

Vehículos Eléctricos: Sostenibilidad y Ecodiseño

Claes Fredriksson, Fernando Coelho and Luca Petruccelli

Granta Design, 300 Rustat House, 62 Clifton Rd, Cambridge, CB1 7EG, UK

First published June 2018

© 2018 Granta Design Limited



Contenidos

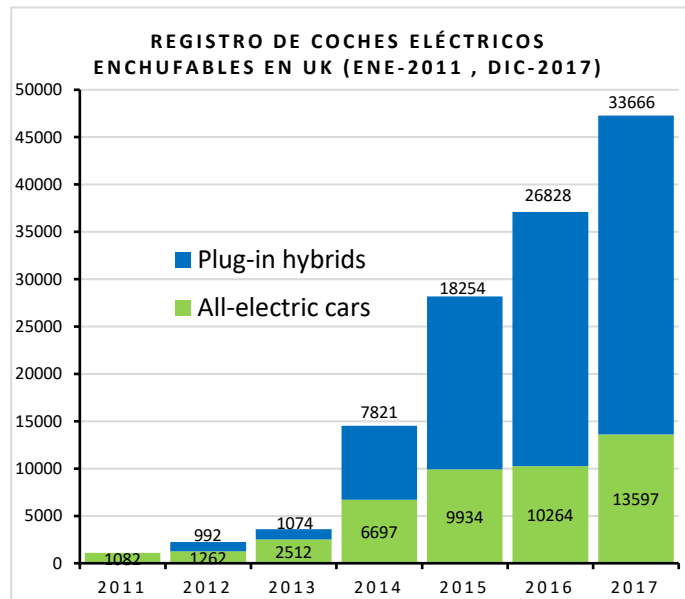
1. Campo de aplicación	2
2. ¿Qué podemos hacer con CES EduPack?	2
3. EcoAudit de las opciones de tren motriz	3
4. Materiales en el diseño de vehículos	5
5. Control de realidad	7
6. ¿Cómo ayuda CES EduPack al aprendizaje?.....	8
Referencias.....	8

Resumen

CES EduPack no solo proporciona un enfoque racional y sistemático para la selección de materiales, sino que también cuenta con datos y herramientas útiles para evaluar la sostenibilidad de productos y tecnologías en desarrollo. Esto es esencial para propósitos de enseñanza o capacitación futura en ingeniería y diseño. Las bases de datos disponibles facilitan decisiones relacionadas con los materiales en muchas áreas especializadas. En este caso práctico industrial avanzado, hemos utilizado la herramienta Eco Audit para comparar opciones de automóviles puramente eléctricos, híbridos y de gasolina. También nos enfocamos en materiales con elementos críticos usados en partes cruciales de un automóvil eléctrico, y comparamos las opciones existentes. Esto destaca el vínculo entre la sostenibilidad y el rendimiento de estos vehículos.

1. Campo de aplicación

Los vehículos eléctricos actualmente están experimentando un auge debido a su potencial para reducir la contaminación, las emisiones de gases de efecto invernadero y el coste de funcionamiento, a la vez que conservan un alto rendimiento. Aunque es probable que el motor de combustión interna (ICE) siga siendo dominante a corto y medio plazo, se espera que los vehículos eléctricos tengan un crecimiento significativo y rápido en las próximas décadas. La Agencia Internacional de Energía (AIE) estima que el número de automóviles eléctricos a nivel mundial -incluidos los híbridos enchufables o totalmente eléctricos- puede superar los 9 millones en 2020 y los 20 millones en 2025 [1]. Al observar las opciones disponibles para los/as diseñadores/as de automóviles, buscamos mejorar la comprensión de las decisiones materiales y sus consecuencias.



