

Aplicaciones de energía cinética en electromovilidad autónoma y sostenible

Kinetic energy applications in autonomous and sustainable electromobility

Cristóbal Varela-Chávez

Escuela de Mecánica y Electromovilidad, Instituto Profesional INACAP, Chile. Correo electrónico:
cristobal.varela@inacapmail.cl

Recibido: 20 diciembre, 2019. Aceptado: 15 mayo, 2020. Versión final: 12 agosto, 2020.

Resumen

La principal limitación de los vehículos eléctricos es su dependencia de recarga en red eléctrica domiciliar o electrolinera, de oferta limitada; condicionando la autonomía del automóvil. Es necesario estudiar alternativas de recarga o regeneración de energía para automóviles eléctricos; la energía cinética es una opción. Se realizó una revisión sistemática de literatura, usando los índices Scimago, Scielo, Google Académico y Doaj, seleccionando 23 de 40 artículos publicados entre 2007 y 2019, utilizando las palabras clave, energía cinética, electromovilidad, regeneración eléctrica, recarga de baterías, autonomía, vehículos eléctricos, frenado regenerativo, máquina eléctrica, amortiguadores acumuladores, KERS, sostenible. En 7 artículos se destacan ventajas de los dispositivos cinéticos para mejorar la autonomía versus la recarga de otros acumuladores; evidenciándose propuestas para mejorar la recarga o regeneración con opciones tecnológicamente posibles, pudiendo tener mejor desempeño; confirmando la necesidad de explorar aplicaciones cinéticas que apuntan a la electromovilidad. Esto permite pensar en automóviles eléctricos de mejor autonomía y costo-beneficio; con una visión de electromovilidad más sostenible.

Palabras clave: energía cinética; electromovilidad; regeneración eléctrica; recarga de baterías; autonomía; vehículos eléctricos; frenado regenerativo; máquina eléctrica; amortiguadores acumuladores; KERS; sostenible.

Abstract

The objective of this study was to develop ceramic tiles that comply with the Colombian Technical Standard - NTC 919, using agro-industrial banana residues as a feldspar substitute. To this end, test tiles were designed with various mixtures in flours and ashes from the agro-industrial residue and others with the conventional ceramic formula, called PATRON sample. In all the mixtures, the physical-ceramic properties and density were determined. The alternative mixture that showed the best results continued to be analyzed with X-Ray Fluorescence, X-Ray Diffraction and Scanning Electron Microscope. The physical-ceramic properties showed a better suitability in the test tiles prepared with 5% banana peel flour. XRF analyses show a predominance of silica and aluminium, which probably associated with mullite, according to XRD; this was also observed in the microscopic images. The results of the analyses reveal a product with a quality within the NTC 919 standard.

Keywords: kinetic energy; electromobility; electrical regeneration; battery recharge; autonomy; electric vehicles; regenerative braking; accumulator dampers; KERS; sustainable.

1. Introducción

La Electromovilidad, definida como “uso de vehículos eléctricos que hacen uso de combustibles y/o energía alternativa impulsado por uno o más motores eléctricos”, se ha posicionado desde 2010 a la fecha como una alternativa válida ante el impacto negativo del uso de motores de combustión, tanto por los costos como por el daño ambiental y en salud que estos representan. La tendencia ha llevado a que las ventas de vehículos eléctricos lleguen aproximadamente a los 3 millones de unidades a nivel mundial y en franco aumento (figura 1) [1].

A pesar de los importantes beneficios que el uso de esta tecnología significa para el medio ambiente y el bienestar humano, resulta clave abordar uno de los problemas más comunes de los vehículos eléctricos: la autonomía.

Esta propuesta intenta poner a disposición fuentes de información sobre el almacenamiento energético eléctrico con soluciones cinéticas, considerando que la energía cinética, aprovecha el movimiento de cualquier cuerpo (como el desplazamiento de un automóvil). Por ende, representa una alternativa de solución técnica para el almacenamiento de energía en baterías de vehículos eléctricos, de forma sustentable y amigable con el ambiente [2].

Las baterías de ión litio, son el centro de la tendencia actual en la movilidad eléctrica, que determinan tanto la disminución del valor comercial de los vehículos eléctricos, como el aumento de la oferta internacional en este tipo de tecnología, según el reporte descrito por García Bernal [1], donde muestra que en la actualidad la capacidad de fabricación de baterías es alrededor de 131 GWh por año y que, según la proyección, llegará a

superar los 400 GWh para el 2021. Se espera que la producción China de acumuladores de ión litio, represente un 73% de la capacidad mundial. Sin embargo, esto no será suficiente, ya que para el 2030 la demanda global proyectada de baterías ión litio por concepto de vehículos eléctricos crecerá 1500 GWh, lo que implicará mayores inversiones en el sector [1]. Esto indica que la proyección de la electromovilidad tiene futuro en el mundo y su inserción en la sociedad actual es inminente, lo que obliga a crear soluciones a corto plazo, tanto en la infraestructura en Chile como en Latinoamérica a costo competitivo [3], [1], [4].

El desarrollar tecnología de baterías es costoso, su producción es delicada y peligrosa, a la vez no muy amigable con el medio ambiente [5]. Esta situación se ve aminorada en la actualidad con el uso de materiales compuestos que buscan reducir tamaño, peso y niveles de riesgos de las baterías [9].

La bibliografía disponible en las redes académicas citadas en este artículo aborda opciones de regeneración eléctrica, quizás desconocidas para el público general latinoamericano, como por ejemplo KERS, EHSA y frenos regenerativos [5], pero de uso común en Europa en el mundo de la competición automovilística [6], [7].

Si se toma en consideración todo lo anteriormente mencionado, podría generarse la siguiente interrogante: ¿Es posible con estas aplicaciones cinéticas lograr reducir la brecha actual de los costos de fabricación y adquisición de vehículos eléctricos y acercar la electromovilidad al usuario común? [8], [9].

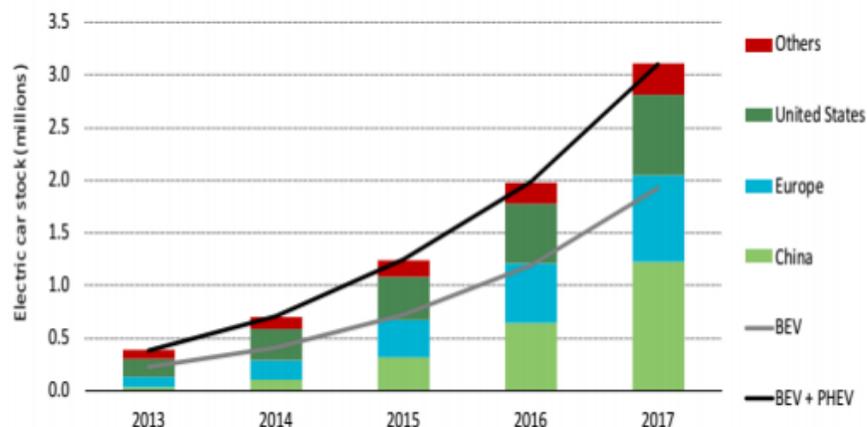


Figura 1. El gráfico muestra el crecimiento global de la demanda de vehículos a nivel mundial, desde 2013 a 2017.

Fuente: [1].

