



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

**IMPACTO DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS SOBRE LA INDUSTRIA
AUTOMOTRIZ A PARTIR DEL DESARROLLO TECNOLÓGICO DE
BATERÍAS**

TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACIÓN

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

RODRIGO SALAS FLORES



CD.MX., D.F. 5 de DICIEMBRE DE 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: FEDERICO CARLOS HERNANDEZ CHAVARRIA

VOCAL: HECTOR ISRAEL BASAVE RIVERA

SECRETARIO: OSCAR DE ANDA AGUILAR

1er. SUPLENTE: IBET NAVARRO REYES

2° SUPLENTE: JESUS ENRIQUE VARGAS MEDRANO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

FACULTAD DE QUÍMICA

ASESOR DEL TEMA:

ING. HÉCTOR ISRAEL BASAVE RIVERA

SUSTENTANTE (S):

RODRIGO SALAS FLORES

TABLA DE CONTENIDO

1. Planteamiento del problema	1
2. Metodología	1
3. Desarrollo	1
La industria automotriz	2
Barreras de entrada.....	3
Tendencias de cambio en la industria	3
Tecnologías de baterías para vehículos eléctricos	2
Baterías para vehículos eléctricos.....	3
Parámetros de rendimiento	3
Química de baterías	3
Avances tecnológicos de baterías.....	3
Costos de baterías	3
Mercado de vehículos eléctricos	2
Descripción de vehículos eléctricos	3
Mercado de vehículos eléctricos: situación actual	3
Pronósticos de demanda.....	3
4. Análisis	4
Cadena de valor	5
Actividades primarias	6
Actividades de apoyo	3
Impacto sobre la industria automotriz	5
Entorno de operación	6
Entorno industrial.....	6
Entorno remoto.....	6
5. Conclusiones	4
6. Anexo I: Estudio de caso Tesla Motors	4
Nuevos entrantes	5
El modelo 3	5

ÍNDICE DE FIGURAS, GRÁFICOS Y TABLAS

Figuras

Figura 1. Clasificación de actividades de la cadena de valor.....	6
Figura 2. Modelo de análisis ambiental Pearce y Robinson	8
Figura 3. Diagrama del funcionamiento básico de una batería.....	20
Figura 4. Cadena de valor para baterías de vehículos eléctricos	22
Figura 5. Celda de una batería Li-ion.....	29
Figura 6. Composición del mercado de vehículos eléctricos.....	49
Figura 7. Megatendencias principales de la industria automotriz.....	85

Gráficos

Gráfico 1. Desglose de los costos de una batería NMC ion-litio, 2015	28
Gráfico 2. Composición del costo de baterías ion-litio, 2013 - 2016	41
Gráfico 3. Evolución del stock global de coches eléctricos (BEV+PHEV), 2010 – 2016	50
Gráfico 4. Escenarios para el stock global de vehículos eléctricos (BEV + PHEV), 2015-2030	58
Gráfico 5. Costo total de vehículos ICE y EV con subsidios, modelos 2017	60
Gráfico 6. Costo total de vehículos ICE y EV sin subsidios, modelos 2017	61
Gráfico 7. Registro y pronóstico de costo de baterías Li-ion para EV, USD/ kWh	62
Gráfico 8. Paridad de costo entre vehículos ICE y EV sin subsidios, USD/ milla	63
Gráfico 9. Evolución de la densidad de energía y costos de baterías Li-ion	73
Gráfico 10. Promedio de componentes ICE y EV producidos anualmente por empleado	78
Gráfico 11. Modelos de vehículos eléctricos vendidos en Estados Unidos, 2016	98

Tablas

Tabla 1. Tipos de ventaja competitiva en la cadena de valor.....	7
Tabla 2. Producción utilizada por la industria automotriz de industrias complementarias (%)......	10
Tabla 3. Reducciones en costos de componentes de baterías de Li-ion para aplicaciones de EV	42
Tabla 4. Términos y acrónimos para vehículos híbridos y eléctricos	46
Tabla 5. Clasificación de estaciones de carga	47
Tabla 6. Vehículos completamente eléctricos disponibles en el mercado, 2016	52
Tabla 7. Inversiones en el desarrollo de nuevos modelos eléctricos, 2022 – 2025	53
Tabla 8. Efecto de políticas gubernamentales sobre la venta de BEV y PHEV en una selección de países, 2016.....	54
Tabla 9. Pronósticos de demanda de vehículos eléctricos, 2030 - 2040	56
Tabla 10. Comparación de componentes de vehículos eléctricos y de combustión para funciones similares.....	65
Tabla 11. Incentivos para la implementación de infraestructura de carga para EV	71
Tabla 12. Comparación de baterías Li-ion más comunes en el mercado	74
Tabla 13. Rutas para mejora de celdas y paquetes de batería	76

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El automóvil ha adquirido una relevancia social y económica que supera su rol original como medio de transporte. Con mil millones de coches actualmente en uso, y una variedad de negocios complementarios empleando a millones de personas, el automóvil ha creado una de las industrias de mayor peso económico para las naciones más influyentes del mundo.

A pesar de su prolongada historia, y a diferencia de numerosos sectores económicos, las características inherentes de la industria del automóvil la han mantenido aislada de nuevas innovaciones. Como tal, ha permanecido un mercado maduro dominado por unos pocos actores clave y prácticamente inmune a cambios drásticos.

Sin embargo, acontecimientos recientes relacionados a la industria automotriz tienen el potencial de causar disrupciones a gran escala en la forma de nuevos medios de transporte, que a su vez tendrán consecuencias duraderas sobre la industria. Por un lado, cambios significativos en el panorama político han obligado a los fabricantes de automóviles hacia formas alternativas de energía, lo que a su vez ha allanado el camino para un mercado creciente de vehículos eléctricos.

Las recientes innovaciones tecnológicas, en particular los cambios en las batería de coches eléctricos, es el otro cambio dentro de la industria automotriz que ha catapultado a los vehículos eléctricos desde un nicho de mercado de lujo a un competidor serio del automóvil tradicional.

Si bien es pronto para saber el futuro de la industria automotriz, es una certeza que los vehículos eléctricos jugarán un papel importante en su transformación. Este trabajo se centrará en señalar las condiciones necesarias para una adopción masiva de vehículos eléctricos a partir de cambios recientes dentro y fuera de la industria, y los efectos potenciales que esto tendrá en la industria automotriz y su entorno circundante.

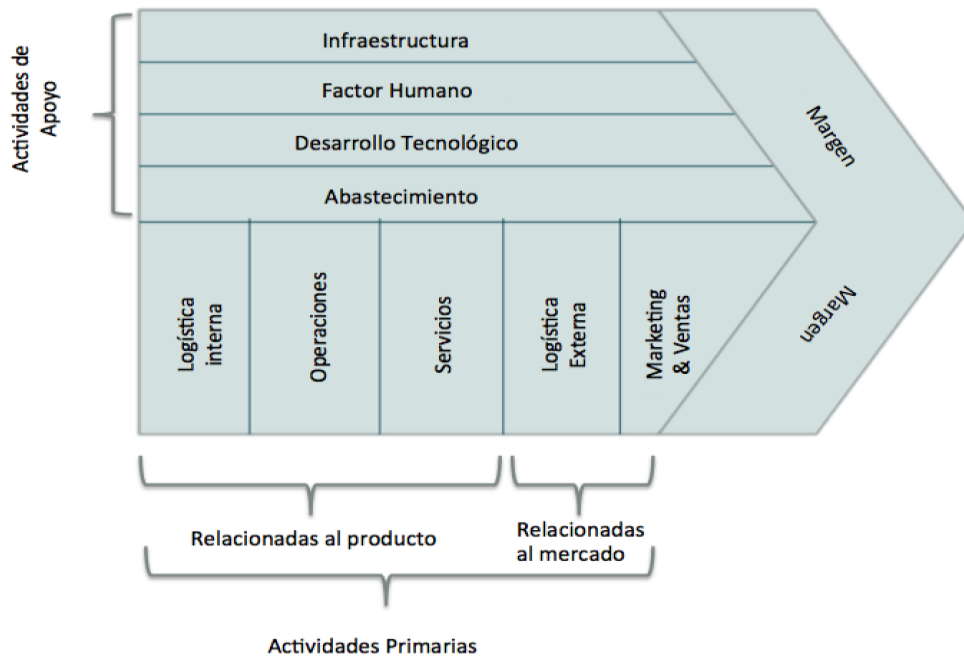
METODOLOGÍA

Cadena de valor de Michael Porter

El análisis de la cadena de valor ayuda a visualizar y comprender las actividades de una empresa, con el fin de determinar cuáles son las que aportan un mayor valor agregado y cuáles pueden ser mejoradas para posteriormente ser transformadas en ventajas competitivas.

El modelo de Michael Porter del análisis de la cadena de valor fue introducido en 1985 y representa todas las actividades internas que una empresa realiza para producir bienes y/o prestar un servicio. La clasificación de actividades se desglosa en actividades primarias que le otorgan valor agregado al producto o servicio final de manera directa y las actividades de soporte que tienen la misma función pero de manera indirecta.

Figura 1. Clasificación de actividades de la cadena de valor



Fuente: Saha, A. (2011). *Mapping of Porter's value chain activities into business functional units*. *Management Innovation Exchange*. <http://www.managementexchange.com/hack/mapping-porter-s-value-chain-activities-business-functional-units>

Tanto las actividades de apoyo como las actividades primarias aportan al margen del producto final, pero las actividades primarias son las que crean las ventajas

competitivas que permiten una mayor cantidad de ventas o márgenes superiores para una empresa sobre su competencia. Hay dos tipos de ventajas competitivas, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Tipos de ventaja competitiva en la cadena de valor

Ventaja de Costo	Ventaja de Diferenciación
Se utiliza cuando las organizaciones tratan de competir basándose en costos, y quieren entender el origen de sus ventajas o desventajas de los mismos y cuáles son los factores que los causan	Las empresas que quieren crear un producto o prestar un servicio superior a los existentes usan este tipo de ventaja

Fuente: Elaboración Propia. Value Chain Analysis Ovidijus Jurevicius | Abril 25, 2013

De acuerdo al análisis de la cadena de valor, existen ciertos pasos para poder analizar los dos tipos de ventajas competitivas:

Ventajas de Costos:

- Paso 1. Identificar las actividades principales y de apoyo de la empresa.
- Paso 2. Establecer la importancia relativa de cada actividad en el costo total del producto.
- Paso 3. Identificar los factores de costo para cada actividad.
- Paso 4. Identificar enlaces entre actividades.
- Paso 5. Identificar oportunidades para reducir costos.

Ventajas de Diferenciación:

- Paso 1. Identificar las actividades de creación de valor de los clientes.
- Paso 2. Evaluar las estrategias de diferenciación para mejorar el valor del cliente.
- Paso 3. Identificar la mejor diferenciación sostenible.

Según Porter, “la eficiencia de las actividades depende de los procesos de finalización en las áreas interrelacionadas de la organización, estrategia y táctica. La plataforma de realización de actividades es la organización comercial. La condición previa para realizar actividades de valor agregado es la organización

eficiente, la cual debe tener todas las funciones de valor agregado de las empresas para la interrelación adecuada de las actividades” (Saha, 2011).

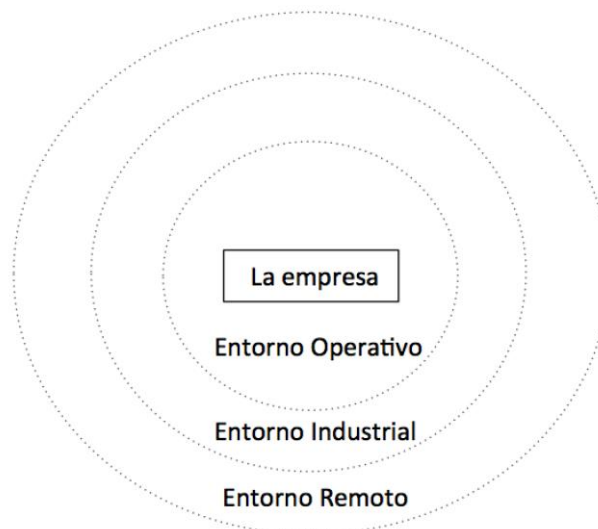
Análisis ambiental externo de Pearce y Robinson

Si bien el análisis de la cadena de valor de Porter trata con los factores internos de una empresa, el modelo de análisis de Pearce y Robinson evalúa los factores ambientales externos al control de una empresa, comenzando por los factores más inmediatos y evaluando aquellos cada vez más remotos.

Este modelo es una herramienta estratégica que analiza el conocimiento de cómo la empresa se verá afectada por la competencia, las influencias políticas, los desarrollos tecnológicos y demás factores dentro de la industria. La agrupación de este conocimiento se denomina como el entorno externo de la empresa.

"El entorno externo es cualquier factor que está más allá del control de las empresas" (Wright, 2015). "Los factores se dividen en tres segmentos diferentes: remoto, industrial y operativo. Los tres están interrelacionados, por lo que lo que afecta a uno puede afectar a otro " (Wright, 2015). Los tres segmentos del ambiente externo a la empresa y su relación a cada uno se muestran en la figura 2.

Figura 2. Modelo de análisis ambiental Pearce y Robinson



Elaboración propia

El entorno más cercano a la empresa, el entorno operativo, trata con factores que provienen del entorno inmediato de la empresa, principalmente aquellos que surgen a partir de la situación competitiva de la industria. El éxito de un negocio "incluira la reacci3n de los acreedores, los proveedores, el mercado laboral y los competidores al nuevo entorno operativo" (Wright, 2015).

El entorno de la industria amplia el alcance de los efectos a un nivel industrial, tanto para la industria que se est1 analizando como de aquellas industrias que son complementarias a su funci3n. Los efectos dentro de la industria pueden incluir nuevas barreras de entrada o nuevos participantes, mientras que las industrias complementarias pueden influir el entorno mediante la disponibilidad de nuevos productos sustitutivos o avances tecnol3gicos que disrumpen los previos paradigmas comerciales.

Si bien el entorno de la industria solo puede afectar a las empresas de esa industria en particular, el entorno remoto consta de elementos que pueden afectar a una empresa, independientemente del tipo, y cuyos efectos van m1s all1 de los efectos econ3micos. La amplitud de estos elementos puede abarcar consecuencias tecnol3gicas, ecol3gicas, sociales e incluso pol3ticas, y puede crear efectos dominantes que se extienden a todas las facetas de los mundos econ3mico y sociopol3ticos.

Al combinar an1lisis que pueden evaluar tanto factores internos y externos de una industria y sus efectos potenciales, es posible crear un panorama detallado de los aspectos clave que determinar1n el 1xito de los veh3culos el3ctricos, y el grado de impacto que tendr1 su 1xito sobre la industria automotriz.

DESARROLLO

La Industria Automotriz

La fabricación de automóviles es un negocio altamente complejo: requiere un promedio de 30 mil piezas individuales por vehículo (Naughton, Webb y Bergen, 2016), lo que a su vez exige una cadena de suministro extensa y una red logística altamente especializada para mantener un negocio rentable.

"Los automóviles utilizan una amplia variedad de materiales, incorporados en componentes y subconjuntos de ensamblaje por cadenas de suministro masivas que abarcan un múltiplo de países y/o regiones. [Los fabricantes de automóviles] tienen que desarrollar los materiales y componentes adecuados, mantener su uniformidad e integridad en toda la cadena de suministro, y asegurarse de que [sus vehículos] operen confiablemente en casi todas las condiciones imaginables en la Tierra" (B. Lee, 2017).

La cantidad de materiales y productos necesarios para montar un automóvil, a su vez, ha convertido a esta industria en la mayor manufacturera del mundo, utilizando partes significativas de la producción anual total de las industrias del acero, del caucho y del vidrio, como se muestra en la tabla 2. El mayor contribuyente al costo de un automóvil son las materias primas utilizadas en su fabricación, que representan el 47% del costo total.

Tabla 2. Producción utilizada por la industria automotriz de industrias complementarias (%)

Industria	Producción utilizada por la industria automotriz
Acero	0.15
Caucho	0.4
Vidrio	0.25

Fuente: N. Suthikarnnarunai. (2008). *Automotive Supply Chain and Logistics Management*. International Multiconference of Engineers and Computer Scientists, (IMECS) Vol. II.

La mano de obra es la mayor fuente de costos después de las materias primas; representa en promedio el 20% del costo total (Kallstrom, 2015). Dado que los

costos laborales varían considerablemente de un país a otro, los salarios y las fluctuaciones monetarias tienden a ser un factor importante para la inversión automotriz, en particular para vehículos pequeños que emplean una mayor cantidad de mano de obra directa en su producción.

La industria también tiene costos fijos elevados, entre los cuales destacan las inversiones de capital. Una empresa automotriz gasta en promedio más de \$ 1 mil millones de dólares en la creación de una nueva planta de ensamblaje, que puede tomar de cinco a ocho años para llegar a su punto de equilibrio asumiendo que operará a un 75-80% de su capacidad (Kallstrom, 2015). En términos económicos, esto se define como tener un alto apalancamiento operativo, cuando los costos fijos representan una parte considerable de los costos totales.

Sumándose al alto apalancamiento de la industria automotriz están los gastos en publicidad e investigación y desarrollo (I + D). La industria automotriz es uno de los mayores consumidores de publicidad: En 2013, General Motors (GM) gastó \$ 5.5 millones en publicidad global, o 3.54% de sus ingresos de ese año (Kallstrom, 2015).

En términos de gastos en I + D, la industria automotriz es la tercera más grande del mundo. En 2013, GM gastó \$ 7.2 mil millones en esfuerzos de I + D, el equivalente a 4.65% de sus ingresos (Kallstrom, 2015). La mayoría de la investigación está dirigida a mejorar la eficiencia de combustible y aumentar el contenido de software a medida que los automóviles se vuelven cada vez más sofisticados.