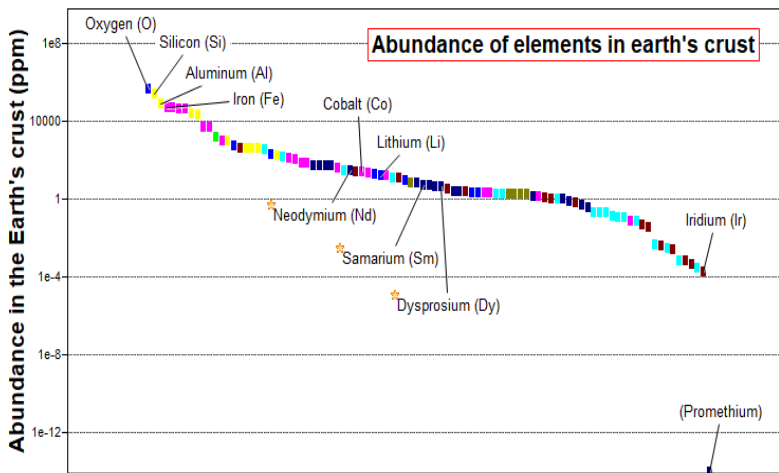
Society of Motor Manufacturers and Traders (SMMT) (2018-01-05). "December – EV registrations".

Un problema que ha surgido al aumentar las ventas de vehículos eléctricos es el acceso seguro y sostenible a ciertas materias primas críticas (CRM). La alta demanda de CRM y la abundancia natural limitada dan lugar a serias preocupaciones por el suministro. La diversificación, la sustitución, la reducción o el reciclaje mejorado de estos materiales se han propuesto como posibles soluciones a este problema. La industria automotriz es una de las más grandes del mundo, y cada vez se utilizan más CRM en la producción de vehículos [2]. Esto incluye elementos, como el niobio y los metales del grupo del platino (paladio, platino y rodio) [3]. La electrificación de los vehículos de pasajeros también exige un mayor uso de elementos de tierras raras, como el neodimio y el disprosio para los motores [3], así como de litio, cobalto y grafito para el almacenamiento de energía a bordo.

2. ¿Qué podemos hacer con CES EduPack?

Las propiedades ecológicas y los aspectos de sostenibilidad de los productos no son obvios, incluso conociendo los materiales involucrados. Se debe considerar todo el ciclo de vida (o varios ciclos de vida en una economía circular). El desafío, generalmente, es seleccionar materiales para maximizar los aspectos más relevantes. Por ejemplo, minimizar la masa y el impacto ecológico, teniendo en cuenta las materias primas y las opciones del producto al final del ciclo. CES EduPack ofrece varias posibilidades para investigar y discutir la sostenibilidad y el eco-diseño. En el caso de los vehículos eléctricos, un buen punto de partida es el Eco Audit, con el que analizar la dimensión ecológica de los vehículos antes mencionados. El Eco Audit, ofrece una visión general de la importancia relativa de la fase del material, las fases de fabricación y uso, así como el efecto del reciclaje del material y otros posibles destinos finales [4].

Diesel - family car
Electric - family car
Electric - rail
Gasoline - family car
Gasoline - super sports and SUV
Hybrid gasoline/electric - family car
Kerosene - long haul aircraft
Kerosene - short haul aircraft
Kerosene - helicopter
LPG - family car



Hay muchas herramientas en CES EduPack que se pueden usar para investigar los motores eléctricos y las baterías. Se puede representar el rendimiento de los motores eléctricos y las baterías mediante tablas y gráficas con las propiedades relevantes. Estas pueden aclarar por qué las baterías de ion-Li y los imanes basados en Nd son las opciones más usadas en la actualidad. Toda la información sobre materiales críticos y sus principales áreas mineras, está disponible en la base de datos Los Elementos (*The Elements*).

3. EcoAudit de las opciones de tren motriz

La fase de uso (*use*) del Eco Audit consta de dos modos. El modo móvil (*mobile mode*) es ideal para el análisis básico de vehículos y usa los datos en el software sobre los vehículos y combustibles más típicos. Se obtiene como resultado el promedio de energía consumida y de CO₂ emitido por km y kg. También se puede diferenciar según el país (*country of use*).