2. Metodología

Se realizó una revisión bibliográfica, utilizando las bases de datos Scimago, Scielo, Google Académico y Doaj de los artículos publicados entre enero del año 2007 y agosto del 2019, haciendo uso de las palabras claves: energía cinética, electromovilidad, regeneración eléctrica, recarga de baterías, autonomía, vehículos eléctricos, frenado regenerativo, máquinas eléctricas, amortiguadores acumuladores, KERS, sostenible. Se encontraron 40 documentos; de ellos se seleccionaron y revisaron en extenso 23, utilizando para el análisis en 3 categorías de búsqueda:

- Aprovechamiento de energía cinética en aplicaciones automotrices y sus alcances técnicos en electromovilidad.
- Modelos de tendencias en regeneración y recarga de baterías, que apunten a mejorar la autonomía de vehículos eléctricos.
- Electromovilidad como opción de movilidad automotriz.

Cada uno de estos ítems mencionados tiene una relación en común, ya que los temas son convergentes y tributan al mismo fin, que es presentar una propuesta de mejora sustantiva en el desempeño técnico de la recarga de energía en baterías.

En una primera etapa se revisaron artículos donde prima el uso de energía cinética, contando con 7 publicaciones relacionadas con la energía cinética y el aprovechamiento del movimiento del vehículo, siendo el más prometedor y competente el KERS (Kinetic Energy Recovery Systems) como medio de regeneración cinética, que podría compararse claramente con una batería, ya que actúa como acumulador de energía; incluso, se abordan publicaciones con respecto a estos dispositivos en la Revista de la ASME (Sociedad de Ingenieros Americanos). Así mismo son referidas otras aplicaciones y modelos experimentales en regeneración de energía con sus principales potenciales, como por ejemplo EHSA (Energy Harvesting Shock Absorber) sistema aplicado en la suspensión de los vehículos y son expuestos algunos detalles experimentales con aplicaciones piezoeléctricas de generación de energía [6], [7], [2], [10], [11].

Los restantes 14 artículos, se concentran en estudios de vehículos híbridos y eléctricos, describiendo en tres de ellos aplicaciones de frenos regenerativos eléctricos, el concepto (máquina eléctrica) [12] ya en uso, que aportan a la recarga de la batería. Una fracción muy pequeña, con no más de 2 publicaciones europeas, referente a recarga inalámbrica o inductiva de la batería, que representa una oportunidad técnica interesante, sin embargo, con

algunos reparos referente a la factibilidad por estar en etapa experimental y además lo poco sostenible en la actualidad, en términos de costos en su implementación comparado con otras tecnologías. Además, 8 publicaciones restantes que profundizan algunos aspectos técnicos de electromovilidad, como indicaciones de motores-generadores eléctricos nuevos, baterías automotrices y su desarrollo, incluyendo textos de China y Malasia, se usan dos artículos de revistas especializadas del mundo motor, una de ellas profundiza un prototipo de recuperador de energía de Audi [13] y la otra habla de un modelo desarrollado por Bosch y PSA, el cual integra otra variante tecnológica con aire comprimido [14]. Finalmente, se destaca en especial el artículo de Nicolás García Bernal [1] quien describe de forma precisa, respondiendo claramente a la necesidad futura de cara a los temas de electromovilidad y sus tendencias, la problemática de cambio climático, destacando en particular el interés mundial, latinoamericano y en Chile de resolver estos problemas, mencionando las distintas iniciativas en electromovilidad y compromisos adquiridos en esta temática.

3. Resultados

3.1. Aprovechamiento de energía cinética en aplicaciones automotrices y sus alcances técnicos en electromovilidad (KERS)

En los documentos seleccionados, se muestra evidencia de que en la actualidad existe mucho material relacionado con este tipo de tecnología cinética. Martínez (2014) [6], indica las diversas formas de aplicación del KERS (Kinetic Energy Recovery Systems) o bien Sistemas de Recuperación de Energía Cinética, tecnología muy conocida en competencias de Fórmula 1, pero en este caso destacamos la aplicación tecnológica en automóviles de serie como:

- 1) KERS mecánico
- 2) Eléctrico KERS
- 3) KERS hidráulico
- 4) Hidroeléctrica KERS (HESS)

En su investigación de sistemas de almacenamiento de energía mecánico, da cuenta cómo el aprovechamiento del movimiento puede aportar a una batería para ser utilizada en el tren motriz del automóvil, lo que sugiere una integración transmisión - dispositivo de recuperación cinética, la cual es aprovechada como energía motriz directa o bien como generación eléctrica, en especial la mostrada por Volvo, en donde además integra la hibridación eléctrica como alternativa (figuras 2, 3 y 4):



Figura 2. KERS desarrollado por Volvo. Fuente: [6].

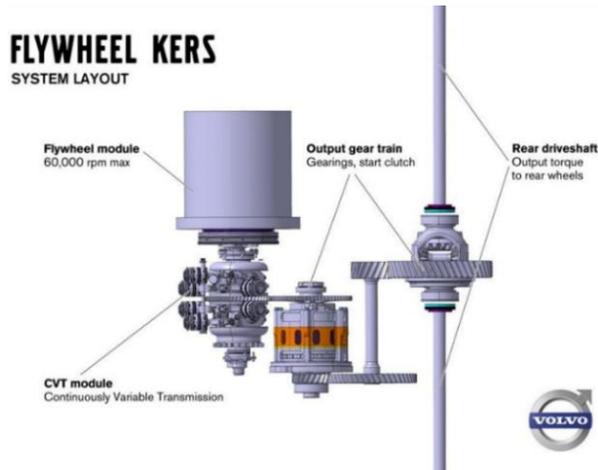


Figura 3. Distribución del sistema de Volvo Mechanical-Kinetic Energy Recovery System, M-KERS. Fuente: [6].

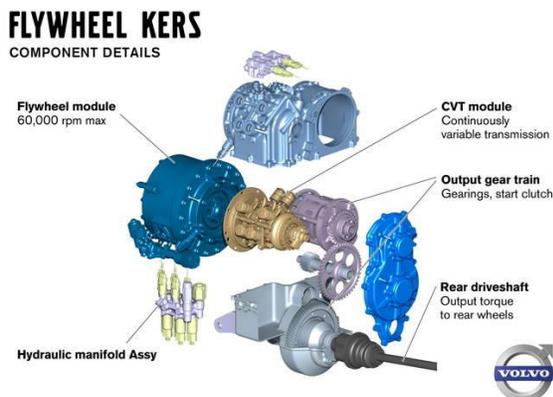


Figura 4. M-KERS desarrollado por Ricardo y Torotrak. Fuente: [14].

La idea impulsada por la empresa automotriz Volvo en las figuras anteriores es el concepto que aprovecha estos medios cinéticos e integra sistemas conocidos del tren de rodaje de un vehículo de alta gama como es la transmisión CVT (Transmisión Continua Variable). Las bondades de esta tecnología de propulsión híbrida M-KERS se basa en la acumulación de energía en un volante de inercia capaz de girar a 60.000 rpm en un estado de vacío. Este concepto ha sido creado para reducir las pérdidas, por altos costos y el aumento de peso con los acumuladores de energía basados en batería. Este ejemplo, ilustra los modelos potenciales que se sugiere investigar, como también son mencionados por otros autores que se han dedicado aportar conocimiento interesante, sobre todo en las nuevas formas de lograr eficiencia en este tipo de dispositivos, los que son bastantes sorprendentes y solo podrían ser comparados con el giro de una turbina de avión, llegando en muchos casos sobre los 70.000 RPM, es por ello que también algunos autores invitan a estudiar trabajos de prototipos futuros, que apunten a la eficiencia de estos aparatos tecnológicos. Con ello, se pueda lograr reducir costos de producción con sistemas más simples, permitiendo modelos de calle más competitivos [7], [2].