La cantidad de piezas y materiales necesarios para la producción y montaje de automóviles, aunado a sus altos costos fijos, ha transformado a la industria automotriz en un negocio altamente enfocado hacia la producción, con altas barreras de entrada y una competencia intensa entre los pocos jugadores restantes.

Como tal, en la actualidad hay "sólo 13 naciones en el mundo con las capacidades de diseño, ingeniería y fabricación para construir un coche desde cero" (Kallstrom,

2015), de modo que la industria automotriz está concentrada en unas cuantas regiones del mundo, y en sólo un puñado de jugadores.

Desde la aparición de nuevos mercados de alto crecimiento en los países en desarrollo, China en particular, el dominio de estos jugadores ha disminuido, pero los cinco más grandes (Toyota, General Motors, Volkswagen, Hyundai y Ford) todavía controlan el 49 por ciento de la producción mundial de vehículos (Kallstrom, 2015).

Con la evolución del mercado, los cinco líderes principales de la industria se han convertido en plataformas globales: a medida que las economías de escala aumentaron la producción de vehículos, los fabricantes de automóviles pasaron de fabricantes a ensambladoras a cargo de sus respectivas líneas de producción, y crearon plataformas globales capaces de satisfacer la demanda de producción. Para 2019, se espera que estas plataformas globales representen el 74% de la producción mundial de vehículos ligeros (Sedgwick, 2013, p.3).

Lo mismo dinámica ocurrió con los proveedores de automóviles, que se han consolidado en empresas internacionales capaces de satisfacer las necesidades de los fabricantes de equipos originales (OEM por sus siglas en inglés) en cualquier parte del mundo. Estos mega proveedores "tienen bolsillos suficientemente profundos para construir fábricas en cualquier lugar, apoyar la [innovación] mundial y sobrellevar recesiones en mercados clave como Europa" (Sedgwick, 2013, p.3).

Los mega proveedores también cuentan con los recursos para financiar los esfuerzos a largo plazo de I + D en tecnologías emergentes, tales como vehículos automatizados. En 2014, Bosch (el mayor proveedor de automóviles del mundo) asignó el 9% de sus ingresos a la investigación y el desarrollo, equivalente a más de \$ 6 mil millones de dólares (Sedgwick, 2013, p.3).

Barreras de entrada

El cambio hacia un énfasis en la producción se produjo durante la década de 1970, cuando el mercado automotriz alcanzó su madurez y las innovaciones se centraron en el sistema de producción en lugar del vehículo en sí.

El aumento de la competencia entre los fabricantes de automóviles eliminó a las compañías pequeñas y consolidó el poder de fabricación en unos cuantos jugadores restantes; este fue el punto de origen de las economías de escala dentro de la industria automotriz, que a su vez se asentó como su barrera de entrada más prominente.

Dichas economías de escala se complementaron con los costos fijos de la industria, como son sus altas inversiones de capital, los gastos masivos en I + D y en publicidad. Esto definió las condiciones en la industria automotriz que permanecen hasta el día de hoy, y que hacen tan difícil obtener ganancias por cualquier otro medio que no sea un alto volumen de producción.

Otra barrera de entrada importante es los reducidos márgenes de utilidad de la industria, acentuados aún más por la intensa competencia entre los fabricantes de automóviles. Las bajas utilidades son un efecto secundario del alto apalancamiento operativo presente en todo el sector automotriz, haciendo que los ingresos sean particularmente sensibles a las ventas: un pequeño aumento en los precios de los insumos afecta negativamente a los márgenes de utilidad de manera exponencial.

Los bajos márgenes de utilidad son inclusive más agravados por la demanda de los consumidores. Tradicionalmente, las líneas de producción eran altamente especializadas y diseñadas para producir sólo un modelo. Sin embargo, la exigencia de más variedad por parte de los consumidores ha llevado a los OEMs a personalizar las líneas de producción para acomodar un creciente surtido de modelos vehiculares.

La competencia entre las armadoras les dificulta transmitir los aumentos en los precios de producción al cliente. En lugar de eso, los OEMs extienden los costos a

lo largo de la cadena de suministro, lo que resulta en los bajos márgenes de utilidad de la industria, y a la consecuente necesidad de economías de escala.

"Los fabricantes de automóviles japoneses Toyota y Honda tienen entre los márgenes más altos en el negocio con 13.8% y 13.1% respectivamente. Por el contrario, GM tiene un margen relativamente inferior de 8.5%. Ford tiene un margen UAFIR (utilidad antes de financiamiento e impuesto sobre la renta) del 8.2%" (Kallstrom, 2015).

La tercera barrera de entrada a la industria automotriz es el sistema de producción. Las innovaciones en el sistema de producción "es lo que permitió a [Ford, GM y Toyota] establecer lo que es hasta la fecha una base de producción ineludible" (Dediu, 2015). Las mejoras en los vehículos siguen ocurriendo, pero tienen poco impacto en la dinámica de la industria.

La innovación de mayor impacto fue el sistema "just in time" de Toyota, que sistematizó toda la línea de producción y aumentó la calidad de los vehículos. Previo a esta innovación, la necesidad de mantener las plantas funcionando a una alta capacidad para cumplir con los nuevos volúmenes de manufactura significaba una mayor cantidad de defectos en la línea de producción. Una de las innovaciones del sistema de Toyota fue que cada vez que se presentaba un defecto, paraban la línea y rastreaban el defecto a su raíz para corregirlo antes de reiniciar la producción.

Esto fue un punto de inflexión para la industria automotriz; redefinió el éxito "no como llegar a lo desconocido para lograr cosas sin precedentes", sino como "conducir los residuos, la ineficiencia y los defectos fuera [de la] máquina de producción" (B. Lee, 2017). Dicha innovación es la razón principal por la que Toyota sigue siendo el fabricante de automóviles más valioso de la industria a cuatro décadas de la implementación su sistema de producción.

La barrera final de entrada de la industria automotriz es la riqueza acumulada de las compañías de automóviles, lo cual les permite obstaculizar o duplicar cualquier innovación significativa en su modelo de negocio. Otras tecnologías alternativas, a

pesar de tener ciertas ventajas sobre los automóviles de combustión interna y haber existido durante bastante tiempo (tales como los biocombustibles o los vehículos eléctricos), no han tenido un impacto significativo sobre la industria automotriz.

Esto se debe a que “los jugadores ya establecidos pueden fácilmente adoptar cualquier innovación, ya que mantiene su fórmula de lucro orientada a la producción. Así mismo, aquellos participantes con una innovación [en el motor o sus sistemas complementarios] no pueden construir un modelo de negocio alrededor de su idea sin una base de producción” (Dediu, 2015), y por lo tanto son absorbidos por fabricantes de automóviles ya establecidos o forzados fuera de la industria.

Tendencias de cambio en la industria automotriz

Las crecientes preocupaciones por el cambio climático han sido un elemento constante en el ambiente político moderno, que ha conducido a acuerdos internacionales diseñados para frenar el calentamiento global. La última versión de estos compromisos internacionales dio como resultado el acuerdo climático de París, que ya ha llevado a varios países a promulgar políticas para mitigar los efectos del cambio climático a largo plazo.

“La idea del Acuerdo de París es que cada país, desarrollado o no y sin importar su PIB, establezca metas para reducir las emisiones de dióxido de carbono para prevenir esos efectos.” (Plumer, 2017). Ya que el sector de transporte representa el 23% de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial (Electric Vehicles Initiative, 2017, p. 8), también es uno de los sectores principales sujetos a fuertes recortes de emisiones.

Las políticas resultantes de estos recortes ejercen una presión considerable sobre la industria automotriz y han dado lugar a importantes costos estructurales, así como a un aumento de riesgos financieros en la investigación y desarrollo y en gastos de capital que empeoran los ya débiles márgenes de utilidad del sector.

Esto ha obligado a los fabricantes de automóviles a buscar nuevas maneras de mantenerse competitivos, así como idear maneras de mantener bajos costos de producción.

Un enfoque que han adoptado los OEMs para cumplir con los estándares de emisiones y compensar las bajas utilidades es a través de mejoras continuas de eficiencia y calidad, reduciendo la emisión de gases de sus vehículos en 3 a 4 por ciento al año (*Electric cars are set to arrive far more speedily than anticipated*, 2017). Dado el ritmo y los resultados de eficiencia de las tecnologías implementadas en la actualidad, el desarrollo adicional de motores de combustión interna podrían ser suficientes para cumplir los requisitos de emisión para 2021.¹

"La eficiencia [de los motores de combustión] puede mejorar a través de una amplia aplicación de mejoras del motor (tales como reducción de tamaño, turbo alimentación), hibridación moderada, mejoras a la transmisión y reducción de peso" (Knupfer, Hensley, Hertzke y Schaufuss, 2017).

Sin embargo, las mejoras de eficiencia a los motores de combustión interna, aunque siguen dando resultados, permanece una solución a corto plazo y de rendimientos decrecientes. Mientras que "la eficiencia máxima teórica de un motor de gasolina es alrededor del 56%, [en] la vida real ... 50% será el límite práctico" (Schmitt, 2017). Junto con las innovaciones en materiales ligeros y transmisiones de doble embrague, el rendimiento actual de los mejores motores de combustión ha llegado a ser de aproximadamente 40% (Lippert, 2017), pero las ganancias adicionales de eficiencia son cada vez más difíciles de lograr - por lo general en porcentajes de un solo dígito.

"Europa solía depender de motores de diesel más limpios para reducir las emisiones de CO₂. Pero después de que se descubrió a Volkswagen manipulando resultados de las normas de contaminación en 2015, los clientes y los reguladores son más cautelosos del combustible. Las ventas de diesel han disminuido un 20 por ciento en Francia y Bélgica y un 45 por ciento en Noruega, en comparación con cifras de 2011" (Marshall, Davies y Stewart, 2017).

Las presiones gubernamentales de reducir emisiones e incrementar la eficiencia de los vehículos, acoplado al declive en la confianza y capacidad de los desarrollos de motores de combustión interna, ha forzado a las grandes compañías automotrices a explorar otras opciones de menor impacto ambiental.

El primer gran paso que se ha dado es la prohibición de los coches diesel en la mayoría de las economías más importantes para la industria automotriz: grandes metrópolis como Atenas, París y Madrid han anunciado que prohibirán los coches diésel para 2025 (Marshall, Davies y Stewart, 2017). La Unión Europea está implementando una reducción de 20% en el nivel de emisiones de CO₂ para 2020 (Berckmans et al. 2017, p. 1). Y un número creciente de países europeos se están uniendo al movimiento para forzar la extinción de vehículos a base de combustibles fósiles: Noruega ha anunciado que prohibirá todos los nuevos coches de gasolina y diesel para 2025, mientras que Francia y el Reino Unido harán lo mismo para 2040 (Ewing, 2017).

Francia "también dejará de emitir nuevos permisos de exploración de petróleo y gas este año, y dejará de usar carbón para producir electricidad para 2022 ... como parte de un esfuerzo más amplio por parte [del país europeo] para limitar el calentamiento global" (Ewing, 2017).

La prohibición de los coches diesel ha dado lugar a una creciente popularidad de modos alternativos de transporte, entre los cuales el coche eléctrico domina la escena. Hay cada vez un mayor número de países implementando políticas a nivel federal, estatal y local que promueven la adopción de vehículos eléctricos. "En toda Europa, ciudades como Berlín han creado 'zonas verdes', donde los conductores de vehículos de emisiones elevadas se ven obligados a pagar fuertes multas si entran en estas zonas" (Electric Vehicles Initiative, 2017), mientras que los vehículos eléctricos son libres de entrar. Otras políticas incluyen incentivos monetarios para compradores de vehículos eléctricos en forma de créditos fiscales, exenciones de tarifas de uso y exenciones en la regulación de emisiones.

Junto con las economías de Europa, varias economías emergentes también han introducido regulaciones que afectarán las estrategias de los fabricantes de

automóviles. India, por ejemplo, ha fijado un objetivo tentativo de ventas de vehículos exclusivamente eléctricos o híbridos para 2030 (Ewing, 2017). China aún no ha anunciado una prohibición de automóviles de diesel y gasolina, pero su gobierno planea que su flota vehicular nacional consista de al menos el 8% de vehículos eléctricos o híbridos para 2018, y un 12% para 2020 (Warren, 2017).

Viniendo de importantes centros automotrices, declaraciones de centros automotrices como Francia o China dan un impulso adicional a la transición de motores tradicionales de combustión interna hacia la creciente plataforma de vehículos eléctricos. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA), Austria, Dinamarca, Irlanda, Japón, los Países Bajos, Portugal, Corea y España también han establecido objetivos oficiales para la venta de automóviles eléctricos.

Incluso Estados Unidos, que ha anunciado su retiro del acuerdo de París y que podría relajar aún más las normas de emisión estadounidenses, no impedirá la electrificación de los medios de transporte. Cuarenta y cinco estados y el Distrito de Columbia ofrecen algún tipo de incentivo para vehículos híbridos o eléctricos, desde créditos fiscales o reembolsos hasta exenciones de verificación de emisiones. Adicionalmente, diez estados han adoptado el estándar de vehículos de cero emisiones (ZEV), que estipula que para cualquier fabricante de automóviles con ventas anuales superiores a las 60,000 unidades, al menos el 14% de los vehículos que producen y entregan a la venta deben cumplir con los requisitos ZEV (Electric Vehicles Initiative, 2017, p. 8).

Tecnologías de baterías para vehículos eléctricos

Debido a su importancia económica y tecnológica, las nuevas tecnologías de baterías se encontrarán entre los factores más decisivos para el grado de éxito de los vehículos eléctricos en el mercado automotriz.

Por definición, las baterías están directamente relacionadas con el éxito del vehículo eléctrico en el mercado automotriz: son fundamentales para la industria de los vehículos eléctricos al ser no sólo su fuente de energía, sino también su componente más costoso, que varía entre el 40 y el 45% del costo total de un vehículo eléctrico (Berckmans et al., 2017, pp. 16).

La reciente explosión en la innovación de baterías evidencia su importancia, ya que tanto los OEM como los fabricantes de baterías se esfuerzan por encontrar nuevas químicas de baterías o configuraciones que aumenten la capacidad de energía sin aumentar significativamente los costos de fabricación.

Desde el punto de vista técnico, diferentes tecnologías de baterías continúan compitiendo entre sí, ya que cada una de ellas ofrece ventajas y desventajas que pueden ser explotadas por los fabricantes de baterías. La seguridad, la capacidad de energía y la vida útil se encuentran entre los factores más importantes que los fabricantes de baterías buscan maximizar a través del desarrollo de tanto las tecnologías de baterías existentes como nuevas innovaciones en la próxima generación de baterías.

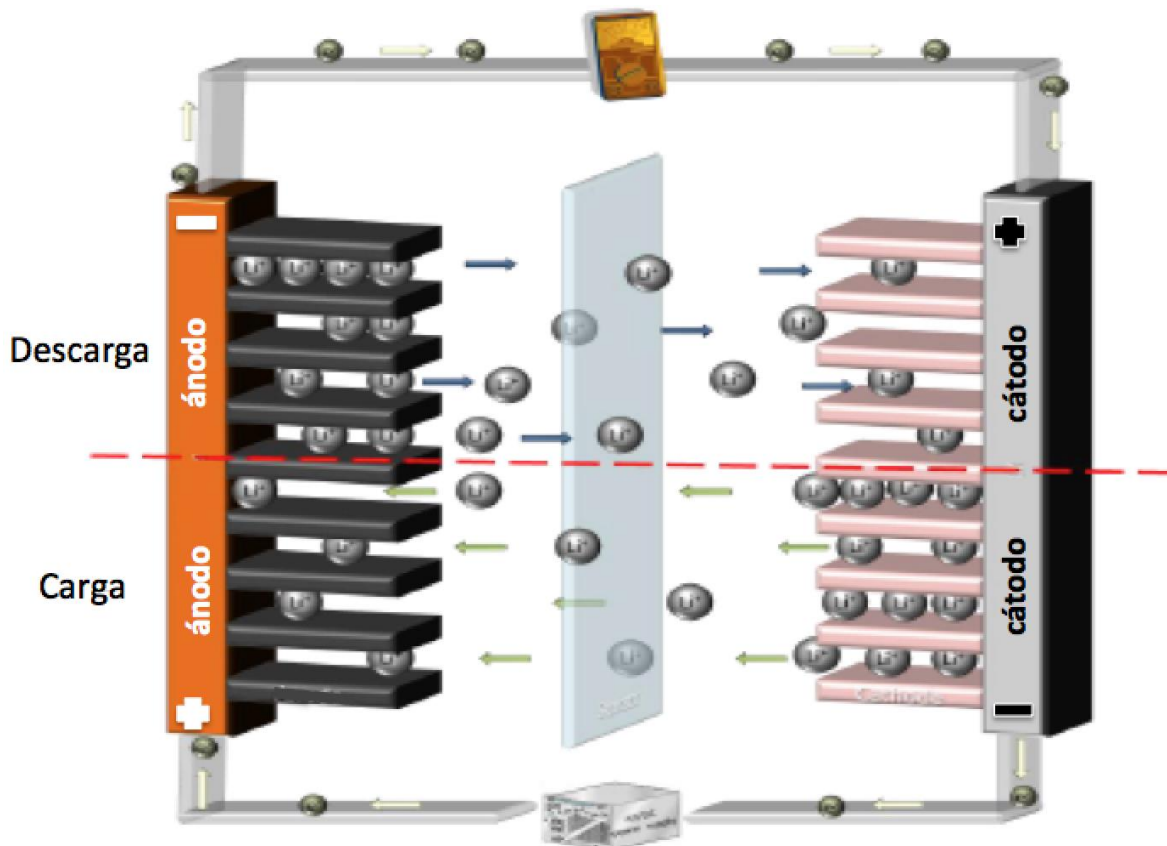
Desde el punto de vista comercial, las economías de escala y la experiencia de la industria desempeñan un papel central en la reducción del costo de las baterías para vehículos eléctricos, sin embargo continúan siendo el principal impedimento económico de las baterías. A medida que se expanden los volúmenes de mercado, el objetivo es reducir los costos de la batería para lograr la paridad con los coches de combustión interna y crear una alternativa atractiva y económica para el consumidor.