The screenshot shows the 'Use' configuration window with the following settings:

- Product life: 10 Years
- Country of use: Europe
- Static mode: Product uses the following energy:
- Mobile mode: Product is part of or carried in a vehicle:
- Fuel and mobility type: Gasoline - family car
- Usage: 250 days per year
- Distance: 100 km per day

Se puede encontrar una Lista de materiales (BOM-*Bill of Materials*) entre los archivos de proyecto para Eco Audit, que están integrados en el software, normalmente en el disco local *C:\Archivos de programa (x86)\CES EduPack 2018\Samples\eco_audit\en*. Tenemos datos simplificados para un automóvil familiar, que podemos usar o adaptar para facilitar las comparaciones y visualizar las tendencias. Aquí, lo hemos modificado para representar cuatro casos diferentes (nº1-4). Un auto de gasolina, un híbrido gasolina-eléctrico, un híbrido enchufable y uno completamente eléctrico. La fase de uso y la BOM tenemos que adaptarla a cada caso.

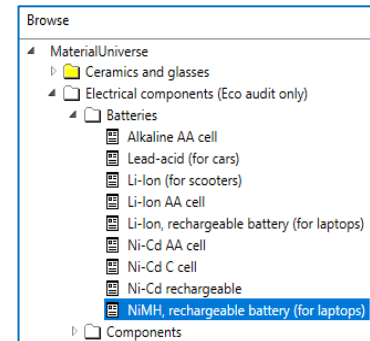
Hemos resumido algunos datos del Volkswagen Golf en la tabla de la derecha, que para este caso nos sirve a la perfección como una base de comparación, ya que lo hay en modelos de gasolina, híbridos enchufables (GTE) y totalmente eléctricos (e-Golf).

Model	Golf ICE	Golf GTE	e-Golf
Battery capacity	-	8.7 kWh	24.2 kWh
Battery weight	-	120 kg	318 kg
Car weight	1318 kg	1515 kg	1540 kg

Podemos comenzar la comparación adaptando la BOM para el caso de referencia (gasolina, nº1). Partimos de la base de datos de Sostenibilidad Nivel 3 (*Sustainability Level 3*). Hacemos clic en el botón Eco Audit en la barra de herramientas y luego en el botón Abrir (*Open*) dentro del proyecto Eco Audit. Buscamos el archivo de proyecto *Level 3 – Family car* (el archivo de Nivel 2 funcionará si estás en la base de datos del Nivel 2) en el disco local, como se describe arriba. Modificamos la masa de aluminio en la BOM, restando 200 kg de Al para hacerlo más realista a un coche típico actual. Al reemplazar el valor predeterminado por 238 kg, reducimos el peso total del automóvil a alrededor de 1500 kg. En algunos automóviles modernos, como el Golf 1.2 TSI, un motor de aluminio pesa menos de 100 kg. También hemos añadido en la definición del producto (*product definition*) un transporte de 1000 km desde la fábrica en un camión de 26 toneladas (3 ejes), y consideramos, como se muestra arriba, 10 años de vida útil (*product life*) del producto usado en Europa.

Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	Secondary process	% removed	End of life	% recovered
1	Steel content	Low alloy steel, AISI 3140...	Typical %	850	Roll forming		0	Recycle	100
1	Aluminium content	Aluminum, 355.0, per...	Typical %	238	Casting		0	Recycle	100
1	Thermoplastic content (PU	TPU(r) (molding)	Virgin (0%)	148	Polymer extrusion		0	Landfill	100
1	Thermoset content	Polyester (cast, rigid)	Virgin (0%)	93	Polymer molding		0	Landfill	100
1	Elastomer content	Butyl / Halobutyl rubb...	Virgin (0%)	40	Polymer molding		0	Landfill	100
1	Glass content	Borosilicate - 2405	Typical %	40	Glass molding		0	Recycle	100
1	Other metal content	Copper, C14200, hard (to...	Typical %	61	Extrusion, foil rolling		0	Recycle	100
1	Textile content	PE-LD (molding and e...	Virgin (0%)	47	Polymer extrusion		0	Landfill	100

Podemos crear el automóvil híbrido eléctrico (HEV) (nº2) utilizando la opción *Compare with* y crear así una copia (*copy of current product*) del modelo de gasolina. En la fase de uso (*use*) mantenemos los valores previos y elegimos *Hybrid gasoline/electric – family car* en el Modo móvil (*mobile mode*). Esto nos proporciona una estimación aproximada del consumo energético y de las emisiones por km y kg para los automóviles híbridos. Con el fin de tener en cuenta la masa de la batería en los automóviles eléctricos, que añaden un peso significativo, hemos incluido 42 kg de *NiMH rechargeable battery (for laptops)*. Para baterías híbridas, podemos usar registros especiales en la carpeta de componentes eléctricos (*electrical components*).