“Los sistemas mecánicos basados en el volante no son nuevos –ha habido sistemas que han sido previamente desarrollados, incluyendo el diseñado por la Universidad de Eindhoven y Leyland Trucks entre otros y de hecho es posible montar en un tranvía potenciado con volante de inercia desde la estación de Stourbridge en Inglaterra” [6].

3.1.1. Sistemas de almacenamiento eléctrico

Son sistemas híbridos eléctricos que utilizan baterías tradicionales de electrolito químico (ion de litio, plomo ácido, sulfuro de sodio, etc.) como forma de almacenamiento, y el motor eléctrico/generador como creador de la energía y método de control. El motor/generador es también llamado MGU (Unidad generadora del motor). Este tipo de KERS se compone de: motor/ generador de propulsión eléctrica, electrónica de potencia-inversor y la fuente de poder o batería.

Cabe destacar que para aprovechar el potencial eléctrico de la tecnología mencionada existen aplicaciones eléctricas como es el caso de los condensadores, los cuales almacenan energía eléctrica en el orden de microfaradios. Su función principal es cargar o descargar la electricidad de manera inmediata. Algunos dispositivos usan supercondensadores que tienen algunas particularidades como una larga vida útil, carga de energía rápida, resistencia en ohmios muy baja, gran nivel de densidad de potencia y una forma de carga

menos compleja comparados con los condensadores y baterías.

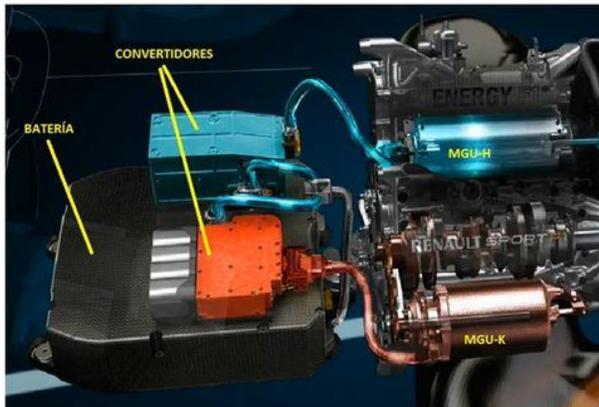


Figura 5. MGU- H y MGU-K, aplicación en Fórmula 1. Fuente: Renault Sport F1, imagen de Google.



Figura 6. Ejemplo KERS eléctrico MGU aplicado en Renault Twizy F1 eléctrico. Fuente: [14].

Se ilustran algunas aplicaciones interesantes con este tipo de tecnología que se encuentra disponible en competición, ya sea en Fórmula 1 (figura 5 y 6) de MGU y sus componentes. Es importante agregar que con esta experiencia hay modelos probados de muy alto desempeño, que pueden ser usados en vehículos de calle; en este caso, el concepto que se busca y que se acerca con mayor relevancia al caso, es el Renault Twizy (figura 6), donde la orientación es 100% eléctrica [6], [2].



Figura 7. Vista superior de kers, Flywheel KERS es la que desarrolló Williams Advanced Engineering. Fuente: [14].

Otra visión de la regeneración de energía es el sistema Flywheel KERS que desarrolló Williams Advanced Engineering, actualmente GKN; este diseño (figura 7, 8 y 9) vincula el volante de inercia a un generador eléctrico, entregando la energía directa al propulsor eléctrico. Bajo este concepto, Audi le debe las últimas victorias en las 24 horas de Le Mans o Porsche con su primer 911 GT3-R Hybrid, demostrando así no solo que el sistema es efectivo, sino que además es una opción por considerar de cara a otros sistemas híbridos (motor a combustión y eléctrico) basados en el almacenamiento energético en baterías o condensadores [6], [2].

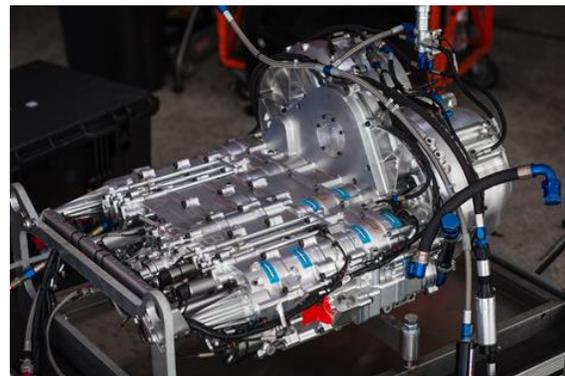


Figura 8. Vista lateral sistema Flywheel KERS, de Audi. Fuente: [14].

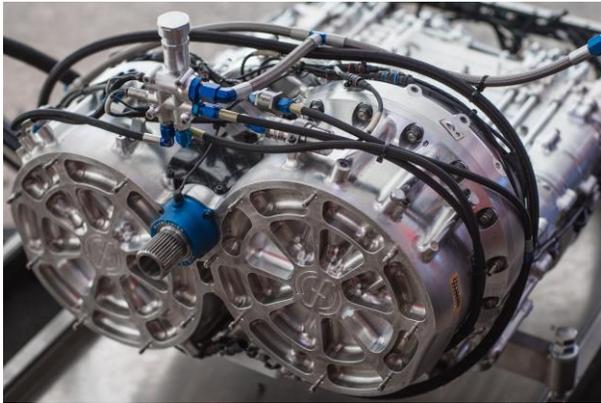


Figura 9. Vista frontal de sistema Flywheel KERS, de Audi y Porsche. Fuente: [14].

3.1.2. Sistemas de almacenamiento hidráulico

Los sistemas de almacenamiento hidráulico son una de las opciones en el frenado regenerativo de los automóviles. Este cuenta con una bomba/motor hidráulico de desplazamiento variable junto con un acumulador hidroneumático; en este modelo se tiene especial interés en la actualidad, siendo un sistema muy adecuado para aplicaciones en buses urbanos. Sin embargo, a pesar de los avances importantes en la eficiencia de la energía que puede ser provista por la regeneración hidroneumática en el frenado, el uso del dispositivo incorporado no es popular, ya que el costo del vehículo puede aumentar un 10-15% del total de uno sin esta tecnología, lo que representa una barrera en su implementación. En la figura 10 se muestra la aplicación en un vehículo pesado que incluye solo dispositivos hidráulicos para la frenada de regeneración de energía, lo que podría pensarse en una forma de hibridar estos medios con elementos propios de la electromovilidad [6].

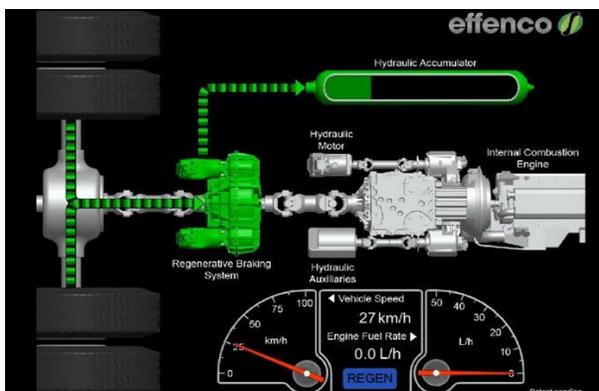


Figura 10. Imagen de un acople de freno regenerativo hidráulico. Fuente: [14].