Baterías para vehículos eléctricos

Todas las baterías están compuestas por un electrodo positivo y un electrodo negativo, con un electrolito conductor de iones pero eléctricamente aislante entre ellos. Dependiendo de si la batería se está cargando o descargando, los electrodos negativo y positivo están sujetos a una reacción de oxidación o reducción y se denominan ánodo y cátodo, respectivamente.

Durante una descarga de electricidad, el electrodo negativo (ánodo) libera electrones a través de una reacción de oxidación que son aceptados por el electrodo positivo (cátodo), donde tiene lugar una reacción de reducción. El flujo de electrones desde el ánodo al cátodo crea un circuito que le proporciona energía eléctrica al dispositivo conectado a la batería.

Figura 3. Diagrama del funcionamiento básico de una batería



Fuente: Berg, H., Matic, A., y Johansson, P. (2017). *Emerging Battery Technologies Towards 2025* (pp. 1 - 45). Swedish Hybrid Vehicle Center.

Durante la carga de la batería, la reacción se invierte: el ánodo y el cátodo cambian sus cargas respectivas, y los electrones fluyen en la dirección opuesta. Para que la reacción ocurra a la inversa, se requiere una fuente de energía externa para proporcionar energía a la batería.

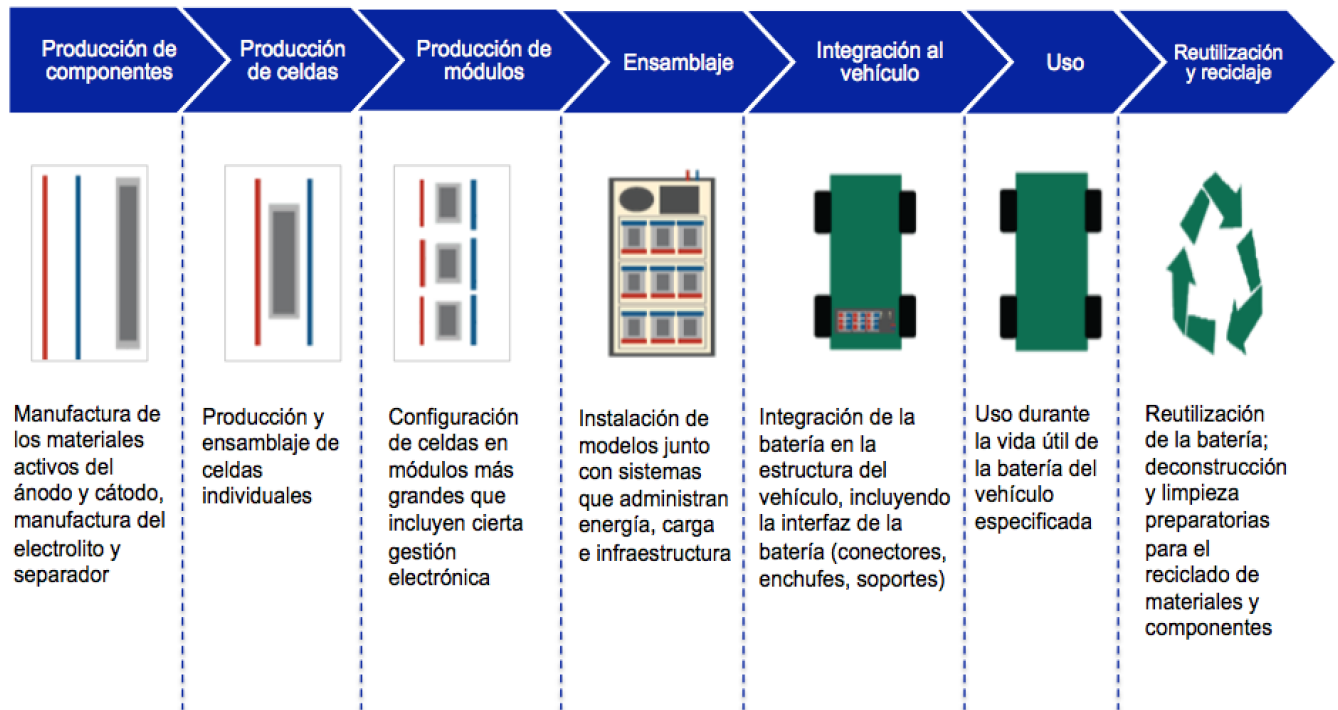
En una celda sellada, el electrolito líquido se mantiene en un separador que impide el contacto eléctrico directo entre los dos electrodos pero permite el movimiento de iones. El separador también sirve como un depósito para electrolito extra, un espacio que permite la expansión del electrodo y, en casos particulares, como un dispositivo de seguridad para evitar un corto circuito, como es el caso de las baterías de ión - litio (Li-ion).

Una batería para un vehículo eléctrico funciona igual que cualquier otra batería, aunque a mayor escala y con añadida complejidad. "Todas las baterías automotrices requieren sistemas elaborados de monitoreo y enfriamiento para controlar la liberación de energía química, prevenir fugas térmicas y garantizar una vida útil razonablemente larga" (Dinger et al., 2010, p.1).

Las baterías para vehículos eléctricos vienen en paquetes de baterías, que se componen de varios módulos colocados en un solo contenedor que proporcionan la administración electrónica y térmica adicional. Los módulos en sí mismos están compuestos de baterías individuales, o celdas, unidas por uniones físicas o por soldadura de las celdas.

“La cadena de valor de las baterías para vehículos eléctricos [ver figura 4] consiste de siete pasos: producción de los componentes (incluye materias primas); producción de celdas; producción de módulos; ensamblaje de los módulos dentro del cuerpo de la batería (incluyendo una unidad de control electrónica y un sistema de enfriamiento); integración del cuerpo de la batería en el vehículo; uso durante la vida útil del vehículo; y reutilización y reciclaje” (Dinger et al., 2010, p.1).

Figura 4. Cadena de valor para baterías de vehículos eléctricos



Fuente: Traducido a partir de Dinger et al. (2010). *Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020*. Boston Consulting Group.

Parámetros de rendimiento

Si bien su función es similar, las baterías diseñadas para vehículos eléctricos son considerablemente diferentes de las utilizadas en dispositivos electrónicos de consumo como computadoras portátiles y teléfonos celulares. Deben poder manejar una alta potencia y capacidad de energía dentro de un espacio y peso limitados, y mantener un rendimiento adecuado en una amplia variedad de condiciones operativas.

El óxido de litio-cobalto, por ejemplo, es la tecnología más prevalente en baterías para aplicaciones de consumo, como celulares y laptops, pero es susceptible a fugas térmicas y tiende a sobrecalentarse. Esto plantea un grave riesgo de seguridad para un paquete de baterías formado por docenas de celdas, y por lo tanto no es apto para aplicaciones automotrices. Debido a que los vehículos son

ubicuos en todo el mundo, las baterías para vehículos eléctricos también están expuestas a un amplio rango de temperaturas, corrientes de carga y descarga, y tiempos de servicio, lo que afecta directamente su rendimiento.

Por esta razón, las baterías para vehículos eléctricos deben cumplir con rigurosos estándares técnicos, que se pueden evaluar a lo largo de cuatro parámetros: seguridad, funcionamiento, vida útil y costo. Las tecnologías de baterías existentes para vehículos ofrecen diferentes niveles de rendimiento en cada una de estas dimensiones, que los fabricantes de automóviles deben conciliar con sus necesidades.

Seguridad. La seguridad es el criterio más importante para las baterías de vehículos eléctricos. La principal preocupación es la fuga térmica, un ciclo de retroalimentación positiva mediante el cual las reacciones químicas de la celda exacerbaban la liberación de calor, lo que puede provocar un incendio. Una batería sobrecargada, corrientes de carga/descarga demasiado altas o un cortocircuito pueden causar una fuga térmica.

Durante una fuga térmica, el alto calor de una celda puede propagarse a la siguiente celda, causando que también se vuelva térmicamente inestable. En algunos casos, se produce una reacción en cadena en la que cada celda se desintegra a velocidades independientes, lo que puede provocar la destrucción de un paquete de batería en unos pocos segundos o en varias horas a medida que se consume cada celda.

Para encontrar un compromiso viable entre una alta densidad de energía y un funcionamiento seguro, los fabricantes de baterías "necesitan decidir cuál es preferible: químicas inherentemente más seguras ... o químicas que ofrecen mayor energía pero son menos seguras, que deben usarse junto con rigurosos sistemas de seguridad" que inevitablemente aumenta los costos de producción (Dinger et al., 2010, pp. 3).

Funcionamiento. Si bien hay varias medidas que se pueden utilizar para evaluar el funcionamiento, la métrica más relevante para los vehículos eléctricos es la capacidad de la batería para almacenar energía, o su energía específica.

La energía específica de las baterías (también conocida como densidad de energía gravimétrica) es su capacidad para almacenar energía por unidad de masa. Se expresa en Watt-horas por kilogramo (Wh / kg) de la siguiente manera:

$$\text{Energía específica} = \frac{\text{Capacidad Ah} \times \text{Voltaje}}{\text{Masa de batería}}$$

- Capacidad amperio-hora (Ah): carga total que se puede utilizar de una batería completamente cargada en las condiciones especificadas predeterminadas por el fabricante.
- Voltaje de la batería: la suma de los voltajes de todas las celdas del paquete de baterías.

La relevancia de la energía específica de una batería se entiende mejor cuando se compara con el motor de combustión interna; la energía específica es el parámetro tecnológico en el que los motores de combustión funcionan hasta cien veces mejor que las baterías, y por ende donde se concentra la mayor parte de la investigación actual de baterías.

La gasolina tiene una energía teórica específica de 13,000 Wh / kg, en comparación con la energía específica de 120 Wh / kg de una batería típica de un vehículo eléctrico (K. Young et al., 2013, pp.19). El alto valor de la energía específica de la gasolina es lo que permite que el motor de combustión interna (ICE) supere su tasa de rendimiento tan baja, y lo que permite a un vehículo convencional la capacidad de viajar entre 500 y 600 kilómetros con un tanque lleno de gasolina.

Debido a que las baterías tienen una eficiencia promedio del 85% para la operación de un vehículo eléctrico (EV), en comparación con la eficiencia del

20-35% de un ICE (K. Young et al., 2013, pp.19), las baterías requieren niveles de energía sustancialmente más bajos para recorrer la misma distancia. Sin embargo, incluso con las densidades de energía actuales de hasta 170 Wh / kg, la energía específica de las baterías sigue siendo sólo el 1% de la energía específica de la gasolina (Dinger et al., 2010, pp. 4).

Peor aún, aún cuando las celdas de las baterías tienen densidades nominales de energía de 140 a 170 Watt-hora por kilogramo (Wh / kg), la energía específica del paquete de baterías resultante es típicamente de 30 a 40% más baja, o de 80 a 120 Wh / kg (Dinger et al., 2010, pp. 4). Sin un avance tecnológico importante, las baterías continuarán limitando el rango de conducción de los vehículos eléctricos a 250-300 kilómetros por carga.

Fabricar baterías más grandes no es una opción. "La energía típica requerida para que un auto [eléctrico] conduzca una milla varía de 0.25 kWh (GM-EV) a 0.30 (GM's Volt) y 0.33 kWh (Tesla's Roadstar)" (K. Young et al., 2013, pp. 30). Para poner un ejemplo, un paquete de baterías de 400 kg con una densidad de energía de 120 Wh / kg puede almacenar 46 kWh de energía y viajar 200 millas entre cargas. Incluso si se produjera un paquete de baterías con la misma densidad de energía que un ICE, el peso excesivo lo haría poco práctico.

Otro factor, llamado potencia específica o densidad de potencia, es importante para la aceleración del vehículo y para la recolección de energía regenerativa del frenado. La densidad de potencia se define como la cantidad de energía que las baterías pueden entregar por kilogramo de masa, expresada en vatios por kilogramo (W / kg). Debido a que el rendimiento de baterías en términos de potencia específica es igual o superior a la de los motores de combustión, ocupa un lugar menor de importancia que la energía específica en cuanto al funcionamiento óptimo de una batería.

La expectativa de que un vehículo eléctrico funcione en cualquier tipo de clima o terreno también plantea importantes desafíos de ingeniería. "Las baterías se pueden optimizar para altas o bajas temperaturas, pero es difícil diseñarlas para

que funcionen en un amplio rango de temperaturas sin incurrir en la degradación del rendimiento [de la batería]" (Dinger et al., 2010, pp. 4).

Una solución es producir baterías especializadas para climas particulares; este enfoque daría como resultado baterías con mayor funcionalidad, pero limitaría seriamente sus condiciones operativas. Debido a que baterías específicas a ciertos climas obstaculizaría la movilidad de los vehículos entre regiones, es probable que los OEM prefieran una desventaja de rendimiento o mayores costos totales para evitar tales restricciones.

Vida útil. La vida útil de una batería se puede medir de dos maneras: su estado de carga y su edad total. La edad total es la cantidad de años que se puede esperar que una batería permanezca funcional, mientras que el estado de carga (SOC) es la capacidad restante de una batería después de un ciclo de carga y descarga. Una vez que el SOC de una batería se degrada al 80% de su capacidad original (K. Young et al. 2013, pp. 21), deja de estar en condiciones de operación. El SOC es difícil de medir con precisión, pero sigue siendo la clave para el funcionamiento seguro y saludable de las baterías.

Tanto el estado de carga como la edad total se ven afectados por las condiciones de funcionamiento de la batería, tales como la corriente de carga y la temperatura. La edad total, sin embargo, es más susceptible a factores externos, en parte porque el envejecimiento se acelera bajo temperaturas ambiente más altas. Para controlar estas incertidumbres, los OEM fabrican baterías lo suficiente grandes para satisfacer las necesidades de almacenamiento de energía a lo largo de la vida típica de un vehículo eléctrico.

"La mayoría de los fabricantes automotrices planean una vida útil de diez años, incluida la degradación esperada de la batería. Por ejemplo, un OEM cuyo vehículo eléctrico requiere nominalmente una batería de 12 kilowatt-hora (kWh) probablemente especifique una batería de 20 kWh, de modo que después de diez años y un 40% de degradación del rendimiento, la batería todavía tendrá suficiente capacidad de energía para su operación normal "(Dinger et al., 2010, p.4).

Este enfoque mitiga los efectos adversos de un SOC disminuido o un envejecimiento acelerado, pero también aumenta el tamaño, el peso y el costo de la batería.

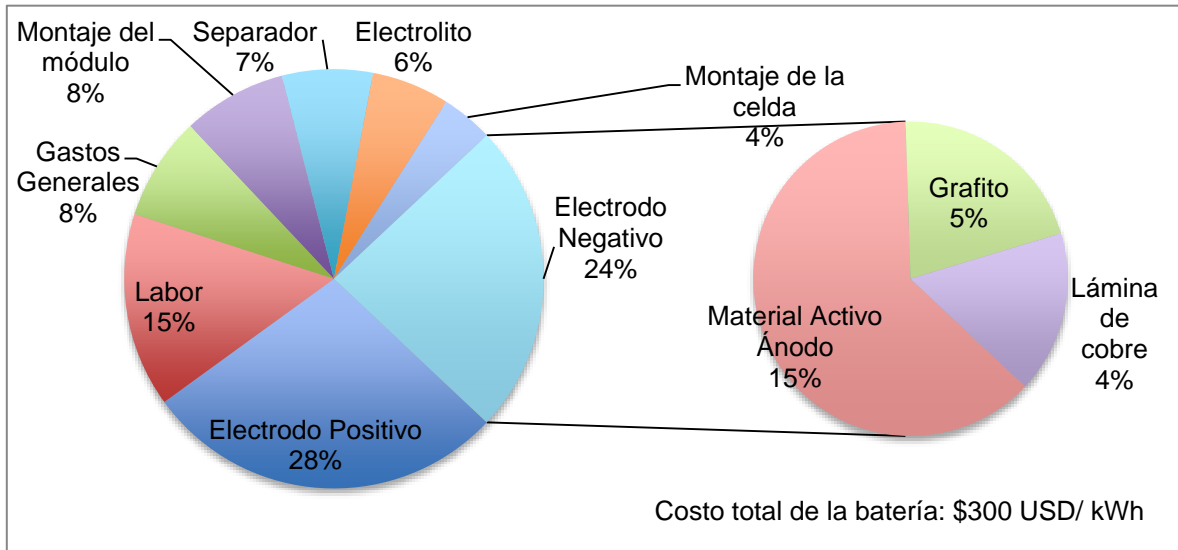
Costo. Los costos de las baterías juegan un papel crítico en la viabilidad comercial de los automóviles eléctricos. Los expertos de la industria coinciden en que para que se produzca una adopción masiva de vehículos eléctricos, los costos de la batería deben caer por debajo de \$100 USD/kWh (Knupfer, Hensley, Hertzke y Schaufuss, 2017, pp. 13) para ser competitivos con vehículos ICE.

