \quad (9)$$

Donde, m_{bat} es la masa total de la batería, C_p es la capacidad calorífica, $I_{h_0}^2 \cdot R_s$ es el calor generado por la resistencia R_s , $I_{h_0}^2 \cdot R_o$ es el calor generado por la resistencia R_o , h_c coeficiente de transferencia de calor y A es el área de transferencia de calor.

Validación del modelo

La validación del modelo se realizó con los resultados relevados en uno de los vuelos del proyecto ENFICA (Romeo, et al., 2012). Como valor de entrada, el modelo utiliza la potencia requerida por el avión y da como respuesta un valor de potencia, corriente, voltaje,

temperatura y SOD los cuales fueron comparados con los valores que se midieron durante el vuelo.

Con el objetivo de obtener una respuesta lo más cercana posible a la que el sistema real tendría en condiciones similares, se realizó un proceso de optimización de parámetros del modelo. El modelo contiene cinco parámetros de valor desconocido: el calor específico equivalente del Stack C_p , el coeficiente de transferencia de calor h_c , las resistencias internas de la batería R_s y R_b y el capacitor del circuito interno de la batería C_b .

Como primera aproximación se tomaron valores de literatura.

Debido a que se dispone de datos experimentales del proyecto ENFICA (Romeo, et al., 2012) se utilizó el mismo tipo de baterías (56 celdas KOKAM de 30 Ah de alta capacidad) para realizar la optimización de parámetros. En primer lugar se aplicó un factor de corrección de la tensión para obtener, con la batería completamente cargada, el mismo valor que en el vuelo. Esta discrepancia es atribuida al efecto de envejecimiento de la batería que no se tiene en cuenta en el modelo desarrollado. Luego, utilizando la función `fminsearch()` disponible en la librería de Matlab, se optimizaron los parámetros tomados de literatura minimizando el error en la tensión y la temperatura.

Obteniéndose los siguientes valores:

TABLA 1: CONSTANTES DE LA BATERÍA

| Parámetro | Literatura | Optimizado |
|-----------|------------|------------|
| R_s | 0.0425 | 0.0104 |
| R_{ts} | 0.0155 | 0.0231 |
| C_{ts} | 100 | 10000 |
| C_p | 1062 | 177,2418 |
| h_c | 10 | 2,3395 |

Los resultados se pueden ver en las Fig. 4 y Fig. 5:

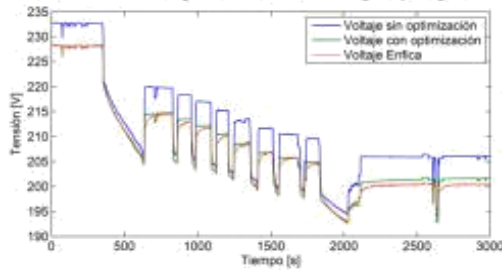


Fig. 4: Comparación Tensiones Modelo – ENFICA.

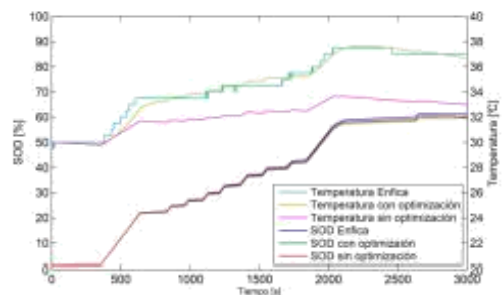


Fig. 5: Comparación SODs y Temperaturas Modelo – ENFICA. Resultado optimización

Como se puede ver, la optimización de los parámetros mejoró sustancialmente el comportamiento eléctrico y térmico del modelo (ver Tabla 2), y se puede decir que es capaz de predecir el comportamiento del sistema con un error relativamente bajo.

$$e[\%] = \frac{100\%}{n} \sum_1^n \frac{\text{ValorModelo}_n - \text{ValorENFICA}_n}{\text{ValorENFICA}_n} \quad (10)$$

TABLA 2: ERRORES EN LOS PARÁMETROS DE LA BATERÍA

| Parámetro | INICIAL | OPTIMIZADO |
|-------------|---------|------------|
| Tensión | 2,27 % | 0,46 % |
| SOD | 3,01 % | 2,05 % |
| Temperatura | 7,93 % | 1,10 % |

Modelo de la Celda de Combustible

El modelo de celda de combustible fue extraído del trabajo de (Correa, et al., 2011). Dicho modelo se implementó para una pila y los sistemas de las instalaciones auxiliares (BoP) que son capaces de caracterizar los fenómenos transitorios, incorporando simultáneamente tres importantes aspectos dinámicos: los cambios de temperatura en la pila de combustible, los cambios de flujo en los canales, y la respuesta dinámica en términos del efecto capacitivo de las capas dobles de carga en los electrodos de la pila PEMFC. Este modelo describe los efectos térmicos y fluido-dinámicos de los componentes de BoP, así como el comportamiento electroquímico de la pila de combustible.

Modelo del motor

El modelado del motor se realizó con el objetivo de conocer la respuesta temporal del mismo, como también la corriente y la tensión que demanda frente a los requerimientos de torque y revoluciones establecidos por los ciclos de manejo.

Los motores brushless tienen el mismo principio de funcionamiento que los de corriente continua, la diferencia radica en la manera en que se produce la conmutación. Desde el punto de vista del modelado, y para los fines de este trabajo, se puede considerar que no hay diferencias entre uno y otro.

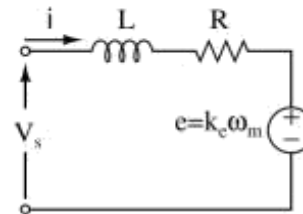


Fig. 6: Circuito equivalente de un motor de CC.

En la figura se muestra el circuito equivalente de un motor de corriente continua, el cual puede ser descrito por las siguientes ecuaciones:

$$V_s = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + e \quad (11)$$

$$T_c = k_f \cdot \omega_m + J_n \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \quad (12)$$

La fuerza contra electromotriz inducida (e) y el torque eléctrico (T_e) tienen la siguiente expresión:

$$e[V] = k_e [V \cdot s] \cdot \omega_m [s^{-1}] \quad (13)$$

$$T_e [Nm] = k_e \left[\frac{Nm}{A} \right] \cdot i [A] \quad (14)$$

Operando y aplicando transformada de la Laplace:

$$I(s) = \frac{V_s(s) - k_e \cdot \omega_m(s)}{R + L \cdot s} \quad (15)$$

$$\omega_m(s) = \frac{k_e \cdot I(s) - T_L(s)}{k_f + J_m \cdot s} \quad (16)$$

A través de estas ecuaciones se puede realizar el modelo de control del motor.

Modelo de control del motor

El motor se puede comandar a través de la velocidad o del torque. Se eligió hacerlo en función de la velocidad de giro del eje ya que el objetivo es cumplir con los ciclos de manejo establecidos.

Se armó el circuito interno del motor en Simulink empleando las ecuaciones antes descriptas y se realizó la compensación del sistema utilizando el método de Ziegler-Nichols en lazo abierto y lugar de raíces, previamente linealizado el torque requerido a una velocidad de 70 km/h (221,127 rad/s). La respuesta frente a un escalón de 70 km/h antes y después de compensar se puede ver en la Fig. 7.

Cabe destacar que se consideró la inercia total del vehículo acoplada al eje del motor debido a problemas surgidos durante las simulaciones, de modo que el frenado del mismo se lleva a cabo desde el motor, funcionando como freno regenerativo o dinámico.

La tensión a bornes del motor es proporcional a la diferencia entre las revoluciones requeridas y las que está dando el mismo en cada momento. Cuando se pide una aceleración positiva, la tensión y la corriente son positivas, el motor está entregando energía mecánica en su eje a costa de un consumo eléctrico. Debido a que la inercia del vehículo está vinculada al eje del motor en las ecuaciones constitutivas del mismo y no se modeló el frenado, el motor ajusta su funcionamiento para cumplir con los requerimientos de los ciclos. Cuando la velocidad requerida disminuye, la tensión aplicada también lo hace y el valor de la fuerza contra electromotriz debida al giro del eje puede llegar a superarla, ocasionando que la corriente tome valores negativos y el motor funcione como freno regenerativo. En caso que la diferencia con la velocidad requerida sea aún mayor, la tensión toma valores negativos al igual que la corriente, funcionando en este caso como un freno dinámico.

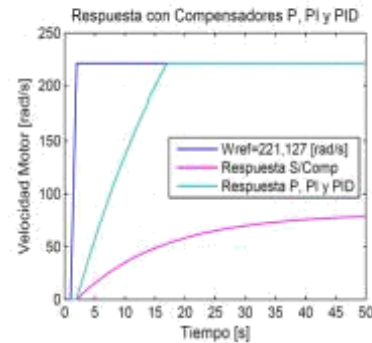


Fig. 7: Respuesta frente a una entrada escalón de 70 km/h.