3.1.3. Sistemas de almacenamiento hidráulico

El almacenamiento hidroeléctrico, que dispone de acumuladores hidráulicos en una primera etapa, destacando la mayor densidad de potencia, se muestra adecuado para la aceleración y desaceleración frecuente en las condiciones de tránsito urbano. Es capaz de entregar alta potencia para aceleraciones y puede recuperar de manera más eficaz la energía durante el frenado regenerativo en comparación con su contraparte eléctrica. No obstante, la baja densidad de energía limita el sistema por el aumento de tamaño del acumulador. Un ejemplo de esto es el trabajo de Uzunoglu, Rodatz y Thounthong, referidos por [6], quienes crearon el sistema híbrido de energía como la batería/UC (Ultracapacitors, término inglés de supercondensadores), pila de combustible/UC, etc. Los estudios centraron los esfuerzos en los sistemas híbridos de energía en formas eléctricas, en desmedro del desarrollo en el sistema hidráulico/eléctrico, lo que hace muy reducida la información.

Sin embargo, se espera desarrollar modelación de prototipos respecto a este tipo de variantes, como es el caso de Ricardo (empresa en el desarrollo del mundo del automóvil, figura 11) que proponía un sistema de freno regenerativo/disipativo combinado para un bus urbano. Este dispositivo regenerativo cuenta con una bomba/motor hidráulico de caudal fijo y un acumulador hidroneumático. A posteriori, se creó una mejora por parte de Bozic, que incorpora una sinergia hidroeléctrica en la transmisión híbrida utilizando la tecnología de pistón libre de los motores [6].



Figura 11. Modelo de KERS hidroeléctrico, banco de ensayo Ricardo. Fuente: empresa Ricardo.

El potencial del KERS, representa una mirada comprobada en el mundo de la competición (Fórmula uno, Le mans); los detalles técnicos lo hacen cercano y disponible para el eventual desarrollo de vehículos de

calle, como muestra el ejemplo de Volvo y Mercedes Benz en el trabajo de Martínez [6]. Además de describir a la perfección distintas alternativas de su aplicación, su principal ventaja es que es capaz tanto de absorber como liberar mucha potencia (hasta 96.000 RPM, entregando 30 KW de manera casi instantánea), su peso y tamaño es muy reducido en comparación con acumuladores químicos tradicionales (baterías de aplicaciones automotrices), su desgaste mecánico prácticamente no existe (la instalación al vacío y el uso de levitación magnética lo reducen). En cambio, las baterías tienen un factor de degradación en el tiempo (pérdida de eficiencia proyectado sobre 10 años), que para el caso del KERS no significa un problema, pudiendo ser proyectado por toda la vida útil del vehículo en el que está instalado. Por otra parte, los componentes no significan un riesgo para el ser humano en su manipulación o posibilidad de electrocución en el servicio del vehículo.

Con respecto al impacto al medio ambiente, es una tecnología amigable, ya que todos sus componentes pueden ser reciclados. Su sustentabilidad como aplicación se basa en que su valor es bastante menor - 1.000 euros aprox, en pesos chilenos un poco más de \$900.000, si lo comparamos con un banco de baterías (figura 12) con valores que van entre los 3.000 a 10.000 dólares, dependiendo del tipo y aplicación del vehículo eléctrico (fuente de kit de conversión eléctrica Autolibre latinoamérica) [6], [2].



Figura 12. Banco de baterías ion litio de 96 v NCM Soundon New Energy, fabricado en China. Fuente: gentileza Inacap Proyecto Fondef ID 18/10379 Osorno-Chile.

3.2. Modelos de tendencias en regeneración y recarga de baterías que apunten a mejorar la autonomía

3.2.1. Composición mineralógica

La recuperación de energía también es una forma cinética en el aporte significativo del acumulador que es la batería eléctrica, utilizando elementos piezoeléctricos, produciendo señal de energía eléctrica con el movimiento del automóvil, logrando con ello aportar su grado de recarga. La investigación de Bowen [15] describe en detalle modelos de mejora sustantiva en dispositivos incorporados en la suspensión del automóvil, como son los amortiguadores (figura 13). El dispositivo es llamado en inglés Energy Harvesting Shock Absorber (EHSA), siendo un ejemplo y opción concreta para el desarrollo masivo de este concepto y resolución de problemáticas de recargas de baterías eléctricas de forma autónoma en el mundo de la automoción, lo que representa una visión de electromovilidad más sostenible.

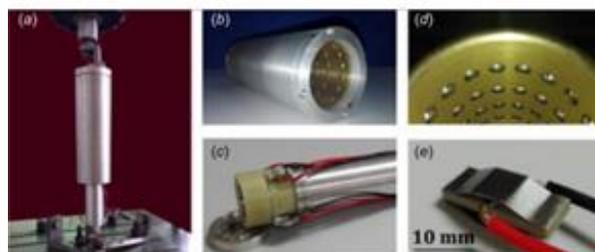
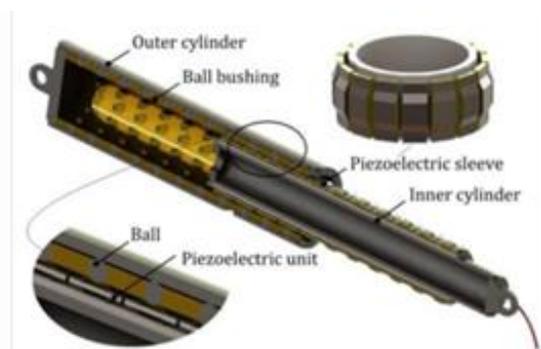


Figura 13. Sistema de amortiguador para recuperación de energía con uso de elementos piezoeléctricos presentados por Weng Ming Zhang ET AL. Fuente: [15].

Materiales piezoeléctricos instalados en neumáticos es una opción según Bowen [15], donde su potencial se ve reflejado en este tipo de componentes (Fig.14). Según lo experimentado, se logran 380.2 μ J por revolución con una carga de 500 kgf con una velocidad de 60 km/h, lo

que sugiere que prontamente puede ser un aporte de alguna forma a la recarga de baterías.

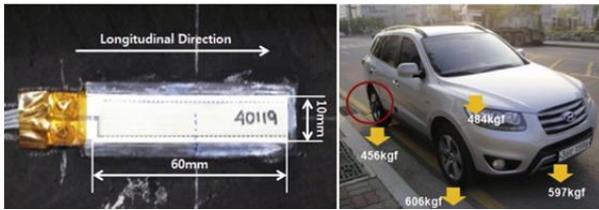


Figura 14. Sistema de recuperación de energía, por medio de material piezoeléctrico, medición del comportamiento de neumáticos en un coche tamaño real, presentado por J.Lee ET AL. Fuente: [15].

Bowen [15] afirma que de todas las tecnologías ESHA, las que tienen más futuro son las que usan generadores eléctricos rotacionales. Existe bastante material bibliográfico en comparación con las aplicaciones lineales de generación, y más aún si se trata de los dispositivos que utilizan materiales piezoeléctricos, además de comentar que en el mercado es más próximo el uso masivo del generador de aplicación rotacional en amortiguadores. Un ejemplo de ello es la propuesta de prototipo de Audi (figura 15), que ya se encuentra en etapa de desarrollo según Redondo [13].