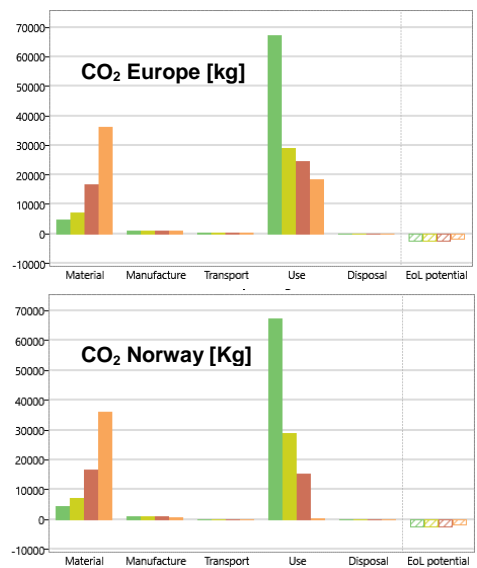
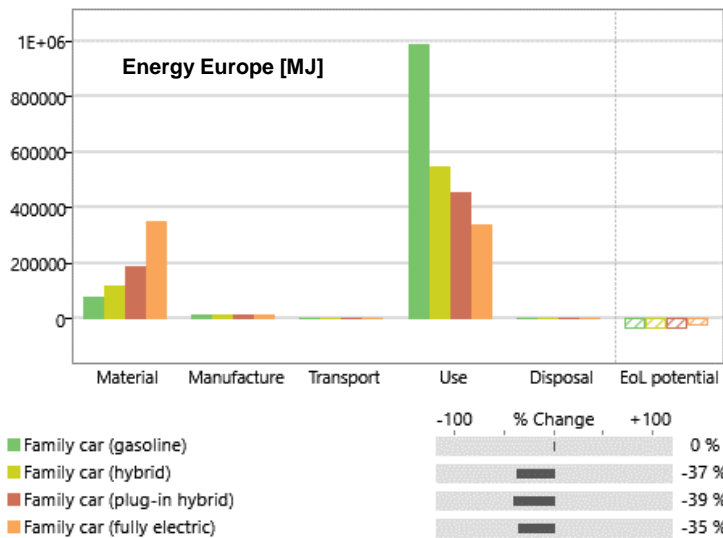
Pero, un automóvil híbrido tradicional como el Toyota Prius anterior todavía usa gasolina, aunque con un tren motriz más eficiente. Por lo tanto, el país de uso y su combinación energética, no afectarán las emisiones de CO₂. Para tener las ventajas de los vehículos eléctricos, se debe considerar un híbrido enchufable (*plug-in-hybrid* o p-HEV) (nº3). Esta opción es cada vez más popular, como se ve en el diagrama de la primera página. El peso de baterías será mayor que para los híbridos regulares, pero menos que los vehículos totalmente eléctricos. Para el híbrido enchufable, hacemos otra copia del producto actual y modificamos la batería a 120 kg, que imita al Golf GTE. Tesla realmente usa baterías similares producidas en masa.

La inclusión del híbrido enchufable es complicada, ya que la relación entre el consumo de gasolina y electricidad depende de la distancia recorrida. Suponemos que se mantiene la distancia diaria de 100 km, pero que 50 km se hacen usando energía de la gasolina, y 50 km de la batería, valor

oficial del Golf GTE. El rendimiento con gasolina será similar al automóvil familiar híbrido en modo móvil, pero con una mayor autonomía en modo eléctrico. La energía eléctrica de la batería se obtiene al cargarla enchufándola a la red eléctrica y puede incluirse en el modo estático de uso. Cargar la batería implica la conversión de energía eléctrica a química, con algunas pérdidas. La capacidad de la batería es de alrededor de 8 kWh, por lo que se puede cargar en casa con alrededor de 2 kW de potencia durante 4 h. Debe cargarse cada día que se usa el automóvil, 250 días por año en este caso. Diez años podría ser una esperanza de vida optimista, ya que la garantía de la batería cubre los ocho primeros años.