CICLOS DE MANEJO

Se han utilizado en las simulaciones ciclos de manejo internacionales (EPAH, FTP 75, ECU) y algunos recorridos en la ciudad de Córdoba realizados con el fin de representar las condiciones reales de manejo en esta ciudad. Se han realizado distintos recorridos típicos dentro de la ciudad de Córdoba a fin de recolectar los datos de alturas, distancias y velocidades por medio de un GPS resultando en cinco ciclos de manejo, llamados CBA 1, CBA 2, CBA 3, CBA 4 y CBA 5. Los primeros cuatro son desde o hacia el microcentro de la ciudad y el último de ellos por Avenida Circunvalación.

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

Se realizaron las correspondientes simulaciones sobre el modelo completo del auto, previamente ensamblado con cada uno de los modelos descritos. Por simplicidad se presentan los resultados de un solo ciclo, CBA 5, el cual es el más exigente de los utilizados. Este ciclo recorre la Av. Circunvalación desde la zona sur (Av. Valparaíso) hasta la norte (Av. Rancagua); el objetivo fue relevar el consumo manteniendo la velocidad lo más constante posible a 100 km/h. El mismo fue realizado un día entre semana a las 19:50 Hs.

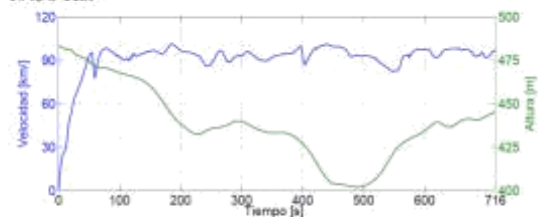


Fig. 8: CBA 5 - Altura y velocidad en función del tiempo.

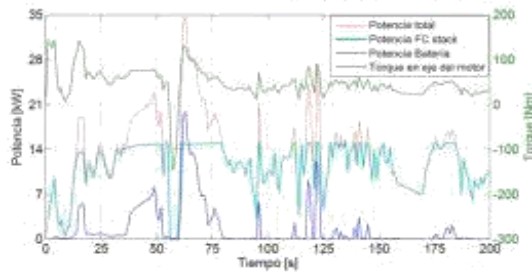


Fig. 9: Potencias y torques requeridos - Ciclo CBA 5 (Zoom 200s).

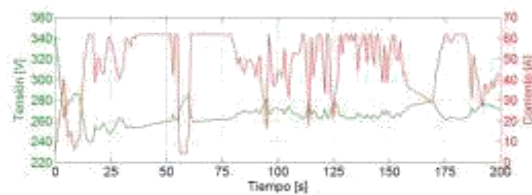


Fig. 10: Tensión y corriente en el FC stack - Ciclo CBA 5 (Zoom 200s).

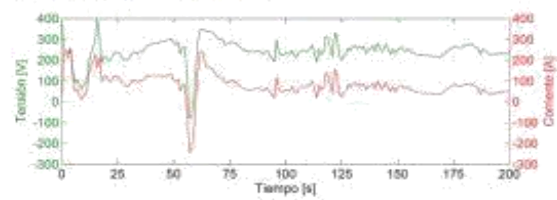


Fig. 11: Tensión y corriente en el Motor - Ciclo CBA 5 (Zoom 200s).

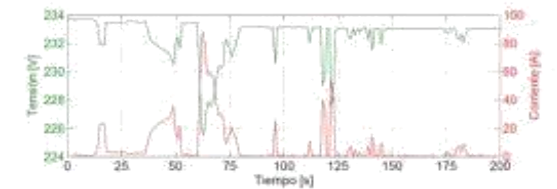


Fig. 12: Tensión y corriente en la batería - Ciclo CBA 5 (Zoom 200s).

En la siguiente tabla se reproducen todos los resultados de las simulaciones de los 8 ciclos utilizados.

TABLA 3: RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

| Ciclo | CBA1 | CBA2 | CBA3 | CBA4 | CBA5 | EUC | FTP | EPAH | |
|------------------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Distancia recorrida [km] | 14,157 | 14,580 | 11,409 | 7,690 | 18,172 | 0,994 | 17,769 | 16,507 | |
| Energía total req. [kWh] | 2,4929 | 2,605 | 1,9338 | 1,3321 | 3,5347 | 0,1375 | 2,9348 | 2,8378 | |
| Km/kWh | 5,679 | 5,597 | 5,900 | 4,773 | 5,141 | 7,230 | 6,055 | 5,817 | |
| Stack FC | Energía kWh | 2,0806 | 1,8799 | 1,3228 | 1,1945 | 2,7264 | 0,1302 | 2,4948 | 2,4542 |
| | % total | 83,46 | 72,17 | 68,40 | 89,67 | 77,13 | 94,69 | 85,01 | 86,48 |
| | Masa H2 [kg] | 0,1401 | 0,1206 | 0,0812 | 0,0764 | 0,1431 | 0,0091 | 0,1494 | 0,1303 |
| | % tanque ^{a)} | 8,42 | 7,24 | 4,88 | 4,59 | 8,60 | 0,55 | 8,97 | 7,83 |
| Rend. [%] ^{b)} | 44,55 | 46,76 | 48,87 | 46,90 | 57,16 | 42,92 | 50,10 | 56,50 | |
| Batería | Energía kWh | 0,4123 | 0,7251 | 0,6110 | 0,1376 | 0,8083 | 0,0073 | 0,4400 | 0,3836 |
| | % total | 16,54 | 27,83 | 31,60 | 10,33 | 22,87 | 5,31 | 14,99 | 13,52 |
| | SOD [%] ^{c)} | 7,53 | 13,68 | 11,50 | 2,47 | 14,97 | 0,13 | 8,06 | 6,98 |
| Autonomía [km] ^{d)} | 168,21 | 106,59 | 99,19 | 167,57 | 121,35 | 181,86 | 198 | 210,89 | |
| Energía disponible | kWh | 0,6541 | 0,5476 | 0,4736 | 0,3565 | 0,0330 | 0,0277 | 0,4876 | 0,0855 |
| | en el freno % | 26,24 | 21,02 | 24,49 | 26,76 | 0,93 | 20,15 | 16,61 | 3,01 |

- a) Considerando 93% de la masa como máxima descarga del tanque de H₂ y la capacidad del mismo de 1,79 kg.
- b) Calculado como la energía obtenida a bornes dividido la energía disponible en el H₂ consumido, considerando un poder calorífico del H₂ de 120000 kJ/kg.
- c) Teniendo en cuenta que la profundidad máxima de descarga es del 80%.
- d) En color blanco cuando está limitada por el H₂ disponible y en gris por la energía de la batería.

DISCUSIÓN

Comparación de consumos entre un auto eléctrico y de combustión interna en Argentina

Aprovechando que los recorridos de CBA 4 y CBA 5 fueron realizados con un Renault Clio Mío y se midieron los consumos de combustible, se efectuó un análisis comparativo entre el costo de la nafta, un potencial costo del hidrógeno consumido y la carga de las baterías utilizando la red de EPEC (Ente Provincial de Energía de Córdoba, tarifa para la ciudad de Córdoba). Si bien los precios de los combustibles en el país están distorsionados

se decidió igualmente hacer esta comparación para tener una idea de los costos al menos en la actualidad.

El precio del hidrógeno se obtuvo de un estudio de factibilidad de producción de hidrógeno por electrólisis y energía eólica en la Patagonia Argentina (Giudici, 2008) que establece un valor de entre 4,43 y 7,01 US\$/kg (entre 24,68 y 39,05 \$/kg al cambio de la fecha) teniendo en cuenta todo el costo de inversión, almacenamiento y transporte por medio de una tubería de alta presión hasta la ciudad de Buenos Aires. Como este trabajo se propone para Córdoba, a los fines prácticos este valor calculado sirve de todas maneras.

El consumo de nafta fue directamente relevado del auto. Se propuso un precio promedio de \$8 por litro. Realizando la simulación del modelo con los ciclos de manejos

correspondientes se extrajo el consumo de H_2 en kg, la energía suministrada por la batería en kWh y la energía total requerida por el ciclo en kJ. Para determinar la eficiencia, se supuso un poder calorífico del H_2 de 120.000 kJ/kg y un rendimiento de la recarga de la batería del 100 % (ver Tabla 4).