Alrededor del 70 por ciento de los costos de la celda y el 75 por ciento de los costos de la batería son dependientes de los volúmenes de producción (Dinger et al., 2010, pp.5). Dado que la producción masiva de baterías para aplicaciones automotrices aún se encuentra en sus primeras etapas, los procesos de producción mejorados rinden un mayor volumen e impulsan la tendencia actual hacia costos más bajos.

A medida que aumentan los volúmenes de producción, "la adquisición de experiencia en la industria y el aumento de la automatización ... [ayuda] a que los costos de la batería disminuyan abruptamente" (Dinger et al., 2010, pp.7). Sin embargo, entre los componentes de costo de las baterías, la celda aún representa entre el 65 y 80% del costo del paquete de baterías (Berckmans et al., 2017, pp.11), y los materiales activos del cátodo y el ánodo utilizados en la fabricación de celdas representan la mitad de los costos de la batería al nivel de la celda y el paquete de baterías por igual.

En el gráfico 1 se muestra el costo de una batería típica de ión-litio : los cálculos se basan en una batería de ión-litio níquel-manganeso-cobalto (NMC) con una relación 6: 2: 2, equipada con materiales de electrodo estándar y un sistema de control y un revestimiento sencillos. Se puede observar que la celda representa el 69% del costo total de la batería, y los dos componentes más costosos son los electrodos positivo y negativo.

Gráfico 1. Desglose de los costos de una batería NMC ion-litio, 2015



Fuente: Berckmans et al. (2017). Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030. *Energies*, 10 (9), 1-20.

Incluso con las economías de escala reduciendo los costos de las baterías, los materiales activos utilizados en los electrodos, cuyos costos son independientes del volumen de producción, seguirán siendo un factor de costo significativo para la producción de la batería.

Química de baterías Li-ion

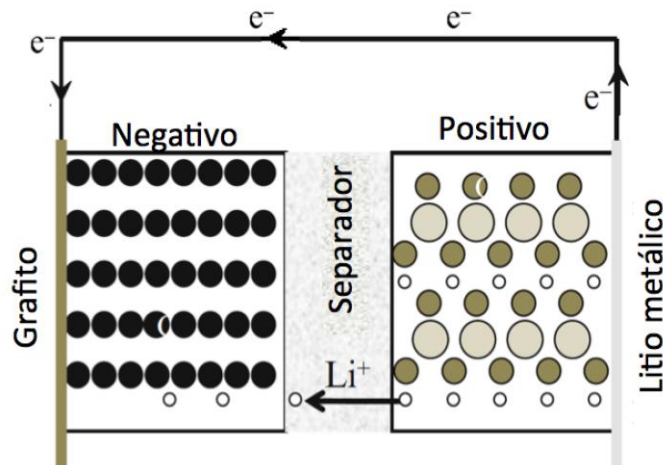
Existen varias tecnologías de baterías que se utilizan en aplicaciones automovilísticas, desde pilas de combustible hasta baterías de níquel e hidruro de metal (NiMH). Sin embargo, "el costo y el peso de la batería de ión-litio, su capacidad de cargarse y descargarse repetidas veces, su durabilidad y su seguridad ... lograda a través de un proceso interminable de afinación" ("Electrifying everything", 2017) durante la última década la ha convertido en la tecnología predeterminada para el desarrollo de vehículos eléctricos.

Entre sus muchas características, las baterías Li-ion tienen dos ventajas fundamentales sobre otras químicas de batería. En primer lugar, Li tiene el menor potencial de reducción de cualquier elemento, lo que permite que las baterías

basadas en litio tengan el mayor potencial de celda posible. En segundo lugar, Li es el tercer elemento más ligero y tiene uno de los radios iónicos más pequeños de cualquier ion cargado. Estos factores permiten que las baterías basadas en Li tengan una alta capacidad gravimétrica y densidad energética.

Como con todas las otras baterías, la batería de Li-ion consiste de un cátodo, un ánodo y un electrolito, como se muestra en la figura 5. El material activo más común en el electrodo negativo es el grafito debido a su bajo costo, abundante disponibilidad, alta conductividad eléctrica y baja expansión de volumen durante carga y descarga. Sin embargo, tiene una tendencia a formar una capa de interfase de electrolito sólido (SEI) inestable a temperaturas elevadas, lo que provoca una grave degradación de su funcionamiento en el largo plazo.

Figura 5. Celda de una batería Li-ion



Fuente: Young et al. (2013). *Electric Vehicle Integration Into Modern Power Networks*. New York: Springer Science & Business Media



El material activo en el electrodo positivo es uno de los muchos óxidos metálicos de litio que se utilizan en la industria: algunos de los más comunes en las aplicaciones automotrices son el óxido de litio-níquel-cobalto-aluminio (NCA), el óxido de litio-níquel-manganeso-cobalto (NMC), óxido de litio-manganeso (LMO), titanato de litio (LTO) y fosfato de litio y hierro (LFP) (Dinger et al., 2010, p.3).

El electrolito más comúnmente usado se compone de un solvente orgánico que contiene una mezcla de sales de litio y aditivos para mejorar la estabilidad y la seguridad de la celda. El electrolito se inserta en un separador de polímero poroso entre los electrodos que impide el contacto eléctrico entre ellos y proporciona un cierre de la celda en el caso de un cortocircuito.

El cuello de botella para la mejora de baterías Li-ion radica en la intercalación de los iones de litio en estructuras de red, que aumenta o disminuye de acuerdo a los materiales utilizados en los electrodos y la solución de electrolito. En una batería Li-ion, los compuestos que componen la red estructural son calcogenuros metálicos, óxidos de metales de transición y compuestos polianiónicos.

Cuanto mayor sea la cantidad de litio que puede albergarse en las estructuras del cátodo y el ánodo, mayor será la energía que la batería pueda almacenar. Sin embargo, el aumento de la intercalación de litio viene a costa de otros factores importantes, como la duración de la batería, el peso y el costo, por mencionar algunos, motivo por el cual continúa el debate acerca de los materiales activos que ofrecen los mejores resultados.

Las baterías NMC tienen un voltaje similar y una capacidad específica similar o más alta que las baterías LCO, dependiendo del modelo, pero tienen un costo menor debido a su menor contenido de cobalto. Los esfuerzos de investigación recientes han producido baterías NMC que mostraron una capacidad específica reversible de hasta 234 mAh g^{-1} y una buena estabilidad de ciclo en condiciones de laboratorio hasta 50°C . Más recientemente, se están produciendo nuevos materiales de cátodo con una composición promedio de $\text{LiNi}_{0.68}\text{Co}_{0.18}\text{Mn}_{0.18}\text{O}_2$, "en los que el material a granel es un óxido en capas rico en níquel para mayor densidad de energía / potencia (mayor contenido de Ni permite una mayor extracción de Li sin deterioro estructural), mientras que la capa externa es NMC sustituida con Mn y Co ($\text{LiNi}_{0.46}\text{Co}_{0.23}\text{Mn}_{0.31}\text{O}_2$) para una mejor vida útil y seguridad" (QUOTE).

Para aplicaciones prácticas, la batería NMC tiene una excelente densidad de energía y un bajo costo, a pesar del cobalto agregado en su material de cátodo. "El material NMC logra 175 mAh g⁻¹ con un buen voltaje de celda, [y] la combinación de voltaje y capacidad da como resultado una densidad de energía superior comparada a otros cátodos" (QUOTE) de baterías Li-ion. Como tal, es una de las químicas de baterías preferidas por los principales fabricantes de automóviles para el diseño y la producción de baterías de vehículos eléctricos.

NCA (LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂) es otra batería popular para aplicaciones de vehículos eléctricos, como lo demuestra su uso en los modelos de Tesla. Las baterías NCA tienen una base subyacente de LiNiO₂, mientras que el cobalto añadido actúa como un reductor de desorden catiónico y el aluminio mejora la estabilidad térmica y el rendimiento electroquímico. Como resultado, "NCA tiene una alta capacidad de descarga utilizable y una larga vida útil de almacenamiento en comparación con los cátodos de óxido convencionales basados en cobalto. Sin embargo, se reportó que el desvanecimiento de la capacidad puede ser grave a temperaturas elevadas (40-70°C) debido al crecimiento de la interfaz electrolítica sólida (SEI) "(QUOTE). Así mismo, su composición química hace que su fabricación sea costosa, con una etiqueta de costo promedio mayor a una batería NMC de rendimiento similar.

LiMnO₂ (LMO) es una alternativa prometedora a las baterías basadas en cobalto porque Mn es mucho más barato y menos tóxico en comparación con Co o Ni. "Las baterías de LMO anhidras y estequiométricas se desarrollaron hace casi dos décadas, mejorando los métodos acuosos previos que inducían impurezas, diferentes estequiometrías, poca cristalinidad y cambios indeseables en la estructura durante el ciclo" (QUOTE). El cátodo de LMO tiene un voltaje de celda similar a NMC y un bajo costo de materia prima, aunque también tiene una baja capacidad específica de 100 mAh g⁻¹. Sin embargo, su mayor defecto es su bajo rendimiento de carga/descarga debido a la disolución de Mn. "La disolución de Mn ocurre cuando los iones Mn³⁺ sufren una reacción de desproporción para formar Mn²⁺ y Mn⁴⁺, y este proceso se observa para todos los cátodos que contienen Mn.

Se cree que Mn^{2+} es soluble en el electrolito y desestabiliza el SEI del ánodo" (QUOTE).

De hecho, se ha observado que la concentración de Mn en el electrolito y la SEI anódica aumenta con el envejecimiento de los cátodos que contienen Mn. Además, la impedancia del ánodo aumenta con la disolución de Mn en ánodos de carbono. Incluso cuando se agrega un dopaje catiónico a la batería para contrarrestar la impedancia del ánodo, la pobre estabilidad cíclica de LMO (especialmente a temperaturas elevadas) ha impedido su comercialización generalizada.

$LiFePO_4$ (LFP) es la más común de las baterías polianiónicas, y es conocida por su estabilidad térmica y alta capacidad de potencia. También tiene una capacidad moderada de 150 mAh g^{-1} y bajos costos para sus materias primas. Sus mayores debilidades radican en su energía específica baja y baja conductividad eléctrica e iónica, lo que resulta en una batería que más grande y más costosa que las otras baterías Li-ion, eliminando su ventaja de materias primas baratas.

La investigación intensiva de la última década ha producido "mejoras significativas tanto en el rendimiento como en la comprensión mecánica de la batería LFP: la reducción del tamaño de partículas en combinación con el recubrimiento de carbono y el dopaje catiónico resultaron eficaces para aumentar el rendimiento de [su] funcionamiento" (QUOTE). Sin embargo, sigue siendo la batería con la energía específica más baja de las baterías ion-litio.

LTO ha sido comercializado con éxito porque permite la combinación de estabilidad térmica superior, alta velocidad, capacidad volumétrica relativamente alta y vida útil elevada, a pesar del costo añadido de titanio, el voltaje reducido de la celda y la capacidad reducida (175 mAh g^{-1} aproximadamente). También tiene un alto potencial de equilibrio ($\sim 1.55 \text{ V}$) que le permite operar en una ventana potencial por encima de 1 V , evitando en gran medida la formación y crecimiento de la SEI del ánodo, que puede ralentizar la inserción de Li e inducir pérdidas de Li en ánodos de grafito. Incluso cuando se forma un SEI, la falta de cambio de volumen mejora la estabilidad del SEI.

Además, LTO es extremadamente seguro porque su alto potencial previene la formación de dendritas de Li, incluso a altas cargas. "Por lo tanto, aunque LTO no tiene una difusividad de litio o conductividad eléctrica particularmente alta, es un buen material para las baterías de iones de litio de menor consumo de energía, pero de alta potencia" (QUOTE).

La química de cada batería tiene claras ventajas y desventajas, por lo que ninguna química de batería individual ha demostrado ser superior cuando se evalúa a lo largo de todos los parámetros de rendimiento. Por lo mismo, la investigación de nuevas tecnologías está enfocada en encontrar nuevas químicas de baterías u otros medios mediante los cuales se puedan superar las limitaciones actuales de las baterías ion-litio.

Avances tecnológicos de baterías

La tendencia principal en innovaciones tecnológicas de baterías para EV es aumentar la densidad de energía de las celdas individuales para maximizar la energía específica de la batería. Una mayor densidad de energía también reduciría significativamente los costos de la batería, ya que reduciría la cantidad de material necesario para los electrodos y la cantidad de celdas necesarias para ensamblar un paquete de baterías.

Hay tres formas principales de aumentar la capacidad energética de los materiales de los electrodos:

- i. Aumentando el potencial promedio de los electrodos
- ii. Aumentando la cantidad de electrones involucrados en la reacción redox
- iii. Disminuyendo el peso molecular por mol de electrones intercambiados

En el ámbito de la tecnología Li-ion, el enfoque más común es la búsqueda de nuevas tecnologías que aumenten el potencial promedio de los electrodos. Las áreas específicas de mejora incluyen diseños de electrodos de alta energía y bajo

costo, electrolitos que mejoren el rendimiento, y procesos e ideas originales dirigidos a una mayor capacidad de energía y menores costos.

Específico a innovaciones del ánodo, la estrategia más exitosa ha sido producir compuestos de carbono en los que las partículas del material de aleación tienen dimensiones suficientemente pequeñas para el transporte de electrones y iones de litio, al tiempo que mantienen trayectorias de difusión de Li dentro del electrodo. Los materiales de aleación pueden tener una capacidad volumétrica y gravimétrica extremadamente alta, pero son notorios por expandirse a varias veces su volumen original después de varios ciclos de carga y descarga.

Para los ánodos, este cambio de volumen puede “destruir la capa protectora de SEI, lo que resulta en la descomposición continua de electrolitos, la pérdida de inventario de Li y el aumento de la impedancia de la celda. Por lo tanto, los ánodos de aleación sufren generalmente una vida de ciclo corta debido a la pérdida de material activo y al aumento de la impedancia de la celda, especialmente a altas cargas ”(QUOTE). Los aditivos electrolíticos y las cápsulas de revestimiento de carbono para acomodar la expansión de volumen pueden estabilizar el SEI y prolongar la vida útil de la batería; aún así, “electrodos de cargas altas con alta (> 800 mAh cm⁻³) capacidad volumétrica y larga vida útil (más de 103 ciclos) en celdas de batería de ion-litio aún no se han demostrado” (QUOTE).

Las aleaciones basadas en silicio son uno de los conceptos más interesantes debido a su alta capacidad teórica, abundancia, estabilidad química y no toxicidad. Sin embargo, la expansión de volumen después de una carga completa puede ser tan alta como 270% (K. Young et al., 2013, pp. 36), lo que degrada al ánodo a un ritmo acelerado.

La aleación de Si con un ingrediente inerte o la deposición de Si sobre algún tipo de estructura de soporte pueden ser soluciones factibles para aprovechar su alta capacidad. Otros puntos de investigación en curso para mejorar los ánodos basados en silicio incluyen una variedad de materiales de Si nanoestructurados, y

colectores de corriente de espuma de cobre para permitir una mejor utilización de las nanopartículas de Si.

De igual manera, se están haciendo nuevos descubrimientos a nivel académico. "Los científicos de la Universidad de Rice han creado una batería de litio recargable con un ánodo único, un híbrido de grafeno y nanotubos de carbono que se acerca al máximo teórico para el almacenamiento de litio metal" ("*Graphene-nanotube hybrid boosts lithium metal batteries*", 2017). Con su baja densidad y alta área de superficie, el bosque de nanotubos del ánodo distribuye uniformemente las partículas de litio a lo largo de su superficie para garantizar el máximo uso del volumen disponible a medida que la batería se carga y descarga.

El principal logro de la batería de Rice es la supresión de la formación de dendritas. Las dendritas son depósitos de litio que crecen en el electrolito de la batería, lo que reduce la intercalación de iones de litio y crea el riesgo de un cortocircuito si conectan al ánodo y el cátodo. La formación de dendritas es un problema constante en las baterías de iones de litio, y su eliminación reduciría los riesgos de seguridad y mejoraría en general la función y la vida útil de las baterías de ion-litio.

Para innovaciones del cátodo, la investigación y el desarrollo se centran principalmente en los metales de óxido con altos potenciales para dar a las celdas una mayor densidad de energía; uno de los nuevos materiales de cátodo que los investigadores han desarrollado son electrodos polianiónicos que crean redes reticulares y aumentan el potencial redox del cátodo al tiempo que estabilizan su estructura. Algunos ejemplos de materiales que siguen investigándose incluyen fosfatos de alto voltaje, tales como LiMnPO_4 y LiCoPO_4 , fluorofosfatos (LiMPO_4F) y fluorosulfatos (LiMSO_4F). "Los mayores potenciales de estos materiales polianiónicos resultan en un aumento específico de la densidad de energía de hasta el 40% ... y exhiben estructuras muy estables y una amplia gama de posibilidades de sustitución" (Berg, Matic y Johansson, 2017, p.9).

También se están llevando a cabo tecnologías dentro y fuera de la química de litio, aunque tienden a ser de naturaleza académica y no son fuertemente perseguidas por OEMs y fabricantes de baterías. Sin embargo, proporcionan información sobre nuevas electroquímicas que podrían ofrecer soluciones a las limitaciones actuales de las baterías Li-ion.

Por ejemplo, "investigadores de la Universidad de California, Irvine ... han construido una batería de nanocables que mantiene su rendimiento después de cientos de miles de ciclos de carga. En comparación con las 5,000 a 7,000 cargas que una batería de ión-litio puede soportar antes de extinguirse, la batería basada en nanocables se cargó 200,000 veces en tres meses y no mostró ninguna pérdida en su capacidad de potencia "(DiStasio, 2016).