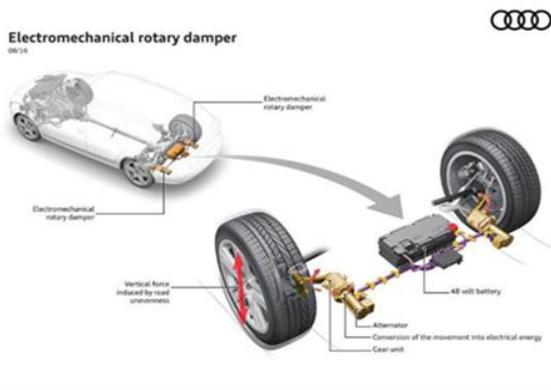


Figura 15. Sistema de presentado por Audi eROT. Fuente: [13].

“Los resultados iniciales de ensayos para la tecnología 'eROT' son prometedores, y por tanto sería posible su uso en futuros modelos Audi de serie. Un requisito previo para ello es el sistema eléctrico de 48 voltios, actualmente una tecnología clave en la estrategia de electrificación de Audi. En la próxima evolución, planeada para 2017, el sistema de 48 voltios servirá como sistema eléctrico primario en un nuevo modelo de la marca de los cuatro aros, que utilizará un sistema híbrido ligero de alto rendimiento, lo que ofrecerá potenciales ahorros de combustible de hasta 0,7 litros por cada 100 kilómetros” [13].

El dispositivo BS- ESHA (Ball-Screw Energy Harvestig Shock Absorber), se trata de un generador-amortiguador que utiliza un sistema de tornillo de bolas que pasa de un movimiento alternativo de la suspensión a rotación del generador integrado, lo que simplifica la operación de espacios de movimiento como indica la (figura 16 y 17) [15].

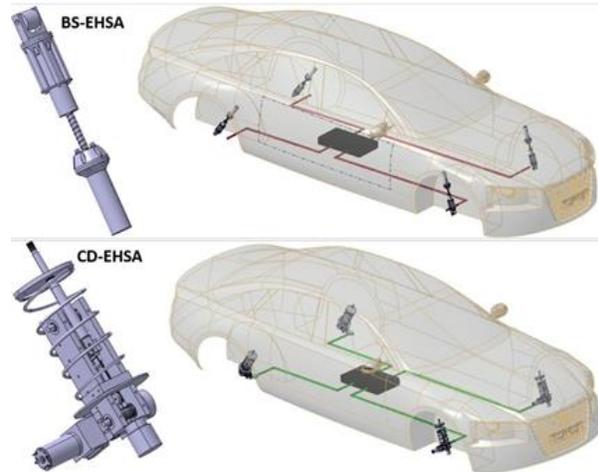


Figura 16. Sistema de recuperación, sistema de amortiguador para recuperación de energía BS ESHA y CD ESHA. Fuente: [15].

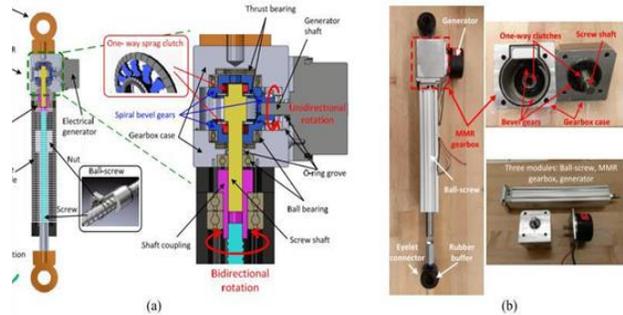


Figura 17. Sistema de recuperación, sistema de amortiguador para recuperación de energía BS ESHA. Fuente: [15].

Para el caso CD ESHA (Cable-Dynamic Energy Harvestig Shock Absorber), se dispone de un mecanismo de poleas unidas por cables, los cuales transmiten el movimiento al generador. Esto se puede apreciar mejor en la figura 18, donde se muestran los mecanismos del dispositivo [15].

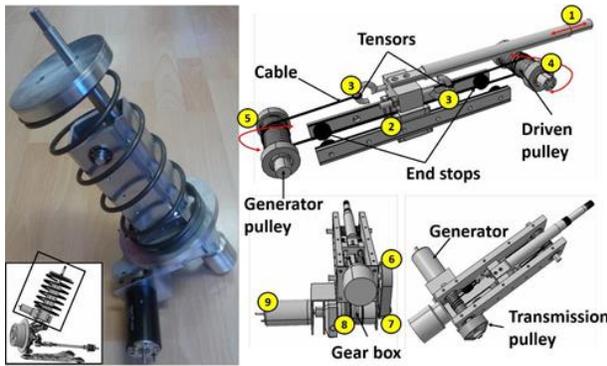


Figura 18. Dispositivo CD ESHA, mecanismo por polea de generación de energía. Fuente: [15].

En la experiencia de Bowen [15] y su estudio, en términos de cifras en cuanto a potencia y entrega de energía regenerada con la aplicación cinética con amortiguadores ESHA Energy Harvesting Shock Absorber, estas serían: para el DD-EHSA entre 85-100W, para el BS-EHSA entre 115-140W, para el RP-EHSA entre 115-140W y para el CD-EHSA entre 115-140W. Logró obtener estos resultados de simulación de la conducción en un circuito local a una velocidad entre 20-30 km/h. Por ende, los valores de eficiencia de las tres tecnologías se estiman entre 40-65%, el resto es pérdida por roce o factores constructivos. Es importante destacar en el caso del EHSA, corresponde a un modelo experimental y no a un producto masivo de aplicación automotriz disponible a nivel comercial, lo que impide cuantificar sus costos en términos operativos.

3.2.2. Frenos regenerativos

En vehículos tanto eléctricos como híbridos es una realidad cotidiana la recuperación de energía con regeneración, considerando el concepto de máquina eléctrica asincrónica. Para entender esto, se debe partir de la base que, para mover un vehículo, eléctrico o híbrido del reposo debe hacerse con un motor eléctrico asincrónico trifásico y esta máquina es dependiente de la energía de la batería; la señal de este efecto es el accionamiento del acelerador. Esta dependencia de la batería para el movimiento de la máquina eléctrica implica una importante inversión de espacio y componentes para garantizar su eficiencia tanto en etapa de entrega de energía y regeneración de esta, donde es necesario un administrador inteligente (figura 19) y a la vez complejo [16], [17], [18], [12].

¿Pero, qué sucede cuando el acelerador no se encuentra en activación o sea que el vehículo desacelera? La acción de la inercia de la masa del vehículo mantiene en movimiento los ejes de su transmisión; estos mueven la

máquina asincrónica, transformándose en generador por efecto de la inducción eléctrica provocada por el movimiento, la batería recibe energía producto de la generación electromagnética (figura 20) que este giro logra. Para administrar debidamente este cambio de rol, un controlador electrónico de la máquina eléctrica (figuras 21 y 22) y su batería realizan finalmente esta gestión. La información recogida de los estudios de mejoras en recuperación de energía sigue avanzando de forma sostenida desde el año 2007, con la creación de mecanismos experimentales de recuperación de energía, logrando un aprovechamiento de esta última de forma simple, pero en muy poca escala.

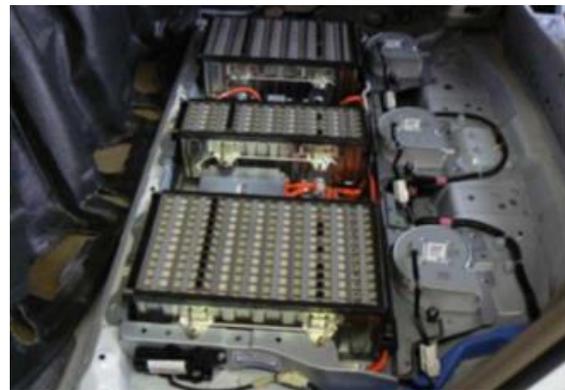


Figura 19. Banco de baterías NiMH de Toyota Híbrido Highlander. Fuente: [18].