TABLA 4: COSTOS COMPARATIVOS ENTRE NAFTA Y ELECTRICIDAD EN CIRCUITOS CBA 4 Y CBA 5.

| Combustible | CBA 4 | | CBA 5 | | | |
|----------------------------|--------|-------------------------|---------------------|----------|-------------------------|---------------------|
| | Nafta | $H_2^{(a)}$ (Eólico) | Bat. ^(a) | Nafta | $H_2^{(a)}$ (Eólico) | Bat. ^(a) |
| Consumo | 0,7 L | 0,076 kg | 0,138 kWh | 1 L | 0,143 kg | 0,808 kWh |
| Distancia [km] | 8 | 7,9 | 17,2 | 18,172 | | |
| Costo | \$5,60 | \$2,98 | \$0,05 | \$8 | \$5,59 | \$0,27 |
| Energía Combustible[kJ] | 20325 | 9168 | 2903 6 | 20081,88 | | |
| Energía Simulación[kJ] | | 4795,56 | | 12724,92 | | |
| Eficiencia [%] | 23,59 | 52,30 | 43,82 | 63,37 | | |

^(a)A un costo promedio de \$0,34 el [kWh] para Grandes consumidores de EPEC (Sin Subsidio). (EPEC, 2013).

^(b)Adoptando un valor de 7 U\$S/kg (39,05 \$/kg al cambio de la fecha) según se describió arriba.(Giudici, 2008).

Considerando hipotéticamente que todos los autos de la ciudad de Córdoba se convierten al sistema de propulsión por pilas de combustible y baterías, teniendo en cuenta el consumo anual promedio, suponiendo unos 20.000 km recorridos y sabiendo que el parque automotor de la ciudad está compuesto por 382.150 autos al año 2012 (Municipalidad de Córdoba, 2012), sería necesario producir al año una cantidad de 67.050,51 toneladas de hidrógeno (un equivalente de 183,7 toneladas por día) y 236.544,13MWh de energía eléctrica (648,07MWh por día) para recargar las baterías.

Si el hidrógeno fuera producido a través de la electrólisis del agua serían necesarios unos 3.084.323,46MWh de energía eléctrica por año o 8.450,2MWh por día, considerando un equivalente energético del hidrógeno de 46 kWh/kg, como promedio entre 40 kWh/kg (Hydrogen Energy Systems, 2013) y 52,5 kWh (Rodríguez, et al., 2010). Esta energía representa el 35 % de la energía eléctrica total producida en la provincia de Córdoba (Secretaría de Energía, 2013). Si la energía eléctrica fuera obtenida por generadores eólicos, sería necesario instalar una potencia eólica mayor a cien veces la actual del país, es decir aproximadamente 7000 MW, si se tiene en cuenta que los 60 MW de potencia eólica instalada a lo largo del país producen anualmente unos 26.231 MWh (Secretaría de Energía, 2013). Cabe destacar que en la provincia de Córdoba hay un enorme potencial de este recurso, por ejemplo, el departamento Río Cuarto tiene una capacidad de generación eólica de 398 millones de MWh (Rodríguez, et al., 2010).

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista técnico, un auto propulsado por pilas de combustible y baterías es totalmente viable para la ciudad de Córdoba, logrando alcanzar autonomías similares

a la gasolina. Su comportamiento demostró una óptima capacidad de superar los desniveles propios de la ciudad y los requerimientos de velocidad en las principales vías de acceso al centro.

Uno de los inconvenientes encontrados, al igual que en todo proceso innovador, es que se requiere una gran inversión inicial; en este caso para producir y abastecer a los usuarios con el hidrógeno necesario. Además del elevado costo de producción de los componentes que encarecen el costo del auto y que afortunadamente van disminuyendo conforme avanzan los proyectos de investigación y desarrollo.

Si bien la eficiencia desde el pozo a la rueda de los sistemas de propulsión a gasolina y los híbridos a baterías y pilas de combustible son similares, sin embargo el impacto medioambiental producido por éstos últimos está limitado a la obtención del combustible, el cual puede reducirse casi en su totalidad si se emplean fuentes de energía limpia, cosa que no ocurre con los combustibles fósiles. En cuanto al ruido los autos eléctricos demostraron ser muy silenciosos.

Otras de las grandes ventajas de este sistema propuesto son el bajo mantenimiento que requiere, la simplicidad en la conducción, el costo del hidrógeno y la electricidad para las baterías es menor que el de la gasolina, tiene mayor eficiencia total, tiene la posibilidad de recuperar energía sin el agregado de componentes extras al sistema original y las ya mencionadas reducciones en la contaminación.

SIMBOLOGÍA Y ACRÓNIMOS

| | |
|--------------------|---|
| C : | Tasa de carga y descarga de la batería [1/h] |
| C_{bat} : | Capacidad de la batería [Ah] |
| C_D : | Coficiente de arrastre (drag) en el eje x [-] |
| C_{in} : | Capacidad interna de la batería [F] |
| E : | Tensión electroquímica de la batería [V] |
| F_a : | Fuerza en la rueda para vencer el efecto de arrastre aerodinámico [N] |
| F_g : | Fuerza en la rueda para vencer el efecto de la pendiente [N] |
| f_r : | Coficiente de resistencia a la rodadura |
| F_r : | Fuerza en la rueda para vencer el efecto de rodadura [N] |
| i : | Relación de transmisión del diferencial [-] |
| i_c : | Corriente de crossover de hidrógeno [A] |
| I_s : | Corriente drenada por la batería [A] |
| M : | Masa del automóvil [kg] |
| P_m : | Potencia eléctrica [kW] |
| P_r : | Potencia en la rueda [kW] |
| r_d : | Radio de la rueda deformada [m] |
| R_i y R_{ic} : | Resistencias internas de la batería [Ω] |
| T : | Temperatura [$^{\circ}C$] |
| T_m : | Torque en el eje motor [Nm] |
| T_r : | Torque en la rueda [Nm] |
| V : | Tensión a bornes de la batería [V] |
| V : | Velocidad del auto [m/s] |
| η_{elec} : | Eficiencia de los componentes electrónicos [-] |
| η_{mec} : | Eficiencia mecánica [-] |
| η_{mot} : | Eficiencia del motor [-] |
| ω_m : | Velocidad angular del eje motor [rad/s] |
| ω_r : | Velocidad angular de la rueda [rad/s] |

BoP: Sistemas auxiliares (Blance of Plant)
CC: Corriente continua
FC: Celda de combustible (Fuel Cell)
FC Stack: Pila de celdas de combustible
PEM: Membrana de intercambio protónico (Protonic Exchange Membrane)
SOC: Estado de carga (State of Charge)
SOD: Estado de descarga (State of Discharge)

REFERENCIAS

[1] P. Adcock, A. Kells and C. Jackson, (2008) "PEM Fuel Cells for Road Vehicles," in International Advanced Mobility Forum, Geneva.

[2] J. Cunningham, M. Hoffman, R. Moore and D. Friedman (1999), "Requirements for a Flexible and Realistic Air Supply Model for Incorporation Into a Fuel Cell Vehicle (FCV) System Simulation," SAE, vol. 01, no. 2912.

[3] F. Gao, B. Blunier, A. Miraoui and A. El Moudni, (2010) "A Multiphysics Dynamic 1-D Model of a Proton-Exchange-Membrane Fuel-Cell Stack for Real-Time Simulation," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 57, no. 6, pp. 1853 – 1864.

[4] G. Genta (2006), Motor Vehicle Dynamics, Modeling and Simulation, Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

[5] L. Guzzella (1999), "Control oriented modelling of fuel cell based vehicles," in Presentation in NSF Workshop on the Integration of Modeling and Control for Automotive Systems.

[6] A. Miotti, A. Di Domenico, Y. Guezennec and S. Rajagopalan (2005), "Control-oriented model for an automotive PEM fuel cell system with imbedded 1+1D membrane water transport," in Vehicle Power and Propulsion, Chicago.

[7] G. Correa, F. Borello and M. Santarelli (2011), "Sensitivity Analysis of Temperature Uncertainty in an Aircraft PEM Fuel Cell," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 36, no. 22, pp. 14745-14758.

[8] W. Yoon and X. Huang (2010), "A Multiphysics Model of PEM Fuel Cell Incorporating the Cell Compression Effects," Journal Electrochemical Society, vol. 157, no. 5, pp. B680-B690.

[9] L. Boulon, K. Agbossou, D. Hissel, P. Sicard, A. Bouscayrol and M.-C. Péra (2012), "A macroscopic PEM fuel cell model including water phenomena," Renewable Energy, vol. 46, pp. 81-91.

[10] Secretaría de Energía (2013), "Secretaría de Energía de la República Argentina," [Online]. Available: <http://energia3.mecon.gov.ar>.

[11] T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzarri and R. Jackey (2012), "High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells," in Electric Vehicle Conference (IEVC).