La batería creada por el equipo de la universidad utilizó nanocables de electrodos especiales que emplean un delgado núcleo de oro, rodeado de capas de óxido de manganeso y un gel de electrolito similar al vidrio acrílico. Según el líder del equipo, "esta investigación demuestra que un electrodo de batería basado en nanocables puede tener una larga vida útil y hacer que este tipo de baterías [puedan convertirse] en realidad" (DiStasio, 2016).

La segunda tendencia en la innovación de baterías EV es aumentar el límite de voltaje de una sola celda, lo que permitiría transferir más Li con cada descarga y aumentar la capacidad de energía de la batería. "Para vehículos eléctricos completos y hacia mayores grados de electrificación, el nivel de voltaje de la celda no es crítico para el voltaje total de la batería, pero afectará la cantidad de celdas necesarias. Sin embargo, en el caso de niveles de voltaje más bajos, es decir, 14/24/48 V, la selección de celda puede ser crítica para el rendimiento general del paquete de baterías "(Berg, Matic y Johansson, 2017, p. 7).

El límite de voltaje de la celda de una batería moderna de iones de litio es de 4.2V, en cuyo punto el solvente comienza a oxidarse. Con este voltaje, sólo alrededor del 50% del Li se transfiere del cátodo al ánodo durante la carga de la batería.

"Con [un] mayor voltaje de carga, se puede transferir más Li al ánodo, y se puede aumentar la capacidad" (K. Young et al., 2013).

La adopción de un nuevo electrolito con un mayor potencial de oxidación es una medida que permitiría el uso de cátodos de alta tensión, que a su vez aumentaría el voltaje (y la energía específica) de la celda de la batería. Mientras que los electrolitos actuales proporcionan un buen rendimiento y estabilidad, solo lo hacen dentro de rangos de temperatura y voltaje limitados. "La investigación sobre nuevos electrolitos y aditivos se enfoca en proporcionar una alta estabilidad de temperatura y voltaje, mayor tolerancia al abuso, menor costo y posiblemente una vida más larga a través de la estabilización de la SEI" (Berg, Matic y Johansson, 2017).

Sin embargo, encontrar electrolitos con una alta estabilidad de voltaje representa un desafío considerable. Las áreas actuales de investigación incluyen electrolitos líquidos ignífugos, un solo conductor de iones y electrolitos que permiten un funcionamiento a temperaturas mucho más bajas, y los electrolitos utilizados en baterías de estado sólido.

De la nueva generación de baterías, las baterías de estado sólido se consideran las más cercanas al nivel de aplicación práctica requerida para equipar vehículos para altos volúmenes de producción. Las baterías de estado sólido ofrecen varias ventajas sobre las tecnologías actuales de baterías: "[se] cargan más rápido, almacenan más energía en un volumen dado y, especialmente interesante para los ingenieros de automóviles, pueden moldearse en muchas formas" (Schmitt, 2017).

Además, las baterías de estado sólido representan un riesgo de seguridad menor ya que emplean electrolitos de estado sólido, que eliminan problemas de fuga y riesgos de incendio. El desafío es encontrar un electrolito sólido lo suficientemente conductor para ser utilizado en baterías del tamaño de vehículos eléctricos. Avances hacia una batería comercial de estado sólido ya están sucediendo.

"En 2014, los ingenieros de Toyota presentaron una batería de estado sólido que excedía la densidad de energía de ión-litio. Y en 2016, los profesores del Instituto de Tecnología de Tokio presentaron un trabajo de investigación, diciendo que las celdas de estado sólido proporcionaban alta densidad de potencia, con capacidades de carga ultrarrápidas y una vida útil más larga que los tipos de baterías existentes "(Schmitt, 2017).

Si tiene éxito, las batería de estado sólido podrían ser la tecnología clave para la adopción generalizada de vehículos eléctricos. Los vehículos eléctricos equipados con baterías de estado sólido tendrían el doble del rango de los EVs de hoy en día, y se cargarían en solo unos minutos.

Las baterías de estado sólido todavía tienen varias dificultades que necesitan de soluciones antes de ser comercialmente factibles. "Comparado con las baterías de litio con electrolitos líquidos, el cuello de botella de las baterías de estado sólido es su pobre rendimiento bajo altas potencias, como resultado de la baja conductividad iónica del electrolito sólido, la compatibilidad interfacial electrodo / electrolito y la cinética limitada de los electrodos". (Yu et al., 2017, p. 2).

La formación de dendritas también es un problema, especialmente con el uso de litio metálico como el ánodo. Se están explorando otros metales como alternativas para las baterías de estado sólido, como el sodio (Na) y el magnesio (Mg), pero estos presentan desafíos propios de estabilidad y compatibilidad.

La clave para esta tecnología de baterías es encontrar un electrolito estable hacia el ánodo metálico e inhibir la formación de dendritas durante los ciclos de carga. Incluso con esas mejoras, "podría llevar una década antes de que la batería de estado sólido alimente un automóvil, porque eso es lo que tardan los avances de batería en recorrer la distancia del laboratorio a la carretera" (Schmitt, 2017).

La tercera tendencia es una variedad diversa de tecnologías de baterías emergentes con nuevos materiales funcionales o conceptos que potencialmente pueden ser la ruta para un mejor rendimiento de la batería.

Entre estos nuevos conceptos se encuentran las baterías de litio y aire. Reemplazar el electrodo positivo con un electrodo de aire puede reducir sustancialmente el peso de la batería y aumentar tanto la potencia específica como la energía específica.

Lo que hace muy atractivo a este tipo de tecnologías para su uso en baterías vehiculares es su alta densidad de energía gravimétrica (de 11 a 13 kWh/kg), pero este número puede ser engañoso ya que es teórico y proviene de un cálculo que no toma en cuenta las reacciones secundarias del litio. “Al tomar en cuenta la formación de Li_2O_2 , la densidad de energía teórica baja a aproximadamente 350 Wh/kg y para sistemas prácticos sería mucho menos (posiblemente menos de 300 Wh/kg)” (Berg, Matic y Johansson, 2017, p. 28).

Actualmente se están desarrollando varios experimentos para este tipo de batería, y la principal variación existe en el tipo de electrolito empleado. Para este tipo de celdas es indispensable que el sistema sea abierto ya que la manera para hacerlo económicamente viable es que obtenga el oxígeno del aire atmosférico. Esto causa problemas y requiere de diseños particulares para que puedan ser montados dentro de un vehículo. Además, existen limitaciones en cuanto a que tanto oxígeno se puede introducir a la celda, que a su vez disminuye la rapidez de la reacción.

La mayoría de las investigaciones han ocurrido en sistemas de laboratorio controlados donde el flujo de oxígeno no es un problema. Sin embargo, dentro de un vehículo se requeriría una mayor cantidad de celdas en paralelo para obtener el desempeño deseado, lo que aumentaría el costo, peso y volumen del paquete de la batería cuando se instale en el vehículo. También existen riesgos de seguridad en el ánodo y riesgos de contaminación de agua y otros compuestos del aire que pueden reaccionar dentro de la celda.

Otra interesante alternativa son las baterías en base a compuestos orgánicos o polímeros electro-activos con reacciones redox reversibles como candidatos para los materiales de los electrodos. Esta posibilidad surge a partir de la capacidad

superior, seguridad, sustentabilidad y bajo costo teórico de este tipo de materiales en comparación a los compuestos tradicionalmente utilizados en baterías para EV.

“El uso de materiales inorgánicos puede considerarse no sustentable en cuanto a su uso en las baterías de vehículos principalmente por escasez de recursos, contaminación del medio ambiente y altos consumos energéticos en la síntesis y reciclaje de las mismas” (Berg, Matic y Johansson, 2017, pp. 33). En teoría, los compuestos orgánicos ofrecen una mejora en contra de esto ya que los materiales pueden ser directamente extraídos o sintetizados de biomasa.

Se le ha dado poca importancia a esta tecnología debido a su bajo rendimiento electroquímico y al gran éxito que han tenido los compuestos inorgánicos en aplicaciones prácticas. Sin embargo, a lo largo de los años las investigaciones desarrolladas en compuestos orgánicos han podido desarrollar potenciales electroquímicos (densidad energética, potencia, estabilidad cíclica) comparables con materiales inorgánicos y en algunos casos hasta superiores.

Uno de los principales retos a futuro para baterías orgánicas es la densidad energética aplicable en situaciones prácticas vehiculares, ya que con la tecnología actual el paquete de batería sería más grande que el espacio disponible en un vehículo para proporcionar la energía necesaria. Debido a que es de las tecnologías más nuevas, se debe de continuar desarrollando y se espera que sus aplicaciones en vehículos lleguen mucho después de 2025.

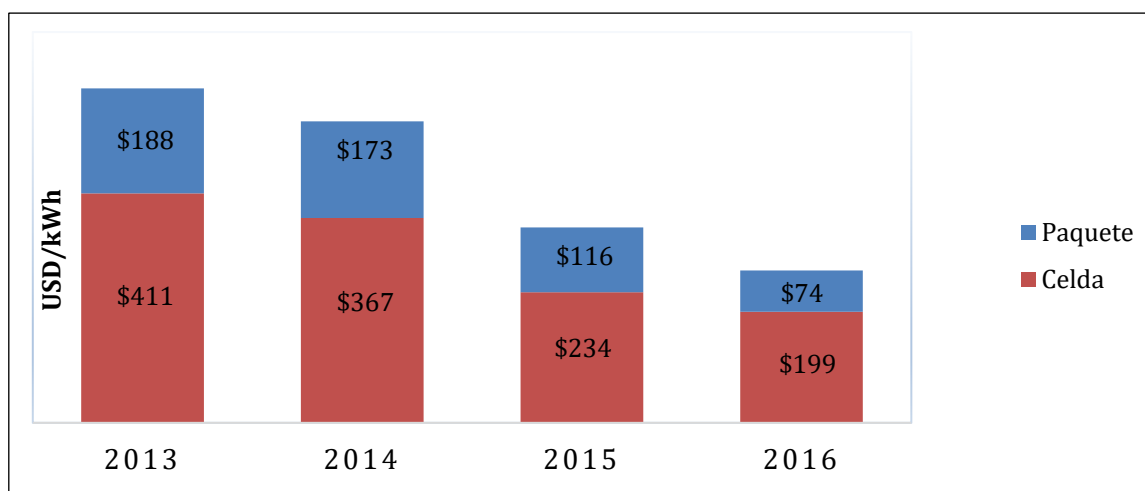
En general, esto confirma que las tecnologías actualmente en la etapa de investigación y desarrollo tienen un mejor rendimiento que las disponibles en el mercado, lo que provocará que los costos de la batería sigan disminuyendo. Sin embargo, dado que el plazo para que estas tecnologías de laboratorio crezcan a una escala industrial es de siete a diez años ([QUOTE Toyota article](#)), el principal potencial de reducción de costos a corto está en el diseño del paquete y los componentes incluidos en el paquete, no incluyendo las celdas.

Costos de baterías

El costo promedio de los paquetes de batería de ion-ha disminuido constantemente desde 2010, cuando costaba más de \$ 1,000 USD por KhW, a alrededor de \$ 250 USD kWh hoy en día. Las proyecciones actuales estiman costos para un paquete de baterías por debajo de \$ 150 / kWh para el final de la década, y a medida que las empresas ⁴ aumentan la producción de baterías y optimizan el diseño de celdas y empaques, ese número podría caer a \$ 73 USD/ kWh para 2030 (Shankleman, 2017), si no es que antes.

De los componentes principales de las baterías Li-ion, los que más han visto una reducción en costos son aquellos relacionados al ensamblaje y al paquete de baterías mientras que los materiales de las celdas, que continúan representando la mayor proporción del costo total, han visto la reducción de costos más baja de todos los componentes de la batería. El gráfico 2, que divide el costo total promedio de baterías de ion-litio en celdas de la batería y el paquete de la batería, muestra claramente la diferencia en reducción de costos para los dos componentes.

Gráfico 2. Composición del costo de baterías ion-litio, 2013 - 2016



Fuente: Randall, M. (Enero 30, 2017). *Tesla's Battery Revolution Just Reached Critical Mass*. *Bloomberg.com*. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-01-30/tesla-s-battery-revolution-just-reached-critical-mass>

La reducción desigual de costos tiene sentido cuando se considera que los materiales y componentes del paquete de baterías son dependientes del volumen de producción, por lo que se benefician de las economías de escala del aumento en producción. Los materiales de la celda, en cambio, son en gran medida independientes del volumen de producción, dependiendo en lugar en nuevas tecnologías de baterías para reducir su costo total.

En la Tabla 3 se examina con más detalle la reducción de costos de baterías de Li-ion en los últimos años, y se puede observar el impacto de los procesos de fabricación y las economías de escala. Los resultados están bien fundados: estudios del Departamento de Energía de los Estados Unidos han demostrado que "aumentar el tamaño del paquete [de una batería] de 60 kWh a 100 kWh, que refleja aproximadamente un aumento en el rango de 200 km a 320 km, lleva a una reducción del 17% en el costo kWh al nivel de paquete" (Howell, 2017).

Tabla 3. Reducciones en costos de componentes de baterías de Li-ion para aplicaciones de EV

Componente de batería	2010	2015	2017	2020	Reducción de costos 2010-2020
Material de celdas	180	140	115	115	36%
Celda	315	235	195	175	45%
Paquete de batería (sin celdas)	210	135	60	55	74%
Costo total del paquete de baterías	525	370	255	230	56%

Fuente: Berckmans et al. (2017). Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030. *Energies*, 10 (9), 1-20.

Por lo mismo, todos los grandes productores de baterías continúan incrementando sus gastos de capital para aumentar su capacidad a fin de reducir aún más sus costos unitarios. "El año pasado [2016], la producción de baterías Li-ion para productos de consumo representaron una capacidad de almacenamiento total de alrededor de 45 gigaWatts-hora (GWh)" ("Electrifying everything", 2017). En el

mismo año, la producción de baterías Li-ion para vehículos eléctricos alcanzó una capacidad de 25GWh.

La producción de baterías mediante economías de escala ha reducido el precio, pero también ha resultado en un exceso de capacidad significativo. "Cairn ERA estima que el año pasado la capacidad de fabricación de baterías de ión-litio excedió la demanda [global] en alrededor de un 33%", por lo que "los fabricantes de baterías están perdiendo dinero u obteniendo ganancias reducidas por cada batería de vehículo eléctrico que producen" (" Electrifying everything ", 2017).

En respuesta a la demanda prevista de vehículos eléctricos, los precios de las materias primas de las celdas de baterías han aumentado en consecuencia. El cobalto en particular ha visto un aumento en su costo, ya que el precio del cobalto se ha duplicado en los últimos dos años a \$30 dólares la libra. Debido a que una unidad de batería típica para un vehículo eléctrico contiene aproximadamente 15 kilogramos (33 libras) de cobalto, "esto ha agregado aproximadamente \$180 USD al precio de una batería por vehículo" (Seymour, 2017).

Así mismo, un pronóstico de BNEF predice que "la demanda de vehículos eléctricos aumentará la demanda de níquel y aluminio a aproximadamente 327,000 toneladas por año desde solo 5,000 toneladas en 2015; la producción de litio, cobalto y manganeso aumentará más de 100 veces" (Shankleman, 2017) para 2030.

Hay varias razones por las que los fabricantes de baterías continúan expandiendo su capacidad a pesar de las materias primas más costosas, y a pesar que los vehículos eléctricos siguen siendo un nicho de mercado. Uno de ellos es el dominio del mercado que los dispositivos de ión-litio han acumulado después de décadas de desarrollo.

"Este trabajo ha generado una gran cantidad de conocimiento sobre los detalles de la capacidad de fabricación, la elección de electrolitos y la nanotecnología cada

vez más sofisticada de los cátodos metálicos; todo este trabajo es duro de emular para un aspirante [al mercado]" ("Electrifying everything", 2017).

Otra razón detrás de la expansión de la capacidad es el sacrificio de márgenes por mayor participación en el mercado. Tanto los fabricantes de baterías como los OEM creen que, incluso si hay un exceso de oferta en este momento, el aumento de la demanda de vehículos eléctricos y el almacenamiento estacionario justificarán el apuro por expandirse.

Todo esto presupone una expansión masiva en la venta de vehículos eléctricos. La incertidumbre sobre el grado y la velocidad a la que el uso del vehículo eléctrico se propague determinará el éxito o fracaso final de la inversión de los fabricantes de baterías, los fabricantes de equipos originales y las industrias complementarias que se sustentan de la industria automotriz.

Mercado de vehículos eléctricos

Descripción de vehículos eléctricos

Mientras que el vehículo eléctrico se creó a la par del motor de combustión, sus limitaciones en términos de peso, viajes de corto alcance, largos tiempos de carga y poca durabilidad de la batería acabaron por ceder todo el mercado a los motores de combustión interna en 1920.

Después del establecimiento del vehículo de combustión interna, el vehículo eléctrico desapareció durante los próximos 80 años de la escena automovilística hasta la introducción de nuevos modelos híbridos y eléctricos (como el renombrado Toyota Prius de 1997), los cuales forjaron un nuevo nicho de mercado para el vehículo eléctrico en el siglo XXI.

Este nuevo nicho de mercado se compone de varios tipos de vehículos eléctricos que, según el tipo de vehículo, funcionan con una batería y/o un motor de gasolina para reducir el uso de combustible e incluso permiten que el motor se apague por completo en ciertos casos.

Los vehículos híbridos convencionales (HEV), por ejemplo, combinan un motor de gasolina con un motor eléctrico. Estos vehículos también cuentan con una batería, pero no se pueden enchufar o recargar. En cambio, sus baterías se cargan mediante un frenado regenerativo que convierte la energía cinética en electricidad.

Los vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV) son similares a los híbridos convencionales en que tienen tanto un motor eléctrico como un motor de combustión interna, excepto que un PHEV puede sustituir su combustible por electricidad al enchufar su batería a una toma de corriente.