El automóvil 100% eléctrico (EV) (nº4) podemos simularlo con uno de los modos de uso móvil (*Mobile use*). Sin embargo, en analogía con el caso híbrido enchufable, asignamos los 100 km de la fase de uso en el modo estático, cargando con 2 kW durante 8 h, 250 días al año (el doble que el híbrido enchufable anterior para tener 100km de autonomía). Así, se incluyen pérdidas de energía asociadas al cargar la batería, en lugar de mirar el consumo promedio de energía en la carretera. Las diferencias entre los modos estático y móvil es un buen tema de discusión en el aula. El otro ajuste necesario para el automóvil 100% eléctrico es reducir en la BOM 100 kg de Al (no necesita el ICE), y aumentar la masa de baterías Li-ión a 318 kg (datos de e-Golf).

Esto completa las especificaciones de los productos en el Eco Audit y se puede ver la tendencia principal de que, al aumentar la cantidad de batería, se incremente la energía en la fase del material, pero se disminuye en mayor medida la energía en la fase de uso.



Como se muestra en el gráfico principal, el consumo en fabricación y transporte es insignificante. En estas simplificaciones, el beneficio energético es comparable en los tres casos electrificados: una disminución del 35-38%. Las emisiones de CO₂ asociadas se muestran a la derecha: con una combinación energética europea utilizada en la parte superior y el caso de Noruega, país con mucha energía hidráulica (nº3-4).

4. Materiales en el diseño de vehículos

Ha habido un aumento en el número de piezas en los automóviles en las últimas décadas, lo que ha llevado a un aumento en el peso y potencia promedio. Si bien se logró cierta reducción de peso mediante motores más eficientes y/o más pequeños y uso de materiales livianos. El uso de materiales en la industria automotriz se discute ampliamente en la literatura. Hasta hace poco, esas discusiones se centraron en materiales tradicionales que representan la mayoría de la masa total del vehículo, como acero, aluminio, polímeros, vidrio, cobre, plomo, zinc y "otros metales". Esto representa la mayor parte del peso, pero no representa cantidades menores de materiales críticos, típicos de vehículos eléctricos y otros vehículos modernos [2].

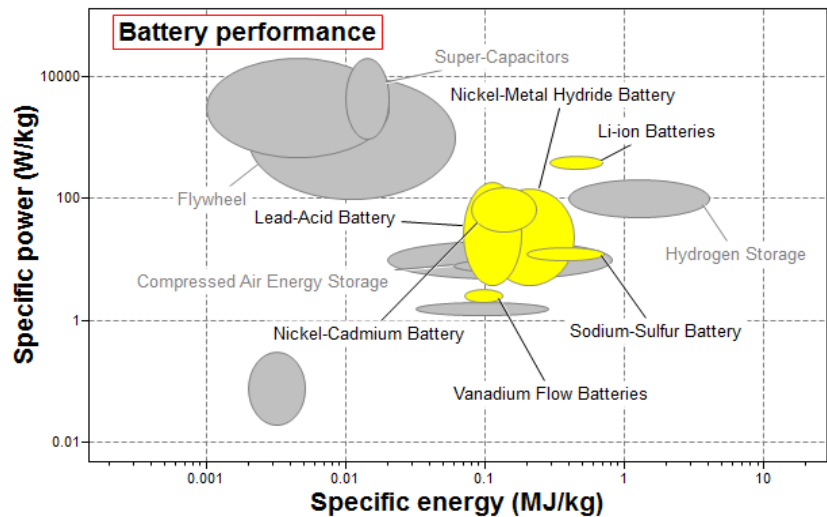
El ion de litio es la tecnología de referencia para baterías de automóviles eléctricos, y en menor medida otros sistemas de baterías, como NiMH. Además de litio, también se emplean cobalto y grafito en estas baterías. También hay varias tierras raras en imanes permanentes para motores eléctricos. Estos son algunos de los elementos más afectados por el aumento de la demanda de EV. Entre los elementos de tierras raras, el neodimio, el praseodimio o el disprosio se usan en imanes de alto rendimiento y sensores electrónicos en la industria automotriz, incluidos los motores de arranque, los sistemas de frenos y los altavoces.