[12] A. Golzález and J. M. Acevedo (2010), "Implantación de Vehículos Eléctricos en el Ayuntamiento de Vigo," Vigo.

[13] Y. Gao, M. Ehsani and A. Emadi (2010), Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory, and Design, Second Edition ed., Boca Raton, Florida: CRC Press.

[14] B. Heißing and M. Ersov, Chassis Handbook (2011), Primera edición ed., Berlin: Vieweg+Teubner.

[15] G. Romeo, F. Borello, G. Correa and E. Cestino (2012), "ENFICA-FC: Design of transport aircraft powered by fuel cell & flight test of zero emission 2-seater aircraft powered by fuel cells fueled by hydrogen," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 38, no. 1, p. 469-479.

[16] F. A. Giudici, "Feasibility study of hydrogen production using electrolysis and wind power in Patagonia, Argentina," Florida, 2008.

[17] EPEC, "EPEC," 2013. [Online]. Available: http://www.epec.com.ar/docs/cuadro-tarifario/tarifa_n3_Res202.pdf. [Accessed 1 10 2013].

[18] Municipalidad de Córdoba (2012), "Córdoba una ciudad en cifras, guía estadística de la ciudad de Córdoba," Córdoba.

[19] Hydrogen Energy Systems (2013), "Hydrogen Energy Systems," [Online]. Available: <http://heshydrogen.com>.

[20] C. R. Rodríguez, M. Riso, G. Jiménez Yob, R. Santa Cruz, S. Aisa, G. Jeandrevin and E. P. M. Leiva (2010), "Analysis of the potential

for hydrogen production in the province of Córdoba, Argentina, from wind resources," International Journal of Hydrogen Energy, no. 35, pp. 5952-5956.

[21] M. Hannana, F. Azidina and A. Mohameda (2014), "Hybrid electric vehicles and their challenges: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 29, p. 135-150.

[22] Z. Hengbing and A. Burke (2008), "Modeling and Optimization of PEMFC Systems and its Application to Direct Hydrogen Fuel Cell Vehicles," Institute of Transportation Studies, University of California, Davis.



Cuadernos del CENDES

ISSN: 1012-2508

cupublicaciones@ucv.ve

Universidad Central de Venezuela
Venezuela

Mercado, Alexis; Córdova, Karenia
Desarrollo tecnológico en baterías e impulsión eléctrica ¿Sistemas tecnológicos disruptivos
promovidos por imperativos ambientales?
Cuadernos del CENDES, vol. 31, núm. 85, enero-abril, 2014, pp. 1-21
Universidad Central de Venezuela
Caracas, Venezuela

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40331800002>

Desarrollo tecnológico en baterías e impulsión eléctrica ¿Sistemas tecnológicos disruptivos promovidos por imperativos ambientales?

ALEXIS MERCADO
KARENIA CÓRDOVA*

pp. 1-21

Resumen

Parte importante de las emisiones globales de CO₂—que en 2011 superaron el nivel crítico para el clima según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático de la ONU— proviene del transporte automotor, planteando severos cuestionamientos al sistema tecnológico de locomoción basado en combustión interna. El acelerado desarrollo científico-tecnológico en baterías e impulsión eléctrica está conformando sistemas disruptivos que promoverán industrias nuevas, impactando la economía y pudiendo incluso inducir una revolución tecnológica que modificará la matriz energética imperante. El surgimiento de estos sistemas es impulsado básicamente por factores socioinstitucionales que responden principalmente al imperativo ambiental de disminuir las emisiones de carbono, y ocurre con participación de múltiples actores en diversos ámbitos globales.

Palabras clave

Sistemas tecnológicos disruptivos / Impulsión eléctrica / Ambiente / Matriz energética

Abstract

An important part of global CO₂ emissions—which in 2011 exceeded the critical level for the climate established by the International Panel of Climate Change (IPCC)—are generated by motor transport, and poses major challenges to the technological system of locomotion based on internal combustion. Current scientific and technological developments in batteries and electric drive are generating disruptive systems resulting in new industries that begin to impact the economy. And they might even promote a technological revolution that will change the prevailing energy matrix. Such systems are mainly associated with socio-institutional factors answering to the environmental imperative of reducing carbon emissions, and are being developed by multiple actors in several global regions.

Key words

Disruptive technological systems / Electric drive / Environment / Energy matrix

Introducción

Es incuestionable que desde la década de los ochenta del siglo pasado se viene implantando un paradigma tecnoeconómico basado en la microelectrónica, afianzado más recientemente por la difusión de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) (Pérez, 2010). Este paradigma, que sustituye al que prevaleció desde la posguerra, caracterizado por el uso intensivo de energía y materiales, se sustentaría más en la agregación de valor vía conocimiento que en la incorporación y transformación de materiales, lo que supondría una atenuación en la explotación desmesurada de recursos naturales, uno de los factores que más atenta contra las posibilidades de alcanzar modos de vida más sustentables.

Sin embargo, aun cuando ciertamente el producto industrial se basa cada vez más en el conocimiento, la economía global continúa consumiendo recursos naturales de forma poco sostenible. De esta manera, y a pesar de los innumerables esfuerzos realizados desde diversos foros internacionales y nacionales para atenuar los efectos de las actividades antrópicas, es evidente el incremento de la degradación socioambiental (Mercado y Córdova, 2005). Esto llevaría a cuestionar muchos de los sistemas tecnológicos en los que se asienta la estructura económica.

En 2011, las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) superaron el nivel crítico de 32 gigatoneladas, estimado por expertos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por su denominación en inglés) como el máximo que todavía haría manejable la situación climática global (IEA, 2011), por lo que es imperativo modificar la matriz energética asentada en los combustibles fósiles. Una revisión sectorial muestra que el transporte aporta el 20 por ciento de las emisiones, cuyas dos terceras partes (alrededor del 14 por ciento) corresponden al transporte terrestre (Herzog, 2009).

La magnitud del problema dificulta mantenerse dentro de trayectorias tecnológicas basadas en energías fósiles. En este escenario, la legislación emerge como herramienta expedita para aminorar los impactos de las actividades antrópicas, destacándose que las prácticas regulatorias han inducido el desarrollo de tecnologías para reducir el impacto ambiental de la industria (Geffen, 1995), de donde cabría preguntarse si el imperativo de disminuir el impacto ambiental global puede impulsar acuerdos internacionales y legislaciones que promuevan la transformación de la estructura sociotécnica de la locomoción.

Los avances en tecnologías de baterías y en la impulsión eléctrica, sumados al incremento del ritmo de la innovación en diversas fuentes energéticas más limpias, abren posibilidades de modificar las trayectorias tecnológicas de locomoción basadas en energías fósiles. Actualmente, una multiplicidad de innovaciones disruptivas presuponen la transformación de diversos sistemas tecnológicos¹ y, aunadas a importantes cambios en la legislación ambiental

e industrial, sugieren una transformación en la locomoción automotora e incluso cambios en el paradigma tecnoeconómico (Pérez, 2002). Estos sistemas tecnológicos disruptivos, relacionados, pueden impulsar una revolución tecnológica, definida como un conjunto de innovaciones radicales que conforman una constelación de tecnologías interdependientes; un sistema de sistemas tecnológicos (Pérez, 2010) que puede modificar radicalmente la matriz energética.

Foladori e Invernizzi (2009) destacan tres dimensiones que deben considerarse a efectos de establecer la irrupción de una revolución tecnológica, que bien pueden ser aplicables al surgimiento de sistemas tecnológicos disruptivos. A saber: las características técnicas que confieren ventajas a las tecnologías emergentes frente a las vigentes; el papel de la nueva tecnología en la acumulación de capital, y su impacto en los diferentes actores sociales. Como se mostrará, el desarrollo de las tecnologías, asociadas a las baterías y a la impulsión eléctrica, impacta significativamente en todas ellas.

En el presente artículo se presenta, en primer lugar, una breve descripción histórica del desarrollo del vehículo eléctrico y algunos avances de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) en baterías e impulsión eléctrica, a objeto de analizar la emergencia de sistemas tecnológicos disruptivos, cuyos rasgos principales serían:

- ser impulsados por factores socioinstitucionales que responden a imperativos ambientales;
- generar importantes modificaciones de actividades que anteriormente estaban atadas a fuentes fijas de energía,
- que las innovaciones se desarrollan en diversos ámbitos globales asociados a los diferentes bloques económicos.

En segundo lugar se analiza cómo las políticas ambientales estimulan innovaciones en la generación y uso de la energía que modificarán la matriz energética, coadyuvando a la irrupción de un nuevo paradigma tecnológico de la locomoción. Por último, se revisan los esfuerzos que realizan empresas de las industrias automovilística y eléctrica para entrar tempranamente en esta renovada área de la producción, elemento que refuerza la tesis de la conformación de sistemas tecnológicos disruptivos.