Los vehículos eléctricos con batería (BEV) funcionan exclusivamente con electricidad a través de baterías incorporadas al vehículo que se cargan enchufándose a un tomacorriente o estación de carga. Estos vehículos no tienen motor de combustión interna, cuentan con rangos más largos en comparación con los PHEV y no producen emisiones (aunque sí hay emisiones asociadas a estos

vehículos, dependiendo del tipo de estación de carga o dispositivo que se use para cargarlos).

Tabla 4. Términos y acrónimos para vehículos híbridos y eléctricos

Término	Definición
Tren motriz	Motor, transmisión, y todos los demás componentes que generan energía y la entregan al vehículo para proporcionarle movimiento.
ICE	Vehículo de motor de combustión interna, funciona a base de combustible.
EV	Vehículo con un tren motriz parcial o completamente eléctrico. Para propósitos de este trabajo, EV se refiere a PHEV y BEV.
HEV	Vehículo eléctrico híbrido. Funciona a partir de motor de combustión interna, asistido por una batería que se carga con energía de frenado. Opera con sólo la batería en distancias cortas.
PHEV	Vehículo eléctrico híbrido enchufable. Funciona igual que un HEV, pero se puede enchufar a una red eléctrica. Puede operar en un rango de 30-60 km con sólo la batería.
BEV	Vehículo eléctrico de batería, funciona completamente con energía eléctrica generada por su batería.

Fuente: Erich, M., y Witteveen, J. (2017). *Breakthrough of electric vehicle threatens European car industry* (pp. 1-21). ING Economics Department.

La infraestructura de carga, aunque no es parte del vehículo, también es un componente indispensable para operar vehículos eléctricos y uno de los factores clave para la penetración en el mercado de vehículos eléctricos.

La infraestructura de carga de vehículos eléctricos “requiere el uso de cables, conectores y protocolos de comunicación entre los vehículos y el equipo de carga del vehículo eléctrico (EVSE). El EVSE adecuado para automóviles eléctricos tiene tres características principales: nivel, que describe la potencia de salida de una toma de corriente EVSE; tipo, refiriéndose al enchufe y al conector que se

utilizan para cargar; [y] modo, que describe el protocolo de comunicación entre el vehículo y el cargador " (Electric Vehicles Initiative, 2017, pp. 29).

Las estaciones de carga también se dividen por niveles de acuerdo a la cantidad de potencia que pueden manejar; una estación de carga de nivel I tiene baja potencia y se puede instalar en un hogar, mientras que una estación de nivel III requiere de su propio generador y conectores especializados. La diversidad de características de la infraestructura de carga disponible, que se muestra en la Tabla 5, trae consigo una capa añadida de complejidad al mercado de vehículos eléctricos.

Tabla 5. Clasificación de estaciones de carga ⁵

Clasificación	Nivel	Corriente	Potencia	Tipo			
				China	Europa	Japón	América del Norte
	Nivel I	CA	≤ 3.7 kW	Dispositivos instalados en hogares privados, cuyo principal propósito no es recargar vehículos eléctricos			SAE J1772 Tipo 1
Cargadores lentos	Nivel II		> 3.7 kW y ≤ 22 kW	GB/T 20234 CA	IEC 62196 Tipo 2	SAE J1772 Tipo 1	
			≤ 22 kW	Conector Tesla			
Cargadores rápidos	Nivel III	CA, trifásico	≥ 22 kW y ≤ 43.5 kW	-----	IEC 62196 Tipo 2	-----	SAE J3068 (en desarrollo)
		CC	Actualmente < 200 kW	GB/T 20234 CC	IEC 62196 Tipo 2 y CC	CHAdeMO	SAE J1772 Tipo 1 y CC
			Actualmente < 1500 kW	Conectores Tesla y CHAdeMO			

Fuente: Young et al. (2013). *Electric Vehicle Integration Into Modern Power Networks*. New York: Springer Science & Business Media

Debido a que una batería de 30 kWh puede tardar poco más de ocho horas en cargarse al conectarla a un enchufe estándar de 120 voltios (Marshall, Davies y Stewart, 2017), los tiempos de recarga establecen a los cargadores domésticos como la forma más conveniente de recargar una batería. Más del 90% de los propietarios de EV cargan sus automóviles en sus hogares durante la noche,

haciendo uso de carga de baja potencia durante varias horas (Marshall, Davies y Stewart, 2017).

Sin embargo, no todas las viviendas son adecuadas para las necesidades de carga de un vehículo eléctrico, en particular las viviendas urbanas ubicadas en ciudades o áreas metropolitanas con altas densidades de población. Además, no todos los suministros domésticos cumplen con los requerimientos para un EV con una batería de contenido energético sustancial; usar una toma de salida de voltaje estándar para cargar una batería de 90kWh podría explotar los fusibles.

“Después de cargar en casa o en el trabajo, la tercera opción de carga más común son los cargadores lentos disponibles al público, seguidos por los cargadores ubicados en las instalaciones comerciales” (Electric Vehicles Initiative, 2017, pp. 29). En la actualidad existen muy pocas estaciones de carga de esa naturaleza, pero varias compañías automotrices están empezando a construirlas con el fin de mitigar las necesidades de los consumidores.

En los Estados Unidos, el número de estaciones de carga públicas ha aumentado a 16,000 unidades, y actualmente existen más de 40,000 estaciones de carga en total (Coren, 2017). En Europa, “las automotrices BMW AG, Daimler AG, Ford Motor Co y Volkswagen instalarán 20 estaciones de carga de vehículos eléctricos [en 2017] y planean crear una red paneuropea con 400 estaciones para 2020” (“Automotrices instalarán 400 electrolinerías en Europa”, 2017). Mientras tanto, el número total de puntos de carga (públicos o semipúblicos) ya ha superado los 112, 500.

China, que tiene la mayor flota mundial de EV, tiene más de 150,000 estaciones de recarga públicas y 14,000 km de autopista equipada con estaciones de carga rápidas. “Las proyecciones recientes para las estaciones de carga globales estiman que las instalaciones públicas y privadas podrían crecer de alrededor de 2 millones en 2016 a más de 12 millones en 2020” (Knupfer, Hensley, Hertzke y Schaufuss, 2017, pp. 11).

Situación actual del mercado

Como parte del mercado automotriz, los vehículos eléctricos sólo representan el 1.1% de vehículos, un porcentaje minúsculo. Altos costos operativos, bajos precios de gasolina y una falta de infraestructura de carga han contribuido al papel disminuido de los vehículos eléctricos en el mercado de vehículos ligeros. Incluso “en China, donde se vende el 40% de vehículos eléctricos en el mundo, la participación en las ventas es ligeramente inferior a 1.5%” (Erich y Witteveen, 2017, pp. 5).

Los vehículos eléctricos también son un mercado altamente concentrado, puesto que el 95% de los coches eléctricos se venden en sólo 10 países: China, Estados Unidos, Japón, Canadá, Noruega, Reino Unido, Francia, Alemania, los Países Bajos y Suecia (Electric Vehicles Initiative, 2017, pp. 12). Lo mismo ocurre con el stock global: los cinco países principales representan el 80% del total, mientras que los diez países principales representan el 96% de vehículos eléctricos en uso.

Figura 6. Composición del mercado de vehículos eléctricos



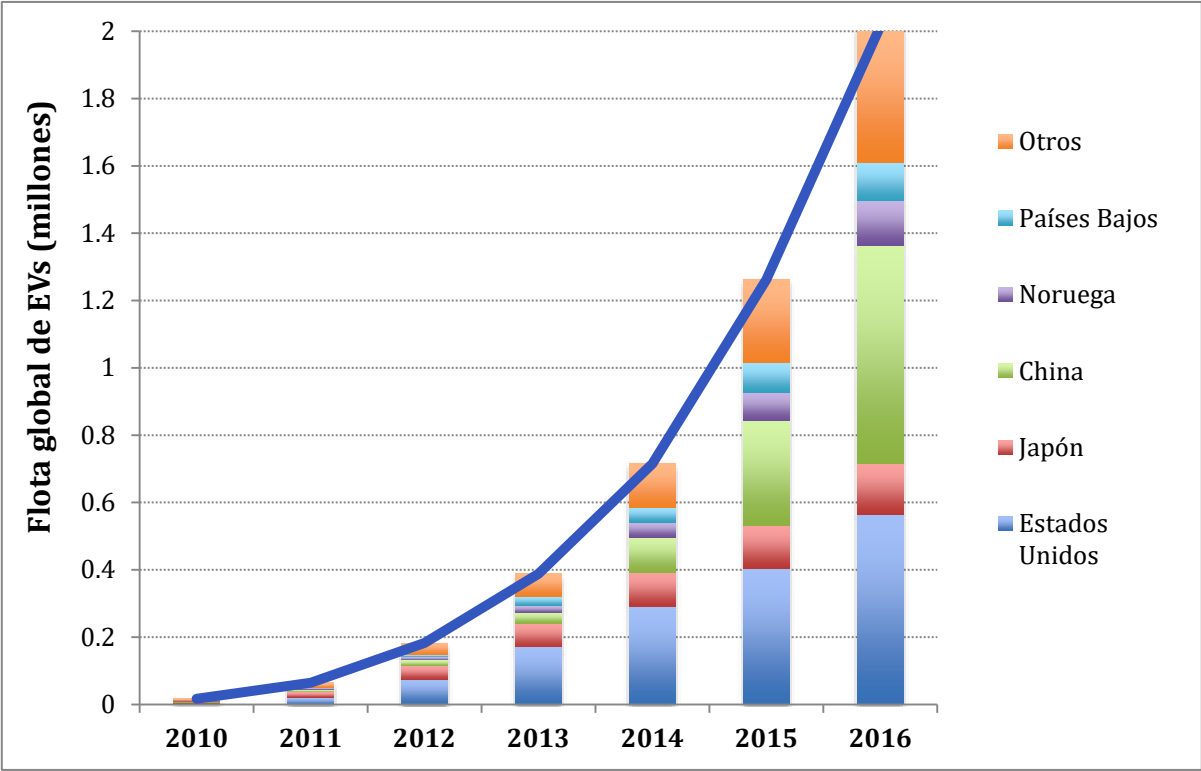
Elaborado a partir de datos propios. Los países señalados representan >95% del mercado de vehículos eléctricos.

Sin embargo, los nuevos desarrollos tecnológicos y las nuevas políticas ambientales han empezado a remodelar este panorama: a pesar que los coches

eléctricos siguen siendo sólo una fracción del mercado, las ventas han estado creciendo rápidamente desde 2010.

"El número de vehículos con baterías sólo llegó a los cientos de unidades en 2005, pero pasó el hito de 1 millón en 2015 y las ventas subieron un 60 % en 2016" (Vaughan, 2017), con más de 750 mil unidades vendidas y poniendo el número de vehículos eléctricos en uso en más de 2 millones. China se distinguió como el mayor mercado de automóviles eléctricos, con 336 mil autos eléctricos nuevos registrados, seguidos de 215 mil ventas de automóviles eléctricos en Europa y 160 mil unidades en los Estados Unidos (Vaughan, 2017). El gráfico 3 muestra a más detalle el crecimiento de vehículos eléctricos en uso en los cinco países con mayor cantidad de ventas de EV.

Gráfico 3. Evolución del stock global de coches eléctricos (BEV+PHEV), 2010 - 2016



Fuente: Electric Vehicles Initiative. (2017). *Global EV Outlook 2017: Two Million and Counting* (pp. 12-42). International Energy Agency

También hay una tendencia al alza de BEV desplazando a los PHEV dentro del mercado de vehículos eléctricos. Mientras que el stock global para vehículos eléctricos incluye BEV y PHEV, la flota global de BEV ha experimentado una mayor tasa de crecimiento anual que la de los PHEV desde 2013.

En 2016, los BEV crecieron un 62%, mientras que los PHEV crecieron un 59% (Electric Vehicles Initiative, 2017, pp. 21). En promedio, sin embargo, las ventas de automóviles eléctricos se dividen casi por igual entre BEV y PHEV; la cuota de mercado de cada una de ellas varía mucho según las políticas gubernamentales y los incentivos financieros vigentes.

A pesar de un descenso en la tasa de crecimiento de ventas⁶, seis países alcanzaron una cuota de mercado de automóviles eléctricos superior al 1% en sus ventas totales de vehículos ligeros a partir de 2016. "Entre ellos, Noruega fue el líder mundial incontestable, con una cuota de mercado del 29%, el resultado de un entorno político favorable en los últimos años que comprende una amplia gama de incentivos" (Electric Vehicles Initiative, 2017, pp. 46).

Por el momento, existen más de 30 vehículos completamente eléctricos disponibles en el mercado internacional [ver tabla 6], y más de 50 modelos que son al menos parcialmente eléctricos (Lippert, 2017). Gracias al abaratamiento de baterías para EV y los impulsos gubernamentales contra el cambio climático, los líderes de la industria están inyectando miles de millones de dólares a la ampliación de sus plataformas para incluir una serie de nuevos modelos híbridos y eléctricos.

Tabla 6. Vehículos completamente eléctricos disponibles en el mercado, 2016 ⁷

Segmento de vehículo	Marca	Modelo	Año	Contenido Energético de la Batería (kWh)	Rango (km)
Pequeño	Smart	Fortwo	2014	17.6	160
	Toyota	iQ EV	2012	12	85
	Fiat	500e	2015	24	135
	Citroen	C-Zero	2014	14.5	150
	Peugeot	iOn	2014	14.5	150
	Mitsubishi	i-MiEV	2014	16	160
	VW	e-up!	2013	18.7	160
	Chevrolet	Spark Ev	2015	18.4	130
	Bolloré	Bluecar	2015	30	250
	Mitsubishi	MinicabMiEV	2014	16	150
Promedio				18.2	153
Mediana				16.8	150
Mediano-Grande	BMW	i3	2014	22	190
	Renault	Zoe	2015	22	240
	Volvo	C30 Electric	2015	24	145
	VW	e-Golf	2016	24.2	190
	Nissan	Leaf (2016)	2014	30	250
	Honda	FIT EV	2012	20	130
	Renault	Fluence Z.E.	2015	22	185
	Ford	Focus EV	2015	23	162
	Kia	Soul Electric	2015	27	212
	Mercedes	B-class E1.Dr.	2015	36	230
	BYD	e6	2015	61.4	205
	Nissan	e-NV200	2015	24	170
	Toyota	RAV 4 EV	2014	41.8	182
	Tesla	Model S	2015	75	480
	Tesla	Model X	2015	90	489
Promedio				36.2	231
Mediana				24.2	190

Fuente: Berckmans et al. (2017). Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030. *Energies*, 10 (9), 1-20.

Otros grandes fabricantes de automóviles también han comenzado a producir coches eléctricos e híbridos, con más de 95 nuevos modelos establecidos para llegar al mercado para 2021 (Lippert, 2017). "Volkswagen, el mayor fabricante de automóviles del mundo, dijo el año pasado que comenzaría a intensificar su producción en 2020 y lanzará 30 nuevos modelos con baterías para 2025 ... mientras que Ford prometió 13 nuevos automóviles electrificados en los próximos

cinco años" (*Electric cars are set to arrive far more speedily than anticipated*, 2017).

Tabla 7. Inversiones en el desarrollo de nuevos modelos eléctricos, 2022 – 2025

Compañía Automotriz	Nuevos modelos EV	Inversión en desarrollo de EVs (USD)
General Motors	20 modelos para 2023	----
Ford Motor Co.	13 modelos para 2023	\$4.5 mil millones
Daimler AG	50 modelos para 2022	\$10 mil millones
Alianza Renault – Nissan – Mitsubishi	12 modelos para 2022	----
Volkswagen	30 modelos para 2025	\$ 84 mil millones

Fuente: Williams, B. (2017). *Here's how every major automaker plans to go electric*. Mashable. <http://mashable.com/2017/10/03/electric-car-development-plans-ford-gm/#05R29KAWgjq7>

Sin embargo, los vehículos eléctricos siguen siendo una inversión cara en comparación con los vehículos ICE, principalmente debido al alto costo de paquete de baterías, y de hecho representan una pérdida para los fabricantes de automóviles.

"Al día de hoy, se estima que el tren motriz eléctrico de un BEV cuesta \$ 1,750 USD en promedio ..., aproximadamente la mitad del costo promedio de un tren motriz ICE de \$ 3,500 USD. Sin embargo, una vez que se agrega el paquete de baterías (cerca de \$ 9,000 USD para un paquete de 36 kWh al precio promedio de una batería en 2017), los costos suben por encima de los de un ICE" (Erich y Witteveen, 2017, pp. 8).

Para que los precios sean más aceptables para el consumidor, los fabricantes de automóviles aceptan márgenes más bajos en la venta de vehículos eléctricos. Por ejemplo, el "Chevrolet Bolt cuesta menos de \$ 20,000 USD con subsidios, y viaja 380 km entre cargas. Sin embargo, cada venta le [cuesta] \$9,000 USD a General Motors" (*Electric cars are set to arrive far more speedily than anticipated*, 2017).

Chrysler tiene un caso similar con su vehículo eléctrico Fiat 500e, el cual equivale a una pérdida de \$14,000 USD por cada venta del vehículo (*“Electric cars are set to arrive far more speedily than anticipated”*, 2017). Incluso Tesla, a pesar de su popularidad y valuación de mercado, nunca ha obtenido ganancias anuales en ninguno de sus modelos eléctricos.

Debido a estos obstáculos, el apoyo del gobierno es esencial para el mercado de vehículos eléctricos. Al ofrecer una variedad de incentivos financieros y políticos, pueden disminuir el precio de compra de un vehículo eléctrico por debajo del de un vehículo ICE comparable, y así mantener la tasa de crecimiento de ventas de vehículos eléctricos.