Rendimiento de la batería



Un aspecto crucial del desarrollo del automóvil eléctrico es el almacenamiento de energía. Esto determina el alcance de estos vehículos, pero también afecta a las demandas en infraestructura de las estaciones de carga. Estas son preocupaciones tanto para los clientes como para los fabricantes de automóviles eléctricos. La tabla de datos *Power System*, disponible en la base de datos Nivel 3 de Sostenibilidad, ofrece información sobre varios tipos de almacenamiento de energía (incluso mecánicos, como muelles). El tipo de batería actual más popular para coches eléctricos se basa en la tecnología de iones de litio. La razón de esto se puede visualizar estudiando la energía específica y la potencia específica.

En el gráfico de la derecha se ve por qué las baterías ion-Li son las mejores para almacenar energía electroquímica en los vehículos. Poseen la mejor combinación de energía almacenada por kg (importante para hacer largas distancias) y potencia que pueden generar por kg (importante para acelerar). Otra métrica relevante de rendimiento es la densidad de energía o energía por unidad de volumen (no se muestra en este gráfico), la cual sigue la misma tendencia.

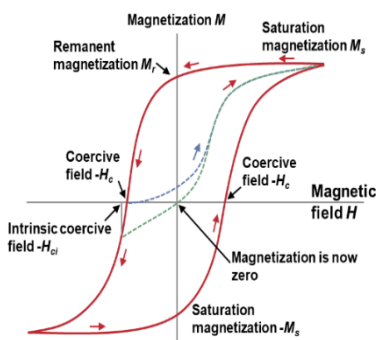


Congo, Democratic Republic of the (COD)		
Datasheet view: Nations of the World Show/Hide		
Human Rights & Good Governance		
Death penalty	ⓘ	Applied
Rule of law index (0 - 100)	ⓘ	3
Control of corruption index (0 - 100)	ⓘ	9
Political stability/no violence (0 - 100)	ⓘ	4
Press freedom index (0, constrained - 100, free)	ⓘ	47.3
The good country index	ⓘ	153
Ongoing conflict?	ⓘ	✓

El litio tiene muchas ventajas como portador de carga, ya que es un elemento ligero. Desafortunadamente, este elemento también es un recurso limitado, lo cual crea desafíos en la producción a gran escala y reciclaje. Los electrodos de litio actuales también se basan en el cobalto, un mineral crítico para la UE y US, ya que se extrae principalmente de la República Democrática del Congo, país con conflictos armados en curso y una gobernanza muy pobre.

Rendimiento del motor eléctrico

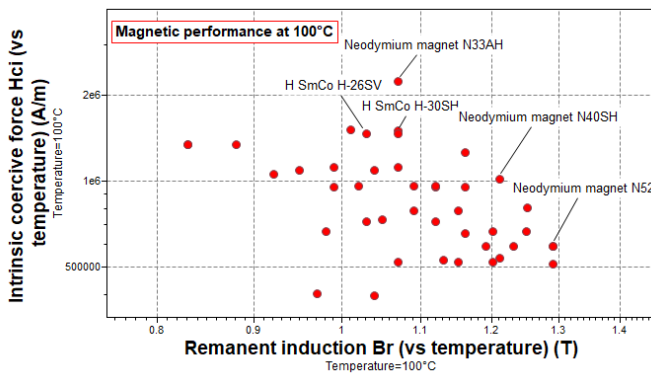
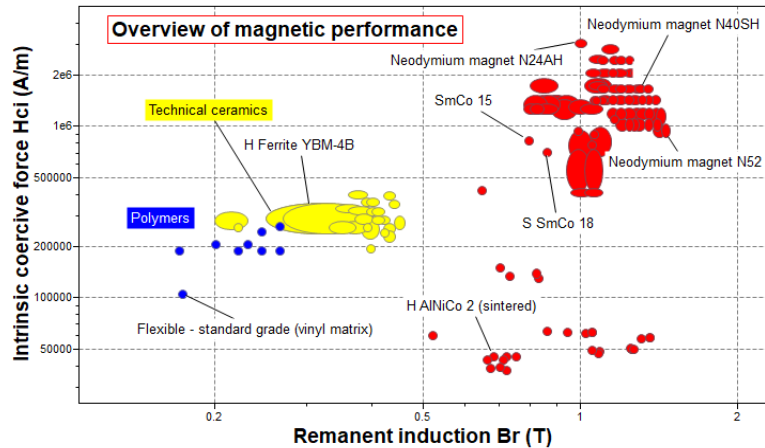
Existen varias tecnologías competitivas para los motores eléctricos en vehículos. Tesla ha atraído mucha atención trabajando con un motor de inducción, sin imanes, en sus modelos anteriores. Los coches híbridos Toyota Prius han estado utilizando un motor tipo imán permanente que permite una mayor eficiencia, reduciendo las pérdidas eléctricas. Los mejores imanes permanentes, sin embargo, contienen tierras raras, lo que plantea preguntas sobre problemas de criticidad, la cadena de suministro, y el impacto ambiental asociado durante su extracción y refinamiento.