Locomoción eléctrica, ¿nueva tecnología?

Puede sorprender, pero el desarrollo del vehículo eléctrico antecede en unas cuantas décadas al del vehículo de combustión interna. En 1830 el inventor holandés Sibrandus Stratingh diseñó un pequeño carruaje eléctrico que algunos autores consideran el precursor del carro eléctrico. Justo en esa década varios inventores en Europa y Estados Unidos desarrollaron

también artefactos de locomoción eléctrica, por lo que existen controversias con relación a quién es el creador original de este vehículo. El escocés Robert Anderson creó el primer carro con motor eléctrico entre 1832 y 1839, y en 1835 Thomas Davenport, en Estados Unidos, construyó un pequeño auto que trabajaba con electricidad (Romero, 2009).

Casi sesenta años más tarde, William Morrison fabricó el primer vehículo eléctrico que tuvo éxito comercial. El aparato estaba equipado con un motor de 4 caballos de potencia, suministrada por una batería de 24 celdas.² Los principales atributos de su desempeño eran una velocidad máxima de 22 kilómetros por hora y una autonomía de 48 kilómetros por carga (ibid.). En los años siguientes se desarrollaron modelos que atraían más a los usuarios que los vehículos de combustión interna, sobre todo porque los segundos tenían problemas de seguridad debido a combustión y explosiones.

En la primera década del siglo XX era frecuente observar vehículos eléctricos en ciudades de Estados Unidos. Para 1911, el más popular era el Detroit Electric, que podía estar equipado con baterías de níquel-hierro (Ni-Fe), desarrolladas en la década precedente por Thomas Edison; alternativas a las mucho más pesadas y poco eficientes de plomo-ácido. Cabe destacar que la mayoría de los vehículos híbridos (gasolina-electricidad) vendidos en la actualidad utilizan baterías de este tipo.

Elementos económicos y técnicos fueron determinantes para la imposición del artefacto de combustión interna. En el primer caso, la estandarización y producción en masa de los Ford modelo T permitía que estos tuvieran un precio de seiscientos dólares, muy inferior al Detroit Electric, que era cuatro veces más costoso. Además de la diferencia en precio, la autonomía de los vehículos de combustión interna era mayor –más recorrido por carga de combustible– y la conformación de una amplia estructura de distribución de los combustibles fósiles ofrecía la posibilidad de desplazarse en grandes distancias. En el segundo caso tenemos la invención del encendido eléctrico en 1912, avance importante para los usuarios porque eliminó el engorroso encendido manual. Paradójicamente, una invención eléctrica contribuía a imponer el vehículo de combustión interna y a la discontinuación de la producción de vehículos eléctricos.

En las siguientes seis décadas se consolida el paradigma tecnológico de locomoción por combustión interna. La industria automotriz se convirtió en uno de los sectores más dinámicos de la economía y en el sector productivo icónico del paradigma tecnoeconómico basado en el uso intensivo de materiales y energía. No será sino a partir del primer *shock* petrolero en 1973 cuando se vuelva la atención a los vehículos eléctricos y, en un lento pero progresivo proceso de coevolución de los sistemas físico, tecnológico, institucional y

de conocimiento (Hadfield y Seaton, 1999), se perfila, después de casi cuarenta años, un cambio en el paradigma de la locomoción.

Incremento de la investigación y desarrollo tecnológico

Una revisión de las áreas de conocimiento científico-técnicas vinculadas a baterías, materiales e impulsión eléctrica permite identificar importantes avances en el presente siglo, principalmente en torno al litio, el elemento metálico más liviano que existe, y al grafeno, material de carbono identificado hace apenas diez años. La baja densidad del litio hace posible fabricar baterías de menor peso que las convencionales (plomo/ácido o incluso níquel/hierro), que poseen alta densidad de energía (definida como la cantidad de vatios-hora que pueden ser almacenados por kilogramo de batería) y buena densidad de potencia eléctrica (cantidad de energía que puede ser liberada en un período de tiempo determinado) (Canis, 2011). El grafeno, estructura de carbono monocristalina plana de un átomo de espesor, posee dos importantes cualidades: ser un material liviano de gran resistencia y tener propiedades semiconductoras.

Tendencias en la investigación y desarrollo

Específicamente en baterías, gran parte de la investigación gira en torno a la síntesis de sales de litio para elaborar electrodos (ánodos y cátodos) y electrolitos (medio donde fluyen los iones, produciendo la electricidad a partir de la energía química acumulada en el acumulador). El objetivo es desarrollar materiales que mejoren el desempeño de las baterías (Scrosati y Garche, 2010). En cuanto al grafeno, los trabajos se orientan en dos direcciones: desarrollo de materiales para optimizar el desempeño de diferentes componentes de las baterías (electrodos y membranas) y estructuras para la fabricación de piezas y dispositivos de recuperación de energía, y el desarrollo de supercapacitores (condensadores capaces de acumular grandes cantidades de energía). En electroquímica, las investigaciones se concentran en optimizar procesos de óxido-reducción en diferentes estados (v. cuadro 1).

La mayoría de estos esfuerzos se apoyan en la nanotecnología, que permite elaborar «nuevos productos» basados en estructuras en la escala del nanómetro debido a que, aun cuando son materiales con la misma composición química, presentan estructuras diferentes que les pueden conferir distinta funcionalidad.

A objeto de estimar el peso de estas áreas de investigación, se procedió a revisar información del Science Citation Index. En el informe de Thomson Reuters, empresa responsable de esta base de datos (King y Pendlebury, 2013), en el que identifican las cien líneas de investigación (*research fronts*) más importantes en la actualidad,³ se observa que «baterías

recargables de litio-aire de alta energía» ocupan el primer lugar entre los diez frentes correspondientes a la clasificación «Matemáticas, Ciencia de la Computación e Ingeniería»; esto con un total de 49 artículos centrales (primer lugar conjuntamente con otros dos frentes), cuyo año promedio de publicación es 2011 (2010,8), recibiendo 2.006 citas (tercer lugar en número). Por su parte, «nanoalambres de silicón para ánodos de baterías de ión-litio» es el décimo frente de la clasificación «Química y Ciencia de los Materiales», con 50 artículos centrales (primer lugar en número), año promedio de publicación 2010 (2010,3) y 2.896 citaciones (segundo lugar en número).

Cuadro 1

Avances de investigación en química y materiales útiles para incrementar la densidad de energía y potencia en baterías y en el desarrollo de la impulsión eléctrica

| Área | Avance | Utilidad |
|----------------|---|--|
| Materiales | Uso del grafeno como material para la acumulación de energía. | Nuevos materiales para almacenamiento y recuperación de energía. |
| Materiales | Síntesis de sales de litio-óxido de titanio y litio-silicón para la fabricación de electrodos. | Incremento de la densidad de energía y la densidad de poder de las celdas. |
| Materiales | Estructuras sándwich grafeno-silicón-grafeno mediante procesos nanotecnológicos para fabricación de ánodos. | Incremento significativo de la densidad de energía y la densidad de poder de las celdas. |
| Materiales | Desarrollo de nanotubos compósitos de carbono-polímeros para fabricación de ánodos. | Incremento de la conductividad. |
| Materiales | Desarrollo de membranas conductoras para ser usadas como electrolitos. | Incremento de la confiabilidad y seguridad de las celdas. |
| Materiales | Nuevos materiales de grafeno. | Materiales para la fabricación de carrocerías que almacenen energía. |
| Electroquímica | Reversibilidad de las reacciones de óxido-reducción de los electrodos de litio en medios electrolíticos. | Incremento de la conductividad y extensión de la vida útil de las baterías. |
| Electroquímica | Soluciones orgánicas y líquidos iónicos como electrolitos. | Mejorar la conductividad y la seguridad. |
| Dispositivos | Supercapacitores basados en nanotubos de carbono. | Nuevos dispositivos para almacenamiento de energía. |

Fuente: elaboración propia.

Incremento del ritmo de innovación tecnológica

Si los avances en investigación son importantes, no lo son menos aquellos en desarrollo tecnológico, concentrándose en tres áreas clave:

1. incremento de las densidades de energía y potencia de las baterías;
2. mejoras en la seguridad de los artefactos;
3. innovaciones mecánicas y de control en los automóviles.

En el primer caso, se desarrollan nuevas técnicas de fabricación de electrodos para producir baterías para diversos usos, entre las que destacan: las de litio-manganeso, cuyas características principales son bajo peso y capacidad de operar en un amplio intervalo de temperaturas; baterías de ión-litio, ligeras, de alta potencia; baterías de Li-polímero, fabricadas con las mismas sales que las de ión-litio, pero que usan electrolito de polímero en lugar de líquido, lo que incrementa su densidad de energía. Las baterías Li-aire, que pueden acumular mayor cantidad de energía, todavía no alcanzan producción industrial debido a que no se han logrado resolver los problemas de los ciclos de recarga, aún muy bajos, y la deposición de subproductos en los electrodos que disminuyen la conductividad (Christensen y otros, 2012).