El efecto de las políticas gubernamentales en el mercado de EV se puede ver en la tabla 8, donde un cambio en la política hacia vehículos eléctricos muestra una clara correlación en sus ventas.

Tabla 8. Efecto de políticas gubernamentales sobre la venta de BEV y PHEV en una selección de países, 2016

País	Crecimiento de ventas, 2015 v. 2016		Ventas 2016	
	BEV	PHEV	BEV	PHEV
China	75%	30%	257,000	79,000
Corea	75%	- 40%	5,099	164
Estados Unidos	22%	70%	86,731	72,885
Japón	48%	- 34%	15,461	9,390
Noruega	6%	164%	29,520	20,660
Países Bajos	47%	- 50%	3,737	20,740
Suecia	0%	86%	2,951	10,464

Fuente: Electric Vehicles Initiative. (2017). *Global EV Outlook 2017: Two Million and Counting* (pp. 12-42). International Energy Agency.

En China, por ejemplo, "las políticas continuaron proporcionando fuertes incentivos financieros y no financieros para la adopción de EVs en 2016, [lo que] ... explica los fuertes volúmenes de ventas (336 000 autos) y la tasa de crecimiento (40%) en 2016 en comparación hasta 2015 " (Electric Vehicles Initiative, 2017, pp.18).

En Noruega, los automóviles eléctricos están exentos del impuesto a la adquisición, que representa alrededor de \$ 11,600 USD, así como de una gran cantidad de tarifas como peajes y transbordadores. Este entorno continúa proporcionando un entorno altamente favorable para la absorción de automóviles eléctricos, y para los PHEV en particular.

"Las ventas de BEV alcanzaron un récord en 2016, pero no crecieron significativamente en comparación con 2015. Por otro lado, las ventas de PHEV registraron un crecimiento notable y más del doble en solo un año. Esto fue consistente con el cambio en el apoyo de políticas" (Electric Vehicles Initiative, 2017, pp. 19).

Incluso cuando los incentivos no son de carácter financiero, todavía tienen un efecto sobre las ventas de vehículos eléctricos. Los Países Bajos tienen un esquema de impuestos basado en emisiones de CO₂, en el cual las tasas impositivas van evolucionando gradualmente hasta 2020. Este esquema sólo afecta a los PHEV ya que las tasas impositivas para los BEV no cambiarán. "Existe una gran probabilidad de que estos cambios en los impuestos sean una de las razones de la fuerte caída en las ventas de PHEV, ya que... esta tendencia continuó a principios de 2017 debido a las tasas de impuestos aún mayores aplicadas en comparación con 2016" (Electric Vehicles Initiative, 2017, pp.19).

Pronósticos de demanda

A pesar de los altos costos y su lenta tasa de adopción, los pronósticos de la industria automotriz, los gobiernos, y las agencias y organizaciones internacionales afirman un crecimiento vertiginoso de vehículos eléctricos durante las próximas décadas.

En el 2014, la mayoría de los pronósticos por parte de consultorías y expertos del mercado calculaban que para 2025 el porcentaje de vehículos eléctricos ascendería a alrededor del 4% de la flota mundial de automóviles (*Electric cars are set to arrive far more speedily than anticipated*, 2017). En sólo 3 años, y a medida

que los OEMs anuncian expansiones en su producción de vehículos eléctricos, esos pronósticos han experimentando una revisión enorme.

“Morgan Stanley, un banco, ahora dice que para el 2025 las ventas de EV llegarán a 7 millones de unidades al año y representarán el 7% de los vehículos en uso. Exane BNP Paribas, otro banco, calcula que podría ser más del 11%. Pero a medida que los fabricantes de automóviles planean tener cada vez más vehículos en base a baterías, incluso estas cifras podrían ser demasiado bajas" (*Electric cars are set to arrive far more speedily than anticipated*, 2017).

Las estimaciones más agresivas (ver tabla 9) provienen a partir de las nuevas políticas ambientales: los objetivos establecidos en el acuerdo climático de París expresan el ambicioso objetivo de superar el umbral de 100 millones de automóviles eléctricos para el año 2030. Lograr tal adopción a nivel mundial requeriría un crecimiento anual del mercado EV de 60% por año hasta 2020 (Randall T., 2016), un valor comparable a la tasa de crecimiento observada en 2016.

Tabla 9. Pronósticos de demanda de vehículos eléctricos, 2030 - 2040

Institución	Pronóstico de vehículos eléctricos (unidades)	Para el año...
Bloomberg New Energy Finance (BNEF)	530 millones	2040
Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP)	266 millones	2040
Agencia Internacional de Energía (IEA)	58 millones	2030
Exxon Mobil	100 millones	2040
British Petroleum (BP)	100 millones	2035
Acuerdo Climático de París	100 millones	2030

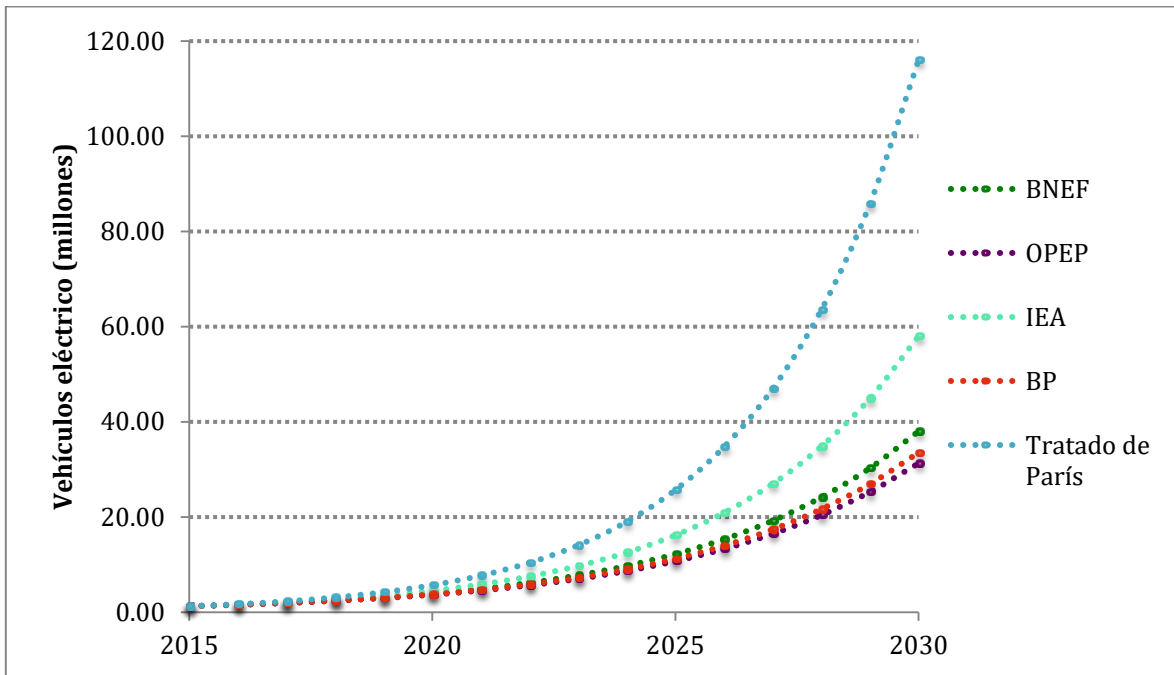
Fuente: Shankleman, J. (2017). *Big Oil Just Woke Up to Threat of Rising Electric Car Demand*. *Bloomberg.com*. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-07-14/big-oil-just-woke-up-to-the-threat-of-rising-electric-car-demand>

Bloomberg New Energy Finance (BNEF), una empresa líder en investigación y análisis del sector energético, estima que habrá 530 millones de vehículos eléctricos circulando para 2040, el 35% del número total de automóviles (Shankleman, 2017). "La creciente inversión en baterías de ión-litio, una mayor capacidad de fabricación en compañías como Tesla Inc. y Nissan Motor Co., así como la demanda emergente de los consumidores de China a Europa respaldan las proyecciones de BNEF" (Shankleman, 2017).

Incluso las compañías petroleras, que siguen teniendo reservas en cuanto a la adopción masiva de vehículos eléctricos, han ajustado sus estimaciones considerablemente. "La OPEP ahora espera que 266 millones de vehículos estén en uso para 2040, un aumento frente a los 46 millones que anticipó hace un año. Bajo la nueva proyección, los autos con batería representarían el 12 por ciento del mercado [para 2040], en comparación con el 2 por ciento en el pronóstico [de 2015]" (*Electrifying everything*", 2017).

La adopción acelerada de vehículos eléctricos también ha influido en los nuevos pronósticos de British Petroleum. A medida que la demanda mundial de automóviles continúa creciendo durante los próximos veinte años, "el número de coches eléctricos también aumentará significativamente, de 1.2 millones en 2015 a alrededor de 100 millones en 2035 (6% de la flota mundial). Alrededor de una cuarta parte de estos vehículos eléctricos serán híbridos enchufables (PHEVs)..., y tres cuartos serán vehículos eléctricos puros a base de batería (BEVs)" (BP Energy Outlook, 2017, pp. 47).

Gráfico 4. Escenarios para el stock global de vehículos eléctricos (BEV + PHEV), 2015-2030



Fuente: Electric Vehicles Initiative. (2017). *Global EV Outlook 2017: Two Million and Counting* (pp. 12-42). International Energy Agency

A pesar de las correcciones a sus pronósticos, todavía hay razones para que los mercados petroleros (y el resto de los jugadores involucrados) se mantengan escépticos de la adopción de los vehículos eléctricos. "Los gobiernos podrían reducir sus incentivos antes de que los vehículos eléctricos se vuelvan completamente competitivos: muchos estados ya están comenzando a gravar los automóviles eléctricos. Los fabricantes de baterías podrían enfrentar escasez de materiales o problemas de producción que obstaculizan su capacidad de recortar costos" (Plumer, B., 2017) y generar ganancias a partir de modelos eléctricos. Y a pesar de los avances recientes, aún no hay suficientes estaciones de carga rápida para viajes de larga distancias.

Con tantas variables por considerar, el éxito del vehículo eléctrico dependerá en gran medida de las tecnologías emergentes y la reducción de costos de baterías para consolidar su posición en la industria automotriz.

ANÁLISIS

Cadena de valor

Ha habido un impulso notable tanto por parte de los gobiernos como por parte de los fabricantes de automóviles para la venta de vehículos eléctricos, como lo demuestran los márgenes anímicos de utilidades de EVs y los variados incentivos financieros en su beneficio. "Es innegable que la adopción actual del mercado de automóviles eléctricos está muy influenciada por el entorno político. Los principales mecanismos de apoyo actualmente utilizados en los principales mercados de EVs se enfocan tanto en el despliegue de automóviles eléctricos como de la infraestructura de carga "(Electric Vehicles Initiative, 2017, pp. 7), y seguirán siendo esenciales para el crecimiento continuo de los vehículos eléctricos a medida que el mercado alcanza su madurez.

Sin embargo, a pesar de que un entorno político favorable seguirá siendo indispensable para reducir las barreras a la adopción de vehículos eléctricos, el crecimiento del mercado no se puede sostener exclusivamente en incentivos financieros y gubernamentales. Los vehículos eléctricos deben volverse competitivos fuera de su nicho y sin el apoyo de incentivos financieros para que las fuerzas del mercado puedan ser los principales elementos que impulsen el segmento del mercado de vehículos eléctricos.

“La industria [debe] encontrar una estrategia que iguale los autos eléctricos como algo adecuado para cualquier comprador de automóviles. Una vez que los compradores vean al vehículo eléctrico no como un tipo diferente de automóvil, sino como uno mejor, entonces el mercado de vehículos eléctricos realmente puede despegar” (Coren, 2017).

Con el fin de evaluar los aspectos más importantes de los vehículos eléctricos que pueden conducir a su proliferación exitosa, se realizó un análisis del segmento de mercado utilizando la cadena de valor como marco de referencia. Aunque cada una de las actividades de la cadena de valor contribuye de una forma u otra al

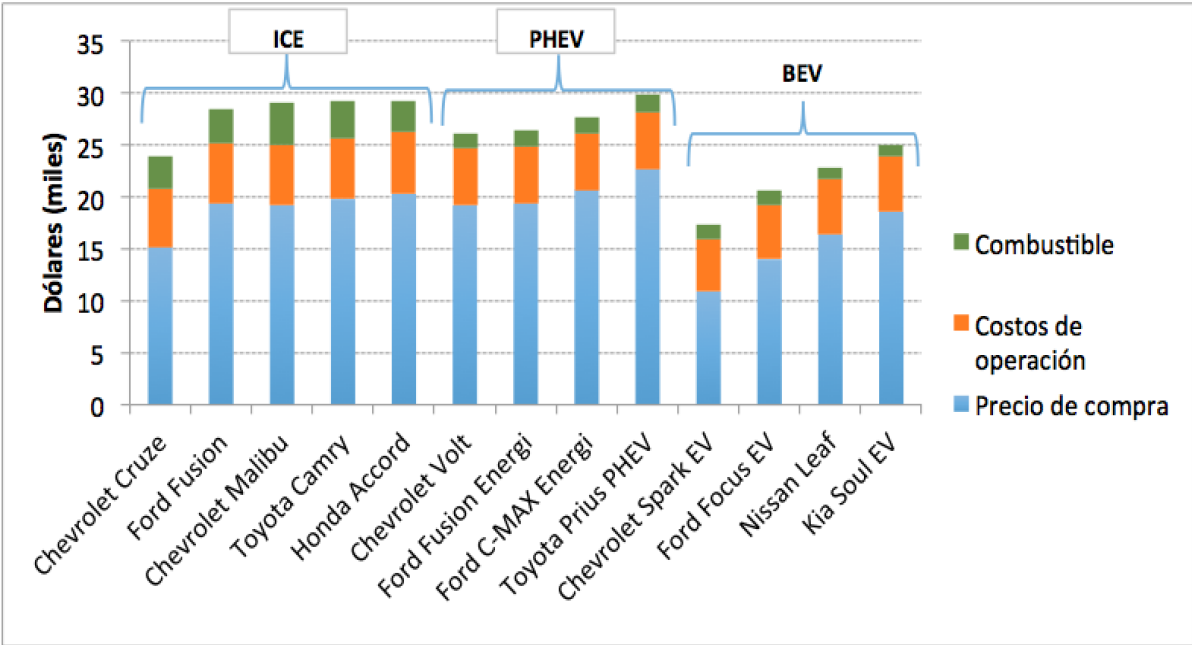
margen del producto, sólo se exploraron las actividades más cruciales para el crecimiento del mercado de los vehículos eléctricos.

Actividades Primarias

- Operaciones

Bajo las condiciones actuales del mercado, los subsidios gubernamentales reducen el precio de compra de la mayoría de los vehículos eléctricos por debajo del de sus homólogos de motores de combustión, como muestra el gráfico 5. Junto con menores costos de combustible y de operación, gracias al bajo costo de la electricidad y la alta eficiencia de las baterías y motores eléctricos, los EV tienen un costo total de propiedad (TCO por sus siglas en inglés) igual o menor que los vehículos ICE cuando están respaldados por incentivos financieros. En algunos casos, "el costo total de un BEV es hasta un 25% más bajo que un vehículo mediano de gasolina" (Kravitz y Zamorano, 2017).

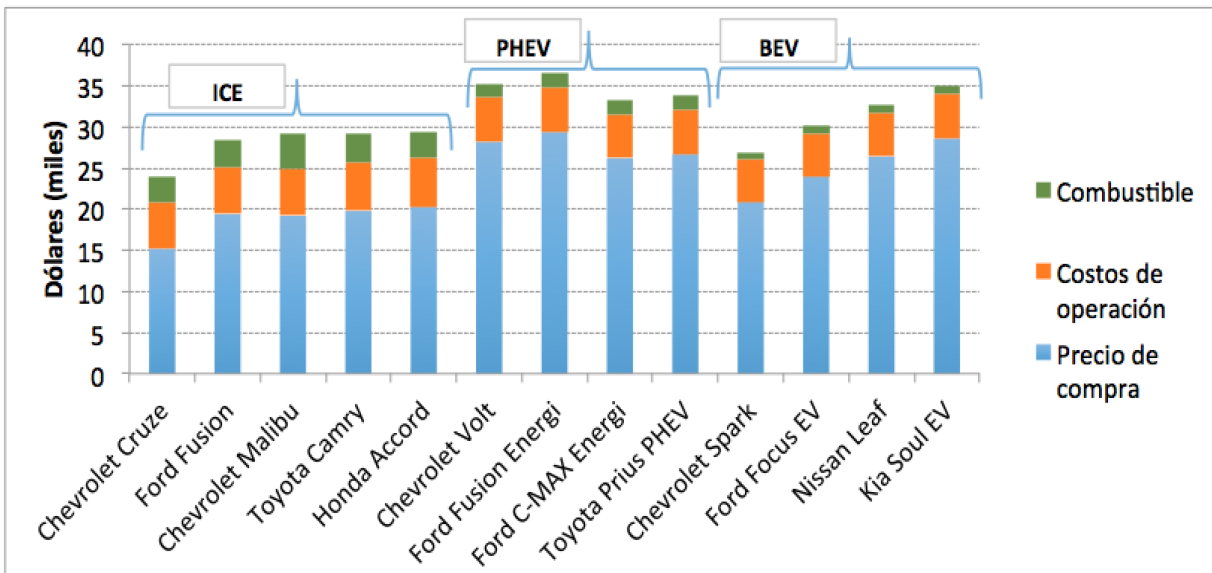
Gráfico 5. Costo total de vehículos ICE y EV con subsidios, modelos 2017



Fuente: Kravitz, R y Zamorano, A. (2017). *Global EV Trends and Forecast* (pp. 1-20). Bloomberg New Energy Finance

Sin embargo, al comparar vehículos ICE con vehículos EV no subsidiados los motores de combustión interna toman la delantera (gráfico 6), y se debe principalmente al costo de las baterías. Tomando 2016 como referencia, el costo estimado de ~ \$ 273 USD / kWh significa que una batería de 30 kWh se convierte en un componente de \$ 8,200 USD para un vehículo eléctrico, lo que aumenta enormemente el precio de compra de los BEV y PHEV.