(B_r) [5].

El diseño magnético se basa en la curva B-H, o ciclo de histéresis, que caracteriza el material. Esta curva describe el ciclo de un imán en un circuito cerrado cuando se lleva a saturación, se desmagnetiza, se satura en la dirección opuesta y luego se desmagnetiza de nuevo bajo con campo magnético externo. El rendimiento del imán duro está determinado por su máximo producto de energía $(BH)_{max}$, que es una medida de la energía magnética que puede almacenarse por volumen en el material. CES EduPack proporciona datos magnéticos relevantes para este rendimiento en el subconjunto de materiales magnéticos, en el Universo Materiales (*MaterialsUniverse*), Nivel 3. Hay datos sobre BH_{max} , el campo coercitivo (H_c) e intrínseco coercitivo (H_{ci}), así como datos de inducción remanente

El rendimiento de los imanes duros se puede ver utilizando un gráfico de barras de $(BH)_{max}$. Esto corresponde a encontrar una combinación de alta fuerza coercitiva intrínseca (resistencia a la desmagnetización) y una alta inducción remanente. Un gráfico que muestra estas dos propiedades individualmente se puede ver a la derecha. Los imanes basados en neodimio y samario-cobalto muestran el mejor rendimiento (esquina superior derecha de la tabla).



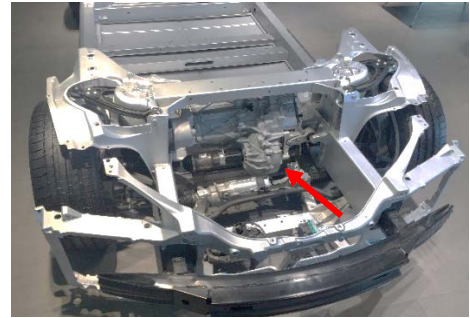
Para investigar temperaturas más realistas a las condiciones de servicio en los autos eléctricos, se puede ver como varían las propiedades magnéticas con la temperatura en CES EduPack. Es fácil modificar el [parámetro](#) en el software para, por ejemplo, 100 °C. Si hacemos esto, el resultado muestra que los mejores imanes son los basados en Nd y SmCo. La información sobre la nomenclatura y las denominaciones de estos dos tipos particulares de imán se puede encontrar en los registros de nivel. 

5. Control de realidad

Hay dos desarrollos recientes e interesantes en el área de autos eléctricos y materiales críticos. En primer lugar, Tesla ha desarrollado sus baterías de ion-Li para reducir el contenido de cobalto hasta el 2.8%, mediante el uso del cátodo Ni-Co-Al con el litio, considerablemente menos que el contenido anterior de Co. Dado que el precio del Co se ha incrementado, y que el abastecimiento es problemático desde el punto de vista de la sostenibilidad, este es un progreso positivo. Algunos tipos de materiales para el cátodo se muestran a continuación, siendo la opción del medio una muy común [6].