Las innovaciones han incrementando de manera importante la capacidad de acumulación de energía (Ah), disminuyendo los costos de almacenamiento y provisión de energía (kilovatios-hora). La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y la Agencia Internacional de Energía (IEA por su denominación en inglés) han estimado que los valores presentes en 2012 se habrán reducido a la mitad para 2020 (OECD-IEA, 2009). Por su parte, un informe de la consultora McKinsey (Hensley y otros, 2012) estima que los avances tecnológicos en cátodos, ánodos y electrolitos podrán aumentar la capacidad de las baterías entre un 80 y un 110 por ciento para el período 2020–2025, lo que se traduciría en una reducción del 40 al 45 por ciento en el precio de las baterías.

Un ejemplo concreto de estos avances tecnológicos es el de la empresa Envia Systems, de Estados Unidos, que en 2012 desarrolló una celda electrolítica de litio que acumula tres veces más energía que las celdas actuales (Singh, 2012), lo que hace factible que se alcancen las citadas proyecciones.

La seguridad es crucial en el desarrollo de las baterías. En esta área la I+D se orienta a disminuir los riesgos de explosiones. El problema radica en que el incremento de la seguridad resulta en una disminución de la disponibilidad de energía, por lo que se trabaja en la composición de los electrodos para optimizar el equilibrio entre disponibilidad de energía y seguridad, y en el incremento de esta en los electrolitos mediante la incorporación de aditivos para aumentar la estabilidad térmica y la eliminación de solventes orgánicos peligrosos, a objeto de disminuir la toxicidad (Scrosati y Garche, 2010).

En el caso de innovaciones mecánicas y de control, se registran avances en el desarrollo de motores eléctricos de alta velocidad que disminuyen la pérdida de energía aerodinámica (MIT, 2013), materiales para la construcción de los vehículos y desarrollo de mecanismos para el aprovechamiento de la energía generada. Un ejemplo es el proyecto *Intelligent Dynamics for Fully Electric Vehicles* (ID4EV, 2010), esfuerzo de I+D conjunto Academia-industria, cofinanciado por la Comisión Europea, cuyo objetivo es desarrollar sistemas eficientes de frenado y chasis. El concepto que se maneja es que los sistemas trabajen de manera integrada bajo control distribuido para optimizar el desempeño. Destacan también esfuerzos para mejorar una importante ventaja de los sistemas de impulsión eléctrica respecto a los de combustión interna: el control más rápido y preciso del torque generado. Los sistemas actualmente en desarrollo apuntan no sólo a garantizar la mayor efectividad del torque, sino también a mejorar condiciones de seguridad (Yin y Hori, 2009).

Este cúmulo de avances tecnológicos permite una lenta pero creciente introducción de vehículos eléctricos. Por sólo citar algunos ejemplos, la empresa china BYD, líder mundial en producción de baterías, lanzó en 2009 el BYD E6, que trabaja con baterías de hierro-litio, con los siguientes parámetros de desempeño: autonomía, 300 kilómetros; velocidad máxima, 160 km/h; ciclos de recarga de baterías, 2.000 veces; cero emisiones por uso (Energy & Capital, 2012). La francesa Renault lanzó en 2012 el Zoe, impulsado por baterías de ión-litio, considerado el primero que reúne las condiciones para ser producido en masa en la Eurozona, con los siguientes parámetros de desempeño: autonomía, 210 kilómetros; velocidad máxima, 135 km/h; cero emisiones por uso. Por su parte, la empresa estadounidense Tesla, dedicada exclusivamente a producir vehículos eléctricos, lanzó al mercado en 2012 el Modelo S, el cual tiene una autonomía de alrededor de 400 kilómetros, velocidad máxima superior a los 200 km/h y cero emisiones por uso.⁴

¿La transformación de los sistemas puede promover una revolución tecnológica?

Como se aprecia, las innovaciones apuntan en muchos casos a resolver problemas o limitaciones que presentan las tecnologías en desarrollo, situación que coincide con lo señalado por Carlota Pérez (2010) respecto a que las innovaciones individuales no se dan de manera casual y tienden a generarse en el entorno de otras innovaciones. Esto lleva a analizar si tienen suficiente carácter transformador para modificar sistemas tecnológicos de diferentes sectores de la producción y propiciar una revolución tecnológica. Una revolución tecnológica es el surgimiento de un «poderoso y visible conjunto de tecnologías, productos e industrias

nuevas y dinámicas, capaces de sacudir los cimientos de la economía y de impulsar una oleada de desarrollo de largo plazo» (Pérez, 2002). Tienen impacto profundo y universal, no sólo porque abren un nuevo y dinámico potencial para la creación de riqueza, sino porque ofrecen tecnologías genéricas que permiten dar un salto cuántico en la productividad de otras actividades económicas y, a nuestro entender, inciden en diversos ámbitos sociales a escala global.

Las principales características que distinguen estas tecnologías de las precedentes (Foladori e Invernizzi, 2009) es que son mucho menos contaminantes y más ahorradoras de energía. Uno de los factores que fomentan el desarrollo de las tecnologías de baterías e innovaciones en la impulsión eléctrica es la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), observándose que tienden a integrarse cada vez más con fuentes de generación más limpias. Las fuentes alternas de energía han servido hasta ahora para complementar las tradicionales, razón por la que no han propulsado, hasta ahora, una transformación profunda de la matriz energética. Sin embargo, en las fuentes solar y eólica se registran importantes avances. Específicamente en el caso de la energía eólica, las nuevas turbinas que se construyen producirán un 20 por ciento más de energía que las actuales de 5 MW (7 MW), en tanto que las que están en desarrollo, el doble (10 MW), lo que ampliará significativamente su participación en la generación total de electricidad (Kamada y Mikelsen, 2011).

En paralelo a este esfuerzo, algunos países comienzan a modificar sus redes de energía. Dinamarca, nación líder en generación de energía eólica, está rediseñando su red para, entre otras cosas, usar los vehículos eléctricos como unidades de almacenamiento de energía, a fin de compensar las fluctuaciones de intensidad de esta fuente, aprovechando los períodos de poca actividad. La versatilidad de aprovisionamiento, disminución de costos de los servicios auxiliares de la red y mayor integración con fuentes de electricidad renovables serán decisivas para la difusión e implantación definitiva de la impulsión eléctrica (The International Council on Clean Transportation, 2013).⁵

Lo anterior evidencia que se comienza a modificar la matriz energética, trayendo aparejado la creación de nuevos sectores de la producción y nuevas infraestructuras de servicios interconectadas e interdependientes, capaces de incidir en el resto de la economía, característica que distingue a las revoluciones tecnológicas de un conjunto aleatorio de sistemas tecnológicos (Pérez, 2010).

Esta reconfiguración de los sistemas tecnológicos alrededor de la impulsión eléctrica tendrá repercusiones importantes sobre diversos actores sociales en el ámbito global

(Foladori e Invernizzi, 2009), empezando por los impactos socioculturales y ambientales que tendrá en los lugares de explotación de materias primas, en diversos casos negativos, pero también en la distribución de los combustibles para el transporte, disminuyendo el riesgo para la seguridad y la salud de los trabajadores y usuarios.

En el mediano plazo, la reconfiguración de la estructura sociotécnica de la locomoción y la modificación de la matriz energética generarán cambios en la acumulación del capital y el empleo. Algunas proyecciones técnicas y económicas desarrolladas en la Unión Europea (Cambridge Econometrics y Ricardo-AEA, 2013) contrastan el impacto del incremento de los costos de capital derivados de un mayor gasto en tecnología de vehículos eléctricos, en especial de las baterías, con el de la reducción de los gastos de importación de petróleo. En el primer caso, se estima que afectará el ingreso real e incrementará los gastos de los consumidores. Sin embargo, los costos para la economía en su conjunto se equilibran, porque parte de esos gastos se traducirán en beneficios para empresas europeas productoras de los diferentes componentes, retroalimentando la economía. En contraposición, la disminución del consumo de combustibles fósiles tendrá un impacto más amplio en la economía, debido a la mejora en la balanza comercial por reducción de las importaciones y a beneficios secundarios derivados de menores gastos en combustibles para los consumidores, que incrementarán su capacidad adquisitiva (ibid.).