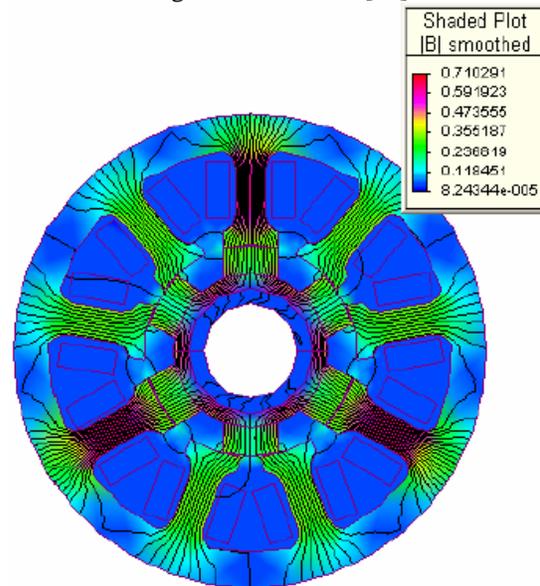


Figura 20. Flujo electromagnético de la máquina asincrónica. Fuente: [17].

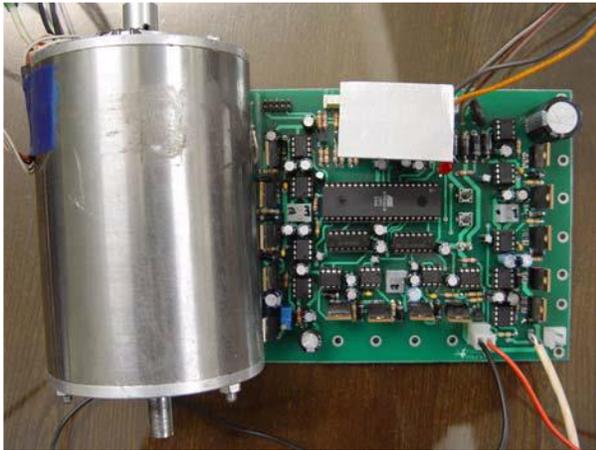


Figura 21. Máquina asincrónica (motor- generador), con su controlador electrónico de operación. Fuente: [17] .

“La máquina eléctrica también permite transformar la energía mecánica (rotación de las ruedas) en energía eléctrica en las fases de deceleración del vehículo. Mientras energía cinética haya más se podrá recuperar potencialmente energía” [12].



Figura 22. Máquina eléctrica (motor- generador), unidad desarmada para pruebas de laboratorio. Fuente: [17].

Sin embargo, en la actualidad se cuenta con poderosas máquinas eléctricas donde el concepto de regenerar está implícito en la operación del vehículo, además de lograr una gran capacidad de entrega de energía, también permite recuperar energía en la frenada o desaceleración en tramos cortos, cosa que en el pasado no era tan eficiente.

El único inconveniente es el periodo disponible para regenerar, ya que en algunos casos requiere reforzar la transferencia de calor de la unidad asincrónica, donde el

flujo de grandes cantidades de energías electromagnéticas puede limitar considerablemente su uso constante. En el caso de PSA (Peugeot – Citroën), se resuelve colocando flujo de líquido refrigerante en la máquina eléctrica, este flujo se comparte con la batería para enfriar las unidades eléctricas, necesitando de más componentes en acción como una bomba de suministro que merma el consumo de la batería (figura 23). Es por esto por lo que la capacidad recuperada de la batería no supera el 20 % de su energía total por un intervalo muy corto, lo que no significa ampliar la autonomía del vehículo eléctrico.



Figura 23. Máquina asincrónica con imanes permanentes modelo: Y51, Fuente: [12].

3.3. Electromovilidad como opción de movilidad automotriz

Es necesario dimensionar que hay un cambio cultural cuando se habla de vehículos eléctricos, más aún si se refiere a la tendencia mundial en electromovilidad (figura 24) que sigue en alza [1]. La proyección en Chile es probable que también se incremente, ya que su gobierno ha ratificado este interés en acuerdos internacionales que plantean reducir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y asumir los desafíos del Cambio Climático, proponiendo metas de aquí al 2030 -reducir la intensidad de emisiones en un 30% respecto a los índices observados en 2007. Todo esto en respuesta a los efectos del Cambio Climático, buscando mecanismos que mejoren la eficiencia energética, destacando el desarrollo de instrumentos de política pública, tal como la Estrategia Nacional de Electromovilidad 2016 o la Ruta Energética 2018–2022 [1].

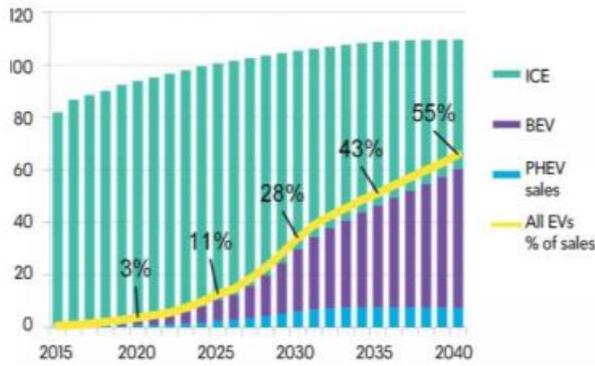


Figura 24. Gráfico tendencia mundial de crecimiento de vehículos eléctricos con proyección entre 2015 a 2040. Fuente: Agencia Internacional de Energía (2018) y Bloomberg New Energy Finance (2018).

En la figura 25 se entregan datos comparativos de los costos operacionales de buses Diesel versus buses eléctricos de uso público, evidenciando mejoras en aspectos como cantidad de kilómetros recorridos, y costos finales de desempeño en ruta. Un ejemplo de ello es que las unidades eléctricas no requieren recambio de piezas de motor, en contraste con el desgaste en unidades Diesel, lo que implica costos considerables que responden con firmeza a esta tendencia o cambio tecnológico [1].