Cathode Metals	LiNi _{0.8} Co _{0.15} Al _{0.05} O ₂ (Gaines) mass%	LiMn ₂ O ₄ (Gaines) mass%	LiNiMnCoO ₂ (Richa) mass%	LiCoO ₂ (Wang) mass%	LiFePO ₄ (Wang) mass%
Aluminum	21.9	21.7	22.72	5.2	6.5
Cobalt	2.3	0.0	8.45	17.3	0
Copper	13.3	13.5	16.6	7.3	8.2
Iron/Steel	0.1	0.1	8.79	16.5	43.2
Lithium	1.9	1.4	1.28	2.0	1.2
Manganese	0.0	10.7	5.86	0	0
Nickel	12.1	0.0	14.84	1.2	0

En segundo lugar, Tesla ahora también ha introducido imanes NdFeB en sus motores. Estos requieren elementos de tierras raras, pero reducen las pérdidas eléctricas en el sistema. Comparado con los motores eléctricos con imanes tradicionales, también disminuyen el peso, pero comparado con los motores de inducción, son más pesados y más costosos. Al utilizar un imán NdFeB sinterizado, ha sido posible aumentar el rendimiento y reducir aún más el volumen necesario para un motor eléctrico. La imagen de la derecha muestra como el motor eléctrico está integrado en el automóvil.



6. ¿Cómo ayuda CES EduPack al aprendizaje?

CES EduPack es un excelente recurso para enseñar ecodiseño e investigar cuestiones relacionadas con la sostenibilidad. Al trabajar con herramientas visuales interactivas, el/la docente puede mostrar fácilmente cómo tomar decisiones sobre materiales, y los estudiantes pueden explorar formas de seleccionar y evaluar materiales en proyectos realistas. Nuestros casos prácticos están destinados a inspirar y guiar el desarrollo de productos, proporcionar los conocimientos necesarios y facilitar la comprensión.

En este caso de estudio, CES EduPack sugiere las siguientes conclusiones sobre vehículos eléctricos:

- Al desarrollar productos y aprender sobre el diseño del producto, es importante observar todo el ciclo de vida lo antes posible. La herramienta Eco Audit facilita esta tarea y se ha utilizado en este caso práctico para comprender las diferentes opciones para el tren motriz de los automóviles.
- La base de datos de Desarrollo Sostenible (*Sustainable Development*) tiene una gran cantidad de materiales especializados y otros datos organizados en subconjuntos. Hemos explorado con éxito materiales magnéticos para motores eléctricos y tablas de datos de almacenamiento de energía (*Energy Storage*) para baterías. Además, los datos de criticidad han demostrado ser de gran utilidad.
- Las herramientas de visualización nos permiten tener una visión general de las propiedades para comparar diferentes opciones fácilmente. Por ejemplo, que la batería ion-L es una alternativa muy competitiva y que los imanes permanentes de neodimio tienen el mejor rendimiento.

Sin embargo, hacemos hincapié en que los resultados son estimaciones de una Eco Auditoría, que es un inventario optimizado del ciclo de vida. Contiene aproximaciones y se basa en datos ecológicos que tienen incertidumbres considerables. Los resultados están destinados a ser utilizados como base para la discusión, y no deben tomarse como valores reales para ninguno de los automóviles mencionados en el texto.

Referencias

1. International Energy Agency IEA, *Global EV Outlook 2017*, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVOutlook2017.pdf>
2. Mayyas, Ahmad, et al. "Vehicle's lightweight design vs. electrification from life cycle assessment perspective." *Journal of Cleaner Production* 167 (2017): 687-701.
3. F. R. Field III et al. *Strategic materials in the automobile: a comprehensive assessment of strategic and minor metals use in passenger cars and light trucks*, *Environmental science and technology* 51.24 (2017): 14436-14444.
4. M.F. Ashby, *Materials and the Environment*, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2012.
5. M.F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 5th edition, Butterworth Heinemann, Oxford, 2016.
6. Vaalma, Christoph, et al. "A cost and resource analysis of sodium-ion batteries." *Nature Reviews Materials* 3 (2018)18013.