Rasgos de la revolución tecnológica

Aportados suficientes elementos técnicos y económicos que evidencian la transformación de diversos sistemas tecnológicos de la impulsión eléctrica que pueden promover una revolución tecnológica, se exponen a continuación los rasgos que la caracterizarían.

La revolución microelectrónica ha tenido impacto global, transformando múltiples actividades económicas y sociales. Pero su expansión ha sido posible gracias al desarrollo de fuentes de energía autónomas de pequeño tamaño debido al incremento de las densidades de energía y potencia, lo que le confiere a la electroquímica un rol estratégico. El litio, por su buena relación densidad de potencia/densidad de energía, permite miniaturizar las baterías, posibilitando desarrollar artefactos electrónicos cada vez más pequeños.

Esta cualidad ha hecho posible cambios importantes en el diseño y uso de aparatos, y el desarrollo de una enorme cantidad de nuevos dispositivos tecnológicos que están transformando múltiples ámbitos de la dinámica social como la salud, la recreación, y sectores de la producción y el comercio. Teléfonos celulares, tabletas electrónicas, GPS, reproductores de música, facturadores inalámbricos, marcapasos y aparatos portátiles para cuidados intensivos, por citar algunos, son posibles gracias a la miniaturización de las baterías, en especial de las de litio.

Un primer rasgo que caracterizaría a esta revolución tecnológica es la movilidad que propicia lo portátil, resultando en modificaciones de actividades que anteriormente estaban atadas a fuentes fijas de energía. Este atributo está transformando hábitos y percepciones de los individuos, evidenciando el gran impacto social de estas innovaciones tecnológicas.

La aceleración del ritmo de innovación en torno a los vehículos eléctricos en buena medida es impulsada por la necesidad de disminuir las emisiones de GEI. Esta sería la segunda característica de esta revolución tecnológica: ser promovida por factores socio-institucionales que responden a imperativos ambientales. La nueva revolución tecnológica está indisolublemente asociada al imperativo de la sustentabilidad.

Difusión de las innovaciones

Asociada a la idea de revolución tecnológica está el aceleramiento del ritmo de la innovación. Si bien la tecnología de impulsión eléctrica es antigua, se está ante una constelación de innovaciones generadas globalmente por actores diversos. Esto lleva a analizar el ritmo de difusión de estas innovaciones y los factores que lo estimulan, a objeto de visualizar su alcance.

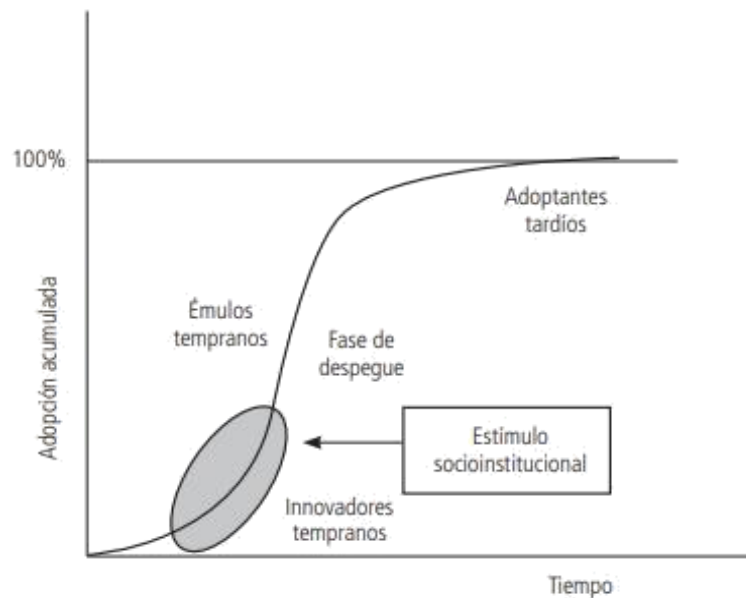
En el gráfico 1 se presenta una adaptación de la curva de difusión de innovaciones de Rogers (1995) para analizar la evolución tecnológica de la impulsión eléctrica. Al principio la difusión es lenta debido, entre otras cosas, al desconocimiento, la incertidumbre y la prevalencia de las tecnologías del anterior paradigma (Pérez, 2002). La difusión de las innovaciones es impulsada por los propios innovadores a fin de incursionar en mercados nacientes, pero en este caso también por factores institucionales que promueven energías más limpias. En esta etapa, la difusión es restringida por limitaciones técnicas y enfrenta otros intereses corporativos (p. ej., del *lobby* petrolero) y el rechazo de los consumidores.

En la actualidad se está en la fase de despegue (zona sombreada del gráfico 1), ya que comienza a registrarse un aceleramiento en la generación y difusión de nuevas innovaciones. Empresas y centros de investigación (émulos tempranos), ante el auge de nuevas oportunidades, la acumulación de conocimiento y presiones provenientes del ámbito socioinstitucional, comienzan a trabajar en las diferentes áreas, multiplicando resultados de la I+D.

Surge el tercer rasgo de esta revolución tecnológica: las innovaciones se desarrollan en diversos ámbitos globales, situación que planteará una competencia mayor por el acceso a mercados y materias primas, acentuando la difusión de las innovaciones. En esta oportunidad, Asia y la Unión Europea (UE) son las regiones que hasta ahora presentan mayor dinamismo tecnológico e industrialización, mientras que Estados Unidos hace esfuerzos por no rezagarse en esta fase de despegue.⁶

Gráfico 1

Curva de difusión de innovaciones de la revolución tecnológica de impulsión eléctrica



Fuente: Rogers, 1995. Adaptación nuestra.

¿Se transformará la matriz energética?

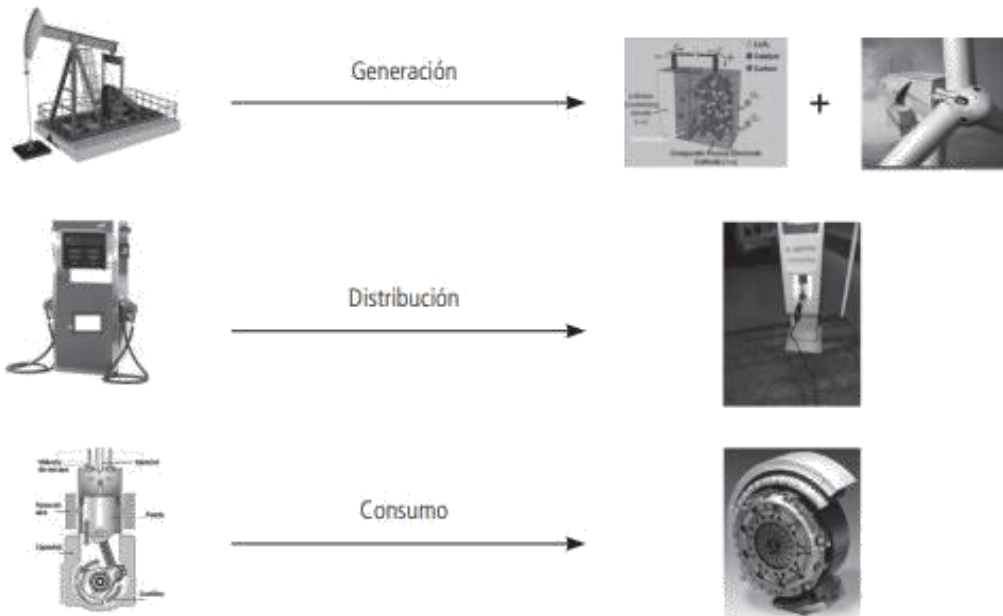
Una revolución tecnológica trastoca los cimientos de la economía y contribuye a crear nuevas áreas de producción y servicios. En esta perspectiva, ¿pueden esperarse modificaciones radicales en los medios de transporte? En la etapa actual no. Al menos en el corto plazo seguirán siendo similares a los actuales –vehículos individuales de pasajeros y de carga–, transitando por las mismas o similares arterias viales. Sin embargo, se modificarán radicalmente los sistemas de impulsión, proceso que tendrá repercusiones en la matriz energética.

Un objetivo de producir vehículos eléctricos es disminuir emisiones. Es de esperarse que este factor influya en el desarrollo de fuentes más limpias que sustituyan parcialmente combustibles fósiles por una combinación de fuentes energéticas fijas y móviles (p. ej., fuente eólica-baterías de litio). En segundo lugar, diversificará la estructura de distribución de combustible, entre otras razones por mejoras en la seguridad de los trabajadores y usuarios.

Finalmente, modificará la estructura de consumo mediante la sustitución progresiva de los motores de combustión interna por motores eléctricos (figura 1).