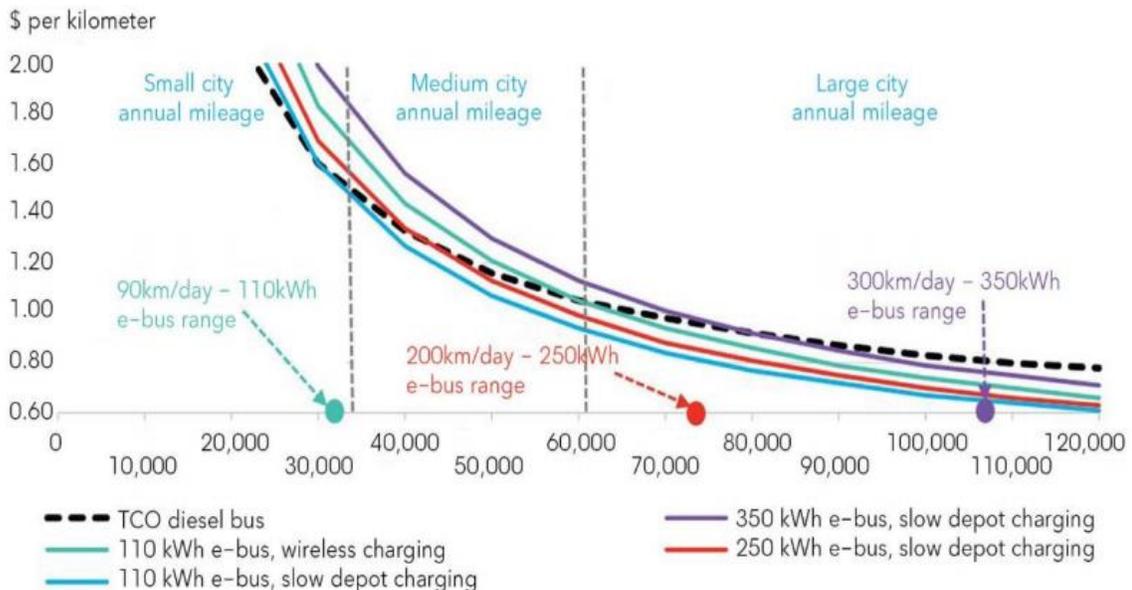


Figura 25. Gráfico comparativo del costo total de propiedad entre buses eléctricos y buses Diesel para diferentes distancias recorridas anualmente. Fuente: Electric Vehicle Outlook 2018, Bloomberg New Energy Finance [1].

4. Conclusiones

Durante la última década, los vehículos eléctricos se han posicionado como una alternativa válida frente a los motores de combustión, ya sea por costos, impacto ambiental y/o bienestar humano. La piedra de tope para su masificación es el desarrollo de una batería que logre una equivalencia tecnológica con respecto a los motores térmicos en términos de autonomía y recarga. De ahí la importancia de estudiar y analizar formas de resolver esta distancia tecnológica, además de considerar factores relacionados con el uso de una batería -como fuente de poder eléctrica- la cual tiene un límite de capacidad [5] y un riesgo de inflamarse por la recarga incorrecta. Es por ello que estos dispositivos están controlados de forma electrónica, ya sea para proteger la seguridad o mejorar su desempeño [8].

Por esta razón, resulta relevante considerar el potencial de la energía cinética, ya que esta apunta a aprovechar el movimiento efectivo del vehículo para recargar eléctricamente las baterías durante las etapas de frenado, oscilaciones en la suspensión y movimientos de la transmisión a las ruedas [3], así como entender algunas aplicaciones que utilizan este tipo de energía para la regeneración de movilidad eléctrica: KERS, EHSA y frenos regenerativos.

En el caso de KERS, ya están siendo usados en autos híbridos de competición como también en vehículos de calle que presentan este tipo de tecnología como en el caso de Volvo o Mercedes Benz [6].

Con el tiempo, el uso de KERS se ha vuelto popular por su beneficio extra de consumo relación peso-potencia en vehículos híbridos, otorgando ventajas en cuanto a riesgos, costos e impacto medio ambiental [2].

EHSA por su parte, es una aplicación capaz de entregar potencia eléctrica instantánea, permitiendo recargar la batería, aprovechando el movimiento de la suspensión y la irregularidades del camino que en situaciones normales no son tomadas en cuenta para fines de regeneración eléctrica. Como esta aplicación es de uso experimental [15], algunas marcas del segmento alto como el caso de eRot de Audi, usan este principio en prototipos, por lo tanto no se cuenta con datos comerciales sobre los costos de esta aplicación en vehículos de calle.

Finalmente, los frenos regenerativos consideran el movimiento de la masa de la máquina eléctrica y su conexión con la transmisión del vehículo como una forma de generar energía eléctrica (inducción electromagnética) al momento de desconectar el flujo de energía de la batería. Esta modalidad se encuentra presente en la mayoría de los vehículos eléctricos e híbridos actuales, ya que permite reducir la velocidad sin la necesidad de activar los frenos tradicionales y el control del peso del vehículo en pendiente [19], [20], [12].

Cada aporte por separado significa una energía a la fuente principal de la batería; no obstante, de las tres adopciones de aplicación cinética de generación eléctrica, la más potente en términos de cantidad de energía generada, como también en ventajas, riesgos, costos y beneficio medio ambiental es KERS, ya que el caso de EHSA se encuentra en etapa de prototipo, con pocos datos concretos desde el punto de vista comercial y lo mismo ocurre con los frenos regenerativos que si bien son un hecho concreto en la movilidad eléctrica actual, representan una porción menor dentro de la energía eléctrica recuperada en los intervalos de operación del vehículo.

El resultado: energía eléctrica regenerada, que se puede utilizar de forma inmediata en el automóvil sin depender exclusivamente de su fuente de alimentación principal, pensando en una batería de menores proporciones, con un costo claramente más reducido, y por consiguiente, un consumo eléctrico bastante más bajo que el habitual en un vehículo eléctrico es posible con este tipo de aplicaciones cinéticas.

5. Perspectivas de desarrollo

Dado lo anterior, se pueden proponer varias modelaciones posibles y concretas que den cuenta de resolver tecnológicamente el problema de la recarga de baterías e incluso, pensar en una opción futura de prescindir del consumo de la red eléctrica cualquiera que esta sea, por ello:

- En una primera modelación propuesta, un eje delantero impulsado por una máquina asincrónica (motor generador) principal, dependiente de una batería principal pequeña, que se encargue de la frenada regenerativa, donde el eje se intergre a una transmisión simple que permita la conexión constante de un generador que dependa del movimiento de las ruedas motrices. Además, contemplar en el eje trasero una aplicación KERS mecánico que vaya integrado a la transmisión y ayude en la salida del vehículo, permitiendo también suministrar energía a la batería con un pequeño generador, agregando al vehículo un set de amortiguadores de recuperación EHSA, que alimenten la fuente de energía principal, debiendo ser administrado con algoritmos de inteligencia artificial.

- La segunda propuesta de modelación posible sería proveer a las 4 ruedas con máquinas asincrónicas (motor generador), disponiendo dos ruedas para frenado regenerativo eléctrico tradicional y las dos restantes unidas a la transmisión con dos pequeños KERS eléctricos (MGU). Agregando un set de dos EHSA, que alimenten una batería principal que solo disponga de una fuente de energía inicial para sacar el vehículo de la inercia o en el momento de mayor desempeño, como es el caso del acumulador de energía, no tendría que ser tan grande y complejo de conectar a la red eléctrica tradicional.

- Tercera propuesta de modelo, integración híbrida de máquina asincrónica y KERS mecánico en uno de los ejes, como el mostrado por Volvo. Además de considerar un segundo KERS, esta vez eléctrico (MGU) al otro eje con integración híbrida de una máquina asincrónica (motor generador), con una pequeña batería de soporte para situaciones de alto desempeño, pero en este caso autosostenible, con recarga de paneles solares de grafeno.

Estas proyecciones de desarrollo, están relacionadas a los trabajos de las aplicaciones de [21], [22], [17], [18], [23], [16].

Es importante destacar que, en estas tres modelaciones, se mencionan bases tecnológicas conocidas y que pueden resultar de muchas más variables posibles que estos tres ejemplos. Sin embargo, deben someterse a un cuidadoso proceso de factibilidad técnica y económica para pensarlo en un modelo de vehículo de serie, aunque siempre es plausible buscar alternativas con posibilidades económicas de concretar, pero depende del interés de seguir investigando los alcances de esta tecnología y su potencial [20], [17], [19].

6. Perspectivas de desarrollo

Deben ser considerados otras modalidades de recarga de baterías, usando medios cinéticos para la entrega de movimiento, como molinos o ventiladores eólicos instalados en el mismo automóvil, con la idea de aprovechar el flujo de aire externo como energía presente junto con el movimiento de automóvil. Lo que se sugiere es invitar al estudio de cómo aprovechar este flujo de forma eficiente, que a la vez tenga otras funciones que aporten al automóvil, en funcionalidad y confortabilidad, como por ejemplo flujo de enfriamiento para reducir temperatura de frenos o bien ventilación de calefacción o climatización [4].

Por otra parte, puede también pensarse en opciones de integrar otras tecnologías como la recarga con paneles solares, lo que postula a una eventual hibridación de sistemas (figura 26), concepto del 2016 trabajado por PSA Peugeot y Citroen junto a Bosch, quienes desarrollan un modelo que integra el aire comprimido como opción de regeneración de energía, lo que deja entrever una alternativa económica para vehículos livianos.



Figura 26. Planta motriz híbrida de PSA. Fuente: [12].

“Empleando el ciclo NEDC europeo de homologación de consumos, el Citroën C3 adaptado para funcionar como híbrida hidráulica arroja un consumo en ciclo combinado de 2,9 l/100 Km y una emisión de CO₂ de 69 gramos por

kilómetro recorrido. Respecto a un motor convencional, la mejora en consumo es del 45% y la autonomía se incrementa un 90% en condiciones de tráfico urbano” [14].

Agradecimientos

A INACAP, por el apoyo en la publicación; al docente Pedro Villasana López y a Marco Rosas Leutenegger, Director de Innovación y Emprendimiento de Inacap Osorno. A mi esposa Olga Vergara Herrera, quien me asistió con sus consejos en la redacción; a mis pequeños hijos Ángel y Arturo y mi familia.

Referencias

- [1] N. García, “Electromovilidad Tendencias y experiencia nacional e internacional”, *Comisión de Transporte y Telecomunicaciones del Senado*, vol. mayo, pp. 1-14, 2019.
- [2] F. Bottiglione, G. Mantriota, “Efecto de la propagación de la relación de CVU en sistemas de recuperación de energía cinética automotriz”, *Revista de ASME Journal of Mechanical Design*, vol. 135, no. 6, pp. 061001-061010, 2013, doi: 10.1115/1.4024121
- [3] E. Barreda, “Baterías de tracción para vehículos eléctricos”, trabajo para máster, Universidad de Valladolid, España, 2017.
- [4] L. Paladines, J. Paladines Valdiviezo, C. Zapata, B. Alfonso, “Estudio y aplicación de energía solar, eólica, y energía eléctrica doméstica en el funcionamiento de un vehículo que trabaje con un motor eléctrico”, tesis de grado, Universidad Internacional del Ecuador, Quito, 2011.
- [5] L. H. Sánchez-Chávez, C. A. Padilla-Padilla, W. J. Villagrán-Cáceres, H. D. Zavala-Orozco, L. F. Buenaño-Moyano, “Diseño y construcción de un modelo de sistema de recarga inductiva para autos eléctricos”, *Polo del Conoc.*, vol. 3, no. 7, pp. 111, 2018, doi: 10.23857/pc.v3i7.532
- [6] O. Martínez, “Sistemas de almacenamiento energético mecánico en el mundo de la automoción”, tesis doctoral, Universidad de Valladolid, España, 2014.
- [7] E. Caballero Pérez, O. Martínez Gallo, C. Borraz Pilla, “Sistema de Regeneración de energía en Vehículos (modelado y Simulación dinámica)”, *Revista UIS Ingenierías*, vol. 9, no. 1, pp. 145-156, 2010.

- [8] S. F. Tie, C. W. Tan, "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 20, pp. 82-102, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.077
- [9] A. Visintin, J. Thomas, B. Castro, R. Milocco, S. Real, J. Sacco, G. Garaventa, W. Triaca, "Presente y Futuro de la Tecnología de Baterías de Ion Litio: El proyecto de Investigación y Desarrollo de Prototipos para Automóviles Eléctricos en UNLP", *Revista Tecnología y Ciencia*, vol. 10, no. 20 pp. 140-147, 2012.
- [10] C. Vargas, J. Rincón Sánchez, O. Tobón, O. Villanueva, "Bicicleta estática generadora de energía eléctrica como aprendizaje en el uso eficiente de energía", *Revista Sena*, vol. 4, no. 4, pp. 61-74, 2018.
- [11] F. Bottiglione, G. Carbone, L. De Novellis, L. Mangialardi, G. Manriota, "Artículo de investigación Híbrido mecánico KERS basado en tracción toroidal Drives: Un ejemplo de diseño tribológico inteligente para mejorar el rendimiento de los vehículos terrestres", *Adv. Tribol.*, vol. 2013, pp. 1-9, 2013, doi: 10.1155/2013/918387
- [12] *Formación Técnica de Postventa PSA Peugeot Citroen, Las tecnologías de los vehículos híbridos y eléctricos*, documento G_01520_V1, 12/03/2013.
- [13] M. Redondo, "eRot, los amortiguadores de Audi que generan electricidad", *Revista AutoBild*, 2016 [En línea]. Disponible en: <https://www.autobild.es/noticias/erot-los-amortiguadores-audi-que-generan-electricidad-297199>.
- [14] D. Clavero, "PSA y Bosch apuestan por tecnología híbrida hidráulica, llegará al mercado en 2016", *Diario Motor-Tecnovia*, 2013, [En línea]. Disponible en: <https://www.diariomotor.com/tecnovia/2013/01/23/psa-y-bosch-apuestan-por-tecnologia-hibrida-neumatica-llegara-al-mercado-en-2016/>.
- [15] L. Bowen, "Estudio teórico-experimental de sistemas de recuperación de energía en la suspensión de un vehículo automóvil", tesis doctoral, Universidad Antonio de Nebrija, Madrid, España, 2018.
- [16] S. Reyes, "Control híbrido de motores DC sin escobillas usando FPGA", tesis de maestría, Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, Tonantzintla, Puebla, Mexico, 2013.
- [17] E. Afjei, O. Hashemipour, M. A. Saati, M. M. Nezamabadi, "Un nuevo motor generador DC, sin escobillas híbrido, sin imán permanente", *Department of Electrical and Computer Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 77-86, 2007.
- [18] D. Jerez, E. Ayala, E. Puente, "Análisis del proceso de recuperación de la batería de alta tensión del vehículo Toyota Highlander Híbrido", *Revistas UIDE Innova*, vol. 3, no. 8, pp. 1-13, 2018, doi: 10.33890/innova.v3.n8.2018.808
- [19] G. Herguedas, "Estudio de geometrías de devanado para transferencia de energía inalámbrica en vehículos eléctricos", proyecto fin de carrera, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2018.
- [20] M. Mayol, "Modelación del proceso de fabricación de baterías de ion litio para vehículos eléctricos o híbridos", trabajo de tesis, Universidad Chile, 2012.
- [21] A. Méndez, M. Cely, W. Monar, "Diseño del Sistema de Freno Regenerativo de Automóviles Híbridos", *Revista Politécnica*, vol. 37, no. 2, pp. 59, 2016.
- [22] X. Gong, S. Chang, L. Jiang, X. Li, "Braking Method of Electric Vehicle Based on Direct Drive Electro-Hydraulic Brake Unit", *Open Mech. Eng. J.*, vol. 9, no. 1, pp. 351-360, 2015, doi: 10.2174/1874155X01509010351
- [23] J. Vargas, "Conversión a Auto Eléctrico Basada en un Accionamiento Trifásico: Diseño, Modelación e Implementación", trabajo de tesis, Universidad Chile, 2012.