Figura 1

Cambios en la matriz energética



La modificación de la red de energía se adelanta en diversos países. Una iniciativa importante es *Green eMotion*, lanzada en 2011 por la Comisión Europea para facilitar la introducción de la impulsión eléctrica en Europa. En este programa participan fabricantes de automóviles, servicios públicos, municipios, universidades y centros tecnológicos. Aparte de estimular la I+D, establecerá normas para estandarizar los procesos de carga en los diferentes países a fin de facilitar su acceso y desarrolla más de 10.000 puntos de recarga en diferentes regiones del continente.

En Japón, las empresas Toyota, Nissan, Mitsubishi, Fuji Heavy Industries y la Tokyo Electric Power Company conformaron la Asociación Charge de Move o «CHAdEMO Association»⁷ con el objeto de incrementar el número de estaciones de carga rápida en todo el mundo y avanzar en la estandarización de los procesos de carga. En Estados Unidos, país que posee un potencial de generación eólica que supera en más de cuatro veces la disponibilidad energética de las demás fuentes de energía sumadas, se estima que combinando la generación eólica

Cambios en la estructura industrial

Otro elemento que sugiere la transformación de los sistemas tecnológicos son los intensos movimientos en la industria. Las multinacionales de automóviles y baterías vienen incrementando sus inversiones en esta área, tanto en I+D como en proyectos industriales, bien sea mediante esfuerzo propio o en alianzas con otras multinacionales, e incluso, como se vio, con el Estado. Se conforman *joint ventures* entre grandes empresas europeas y asiáticas. Citando algunos ejemplos, en 2.008 Robert Bosch GMBH (Alemania) y Samsung SDI (Corea del Sur) crearon la sociedad SB Limotive, con el objetivo de liderar el mercado mundial de baterías de litio para automóviles. Y la empresa automovilística BMW (Alemania) adquiere de SB Limotive baterías de litio para sus vehículos eléctricos.

Las automotrices japonesas están instalando plantas de baterías de litio en diferentes continentes. En 2012, Nissan inauguró en Europa tres plantas de baterías que emplearán los vehículos que desarrolla en alianza con Renault, en tanto que Mitsubishi Motors y Fuji Heavy Industries Ltd comenzaron en 2009 la producción en masa de vehículos eléctricos equipados con baterías de ión-litio.⁹ La empresa BYD de China desarrolla una nueva generación de vehículos para comercializarlos en Occidente.

Tesla emerge como la firma estadounidense más importante de esta industria. Considerada por algunos más que una empresa de automóviles, una empresa de alta tecnología, comienza a trastocar la organización industrial. En 2012 vendió 2.650 automóviles, cifra que se incrementa significativamente en 2013, cuando alcanzó las 21.000 unidades. Parte importante de los lucros de Tesla durante ese año provinieron de la venta de bonos de vehículos de cero emisiones (bonos de carbono). Durante el primer trimestre de ese año, recibió por este concepto 68 millones de dólares, estimándose que para el ejercicio completo alcanzará los 250 millones de dólares (IER, 2013).

Un hecho revelador de la importancia que ha adquirido esta tecnología y de su potencialidad económica es que, aun cuando las ventas de esta empresa en Estados Unidos constituyen apenas el 1 por ciento de las de Ford Motors, su cotización en el mercado de capitales se aproxima ya a un tercio de la de esta última.¹⁰

Es evidente que comienza a surgir un visible conjunto de tecnologías, productos e industrias nuevas y dinámicas, bajo esquemas no tradicionales de organización industrial, que impactarán en la economía y podrán impulsar una oleada de desarrollo a largo plazo; rasgo que confirma la transformación profunda de los sistemas tecnológicos que puede promover una revolución tecnológica (Pérez, 2002).

Conclusiones

Los crecientes impactos negativos de muchas actividades antrópicas sobre el ambiente llevan a cuestionar muchos de los sistemas tecnológicos imperantes. A pesar de haber transcurrido más de tres décadas del inicio de la revolución tecnológica microelectrónica, que conllevaba un menor uso de materia y energía, el consumo de recursos y la contaminación no paran de crecer. Uno de los problemas derivados más acuciantes es el de las emisiones de GEI que contribuyen al calentamiento global.

Ante esta situación se suscriben acuerdos, cuyo cumplimiento hasta ahora es muy bajo, incluso por parte de algunos de los países que tienen la mayor cuota de responsabilidad en el problema y que, paradójicamente, poseen la mayor capacidad técnica y científica para afrontarlo. Se impone, entonces, una transformación en los sistemas tecnológicos de la producción y los servicios. En el caso específico del transporte, sector que tiene gran responsabilidad en la generación global de GEI, es imperativo una disminución drástica de estas emisiones, algo poco probable si se mantienen las trayectorias tecnológicas del paradigma de la combustión interna.

Este imperativo ambiental impulsa un vigoroso incremento de la investigación en áreas vinculadas al almacenamiento y provisión de energías. Algunas de ellas incluyen líneas (*research fronts*) que en la actualidad se ubican entre las más importantes en el ámbito mundial. Avances en electroquímica, apoyados en la nanotecnología, especialmente en litio, han aumentado las posibilidades de producir baterías capaces de almacenar mayor cantidad de energía y potencia, en tanto que el desarrollo de nuevos materiales de grafeno permitirá elaborar componentes de las baterías mucho más eficientes, la fabricación de dispositivos de almacenamiento y recuperación de energía y piezas estructurales de los vehículos. Todo ello abre grandes oportunidades de desarrollo tecnológico.

Paralelamente, se acelera el ritmo de innovación. En la última década se ha incrementado de manera importante la densidad de carga de las baterías, permitiendo una mayor acumulación de energía que se traduce en mayor autonomía, hasta ahora una de las grandes desventajas que ha presentado la impulsión eléctrica, y un aumento sustancial de la potencia. El resultado en términos de mercado es la progresiva introducción de vehículos eléctricos, con alto potencial de crecimiento en los próximos años.

Estos cambios están generando una transformación de varios sistemas tecnológicos que por su magnitud adquieren carácter disruptivo. Su impacto sociotécnico puede promover incluso una revolución tecnológica. Por su cantidad y carácter (mayores), las innovaciones no solo tienen la capacidad de modificar los sistemas tecnológicos de la locomoción, sino también de introducir cambios en la matriz energética, tanto en la generación como en la distribución y uso de la energía. Se han presentado evidencias del surgimiento de nuevas tecnologías, con ventajas inobjetables respecto de las anteriores, sobre todo en términos de

ahorro energético y disminución del impacto ambiental, y de nuevas industrias y cambios significativos en diversos servicios que impactarán la estructura económica.

Los rasgos fundamentales que tendría esta revolución tecnológica son:

1. La movilidad, derivada de la miniaturización de los dispositivos y las baterías, que modifica actividades que anteriormente estaban atadas a fuentes fijas de energía y que incluso puede modificar hábitos de los individuos.

2. Ser impulsada por factores socioinstitucionales que responden a imperativos ambientales, por lo que está indisolublemente asociada a los imperativos del desarrollo sustentable.

3. Su advenimiento y desarrollo se registra en diversos ámbitos globales con participación de amplio número de actores científicos y productivos.

Su particularidad es que surge de la necesidad de transformar la estructura sociotécnica a objeto de disminuir el impacto ambiental global. En este sentido, políticas regulatorias y de estímulo al desarrollo tecnológico serán clave en la introducción de innovaciones tecnológicas radicales y cambios en la estructura de producción de energía y los servicios, imperativos para aminorar el deterioro ambiental y permitir nada menos que la continuidad de la vida de los seres humanos en el planeta.

Referencias bibliográficas

Bastani, P., J.B. Heywood y C. Hope (2012). *U.S. CAFE Standards: Potential for Meeting Light-duty Vehicle Fuel Economy Targets, 2016-2025*, MIT Energy Initiative, Cambridge, Massachusetts.

Bruckmann, M. (2013). «Las reservas de recursos naturales son una fortaleza de Suramérica», entrevista, *América Latina en Movimiento*, <http://alainet.org/active/64056&lang=es>.

Cambridge Econometrics y Ricardo-AEA (2013). *An Economic Assessment of Low Carbon Vehicles*, www.ricardo-aea.com/cms/assets/MediaRelease/Economic-Assessment-Vehicles-FINAL2.pdf.

Canis, B. (2011). *Battery Manufacturing for Hybrid and Electric Vehicles: Policy Issues*, Congressional Research Service, Washington D.C.

Christensen, J., P. Albertus, R. Sánchez-Carrera, T. Lohmann, B. Kozinsky, R. Liedtke, J. Ahmed y A. Kojic (2012). «A critical review of Li/air batteries», *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 159, n° 2, www.eosenergystorage.com/documents/2012_JES_Christensen_Kojic_Critical_Review_Li-air.pdf.

Detroit Electric (2011). *The Detroit Electric Automobile*, www.detroitelectric.org.