Gráfico 6. Costo total de vehículos ICE y EV sin subsidios, modelos 2017



Fuente: Kravitz, R y Zamorano, A. (2017). *Global EV Trends and Forecast* (pp. 1-20). Bloomberg New Energy Finance. El precio de compra incluye el pago inicial, el financiamiento y el IVA, y está exento de incentivos y valor de reventa; los costos de funcionamiento consisten del impuesto de circulación, seguro y mantenimiento. El combustible se basa en \$ 0.125 USD / kWh para la electricidad y \$ 2.50 USD / gal para la gasolina.

Los Gráficos 5 y 6 muestran el costo total de vehículos ICE, PHEV y BEV en los EE.UU. durante los primeros cinco años de propiedad, en base a 10,100 millas conducidas por año. Es claro que aunque ambos tipos de vehículos eléctricos se benefician de los subsidios del gobierno, los BEV son más dependientes de los incentivos financieros debido a su alto precio de compra.

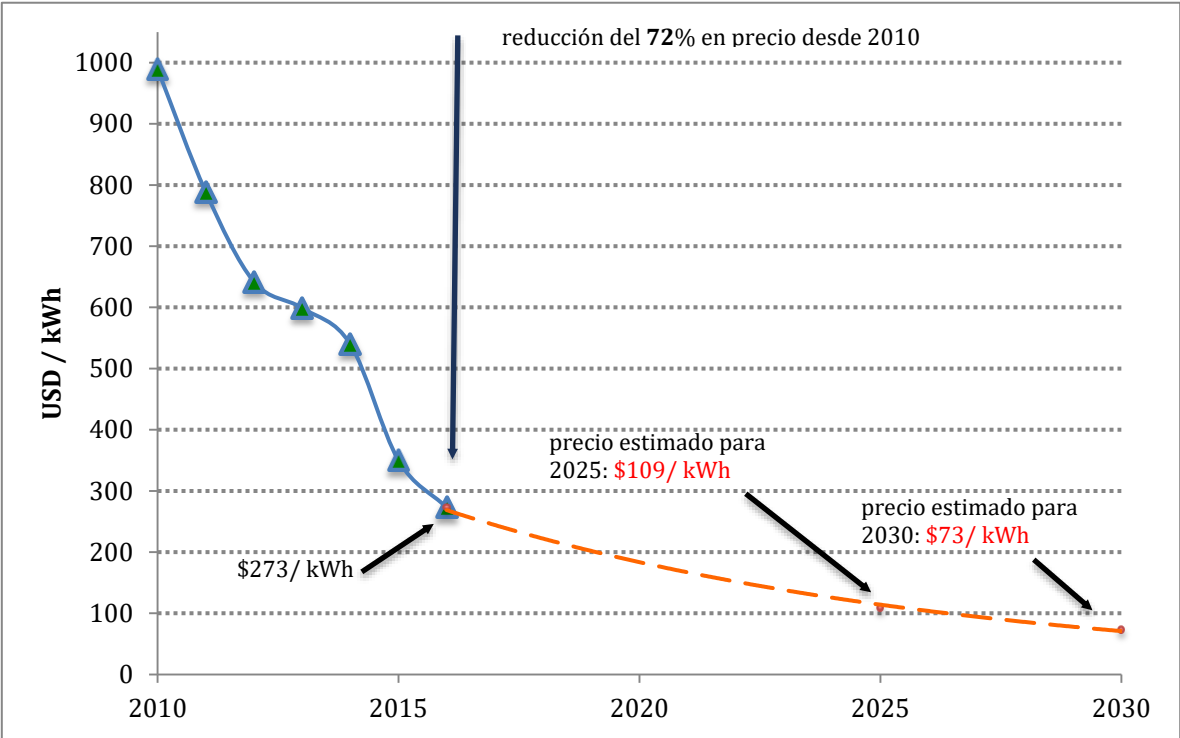
La economía desfavorable de baterías sigue siendo la mayor barrera de rentabilidad para el segmento de mercado de EV, a pesar de que los costos de las baterías han disminuido en más del 70% desde 2010. Teniendo en cuenta la

magnitud de los costos de la batería sobre el costo total del vehículo, los vehículos eléctricos no subsidiados no alcanzarán la paridad de costos con los vehículos ICE sin paquetes de baterías más económicos. Afortunadamente, el costo de las baterías va en la dirección correcta para alcanzar la paridad de costos.

Los datos de BNEF muestran una tendencia clara en la caída de los costos de la batería, con una reducción pronosticada del costo a ~ \$ 200 USD / kWh para 2030 (gráfico 7). En el caso de una batería de 30 kWh, eso significaría una reducción de costos de aproximadamente \$ 6,000 USD del costo inicial del vehículo eléctrico.

El pronóstico de costos de la baterías Li-ion que se muestra en el gráfico 7 se basa parcialmente las mejoras en la densidad de energía que han acelerado la disminución de los costos de la batería, pero hace mayor énfasis en las ganancias obtenidas a partir del incremento de la capacidad de producción.

Gráfico 7. Registro y pronóstico de costo de baterías Li-ion para EV, USD/ kWh



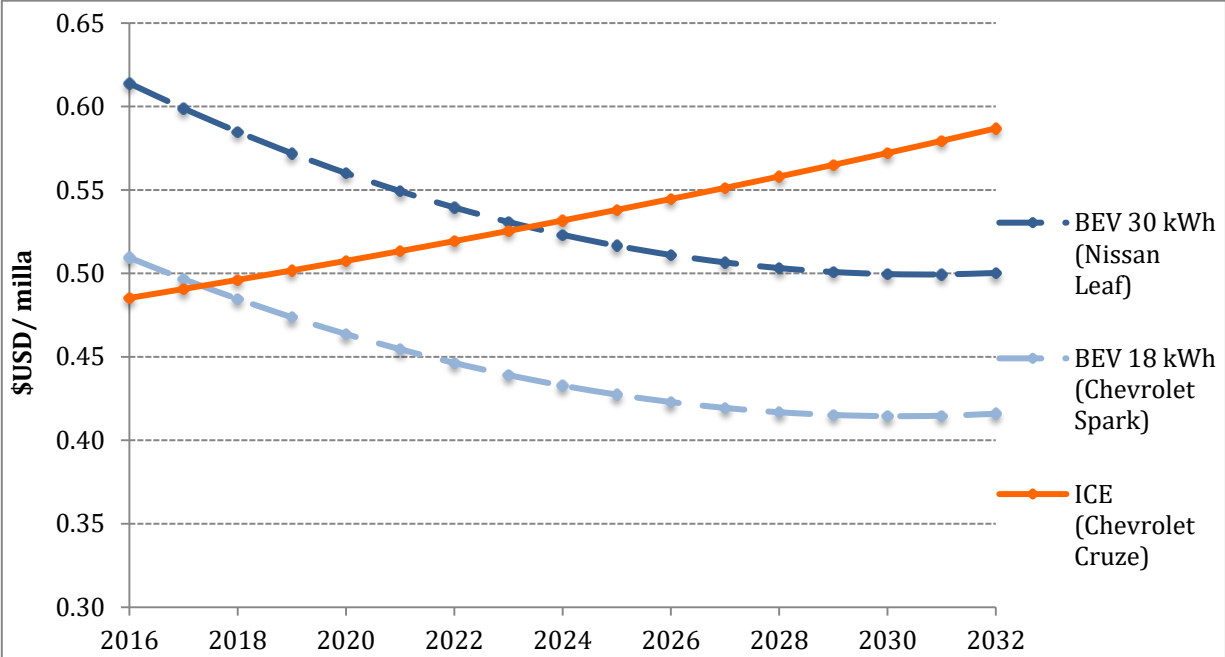
Fuente: Kravitz, R y Zamorano, A. (2017). *Global EV Trends and Forecast* (pp. 1-20). Bloomberg New Energy Finance.

Por sí sola, la reducción del costo de baterías no es suficiente para lograr un TCO igual entre vehículos ICE y vehículos eléctricos; sin embargo, tomando en cuenta

las economías de combustible se observa que la paridad de costos podría ocurrir entre 2020 y 2025, dependiendo de la capacidad de energía de la batería del EV.

El Gráfico 8 muestra una comparación entre un vehículo ICE pequeño y dos BEV con una capacidad de batería igual al promedio para los EV pequeños y medianos - grandes que se presentaron en la tabla 6. Los costos de operación se mantuvieron constantes, mientras que el precio de compra y los costos de gasolina y electricidad se tomaron de EIA Annual Energy Outlook 2015, y están sujetos a una inflación anual de 1% y 3.5% respectivamente. El precio de compra del vehículo eléctrico estuvo sujeto a los costos estimados del paquete de baterías del pronóstico del gráfico 7, más un margen de ganancia del 7%. El TCO se expresa en \$ USD / milla y se calcula en base a 10,100 millas por año, a 5 años.

Gráfico 8. Paridad de costo entre vehículos ICE y EV sin subsidios, USD/ milla



Fuente: Elaborada a partir de datos obtenidos de Kravitz, R y Zamorano, A. (2017). *Global EV Trends and Forecast* (pp. 1-20). Bloomberg New Energy Finance y Berckmans, G., Messagie, M., Smekens, J., Omar, N., Vanhaverbeke, L., y Van Mierlo, J. (2017). Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030. *Energies*, 10 (9), 1-20.

El gráfico 8 muestra claramente que bajo las condiciones especificadas, el ahorro de combustible y la caída de los costos de baterías hacen que el TCO para un

vehículo eléctrico alcance la paridad de costos incluso con vehículos ICE económicos antes de 2025. "Para 2030, los BEV y PHEV serán completamente competitivos con los ICE en Europa, donde se estima que los impuestos sobre el combustible sean altos y los atributos del vehículo (es decir, la energía) más favorables para la electrificación que en otras regiones "(Electric Vehicles Initiative, 2017, pp. 20).

A medida que los vehículos eléctricos se vuelven más competitivos en costos con los ICE, los OEM pueden enfocarse en obtener ventajas competitivas de costos, construir nuevas cadenas de suministro y optimizar sus procesos de fabricación para maximizar su participación de mercado en el creciente segmento de mercado de vehículos eléctricos.

De importancia relacionada es el hecho que los autos eléctricos bajan su TCO a medida que aumenta su millaje anual, ya que los costos adicionales de electricidad y mantenimiento son pequeños, mientras que los ICE aumentan rápidamente sus costos de combustible cuando aumenta el millaje. Esto acentúa una compatibilidad interesante entre los servicios de movilidad compartida, que aumentan significativamente el kilometraje anual de los vehículos por su modelo de negocios, y la electrificación de los automóviles.

La electrificación del vehículo también reduce en gran medida la complejidad mecánica de los automóviles, así como el capital requerido para diseñar y construir automóviles, y allana el camino para nuevos entrantes en el mercado automotriz. Mientras que los motores de combustión interna se componen de cientos de partes móviles⁸ como los pistones, válvulas, bombas y generadores, el único componente móvil del vehículo eléctrico es el motor.

Menos partes móviles conducen a otra diferencia importante: los vehículos eléctricos requieren menos mantenimiento periódico y, en consecuencia, son más confiables. "El vehículo propulsado por gasolina requiere una amplia gama de mantenimiento, desde cambios frecuentes de aceite, reemplazos de filtros, ajustes periódicos y reparaciones del sistema de escape hasta reemplazos de

componentes menos frecuentes, como la bomba de agua, la bomba de combustible, el alternador, etc." (Idaho National Laboratory, 2011).

Tabla 10. Comparación de componentes de vehículos eléctricos y de combustión para funciones similares

Vehículo de combustión	Función	Vehículo eléctrico
Tanque de gasolina	Almacena la energía para operar el vehículo	Batería
Bomba de gasolina	Reemplaza la energía para operar el vehículo	Cargador
Motor de gasolina	Proporciona la fuerza para hacer funcionar el vehículo	Motor eléctrico
Carburador	Controla la aceleración y velocidad	Controlador
Alternador	Proporciona energía a los accesorios	Convertidor CC/CC
-----	Convierte CC a CA para impulsar el motor	Convertidor CC/CA
Controles de smog	Reduce toxicidad de los gases de escape	-----

Fuente: Idaho National Laboratory.(2011). *How do Gasoline and Electric Vehicles Compare?* p.1

Comparado con un ICE, "análisis múltiples muestran que el mantenimiento de EV y los costos de operación son más bajos; basado en una comparación de cinco vehículos eléctricos de cinco fabricantes de automóviles y sus contrapartes de ICE de tamaño similar de las mismas marcas, los vehículos eléctricos generalmente tienen un 20-40% menos de costos de mantenimiento a cinco años " (Knupfer, Hensley, Hertzke y Schaufuss, 2017, pp. 15).

Al manejar menos componentes, los OEM pueden optimizar su proceso de producción de vehículos eléctricos, aumentar el control de calidad y simplificar su logística de fabricación.

- Marketing y ventas

Irónicamente, uno de los mayores obstáculos potenciales para el vehículo eléctrico podría ser los propios fabricantes de automóviles. Los fabricantes de automóviles saben que los vehículos eléctricos son esenciales frente a la demanda cambiante de los consumidores y el cumplimiento de los mandatos de emisión y economías

de combustible; sin embargo, "la recepción templada de los vehículos eléctricos refleja la emoción moderada de la industria sobre el potencial económico a corto plazo de la electrificación" (Knupfer, Hensley, Hertzke y Schaufuss, 2017, pp. 6).

Hasta hace poco, los vehículos eléctricos eran comercializados por los grandes fabricantes de automóviles principalmente para cumplir con los estándares de emisión, lo que se reflejaba en la publicidad y la promoción de su limitada plataforma de modelos eléctricos. Las concesionarias de automóviles también se mostraban renuentes a exhibir y vender modelos eléctricos, pues al requerir menos mantenimiento son menos rentables para sus departamentos de servicio.

Como resultado, un factor que ha ralentizado la adopción de vehículos eléctricos es la ignorancia de los mismos por parte del público general. "Una encuesta reciente de 2,500 estadounidenses descubrió que el 60% todavía desconoce los automóviles eléctricos" (Coren, 2017).

Gracias al abaratamiento de los vehículos eléctricos y los impulsos gubernamentales contra el cambio climático, los líderes de la industria ahora están inyectando miles de millones de dólares a la ampliación de sus plataformas para incluir una serie de nuevos modelos híbridos y eléctricos, y comercializar los vehículos eléctricos para todos los segmentos del mercado. Esto abre varias posibilidades de comercialización, en las que los fabricantes de automóviles pueden capitalizar sobre las fortalezas de los vehículos eléctricos y rectificar errores comunes respecto a los vehículos eléctricos.

Aparte de un mejor rendimiento energético, los coches eléctricos ofrecen otras ventajas adicionales en comparación a los ICE: generan menos de un tercio de la contaminación que sus contrapartes con motor, y no necesitan una caja de cambios o un bloque para el motor. Esto permite la posibilidad de nuevos modelos que proporcionen una mayor protección al conductor y los pasajeros, así como una variedad de diseños para la elección del consumidor.

Los EV también han demostrado que son iguales o superiores en algunos casos a los ICE cuando se trata de rendimiento. Un motor eléctrico puede proporcionar un

torque instantáneo, lo que le permite acelerar más rápido que los ICE. El modelo S de Tesla, por ejemplo, puede acelerar de 0 a 60 mph en 2.5 segundos, lo que lo convierte en el auto más rápido por debajo de \$ 200,000 USD en todo el mercado (Randall, 2017).

Uno de los problemas más comunes relacionado con los vehículos eléctricos es la "ansiedad de rango", es decir, el temor a quedarse sin combustible. A pesar de la falta de una amplia infraestructura de carga para vehículos eléctricos, la ansiedad de rango se ha identificado principalmente como una barrera psicológica, ya que los investigadores han demostrado que incluso los vehículos eléctricos con baterías pequeñas tienen un alcance promedio mayor a la necesidad de la mayoría de los dueños de vehículos.

"La cantidad de manejo diario que las personas realmente hacen, combinada con la capacidad de cargar en sus hogares, significa que las instalaciones públicas de carga rara vez se necesitan. Cuatro de cada cinco europeos conducen menos de 100 km por día: la distancia diaria promedio que cubre un automóvil en Gran Bretaña, por ejemplo, es menos de 40 km. Los estadounidenses cubren alrededor de 70 km por día " (Munoz, 2017).

A pesar de que el alcance de los vehículos eléctricos es suficiente para los hábitos diarios de transporte del ciudadano común, la ansiedad de rango continúa siendo un impedimento prominente para la adopción de los EV. La comercialización de vehículos eléctricos podría beneficiarse enormemente a través de campañas dedicadas a educar a la población general sobre estos conceptos erróneos.

Más aún, la emoción del consumidor sobre los próximos modelos de EV refleja un potencial de crecimiento positivo a corto plazo. A modo de ejemplo, "entre el inicio del pre ordenamiento el 31 de marzo de 2016 y el final del año, consumidores en todo el mundo colocaron más de 380,000 pedidos para el próximo Tesla Modelo 3, el mayor número de pre-pedidos para cualquier automóvil en la historia" (Knupfer, Hensley, Hertzke y Schaufuss, 2017, p.10). La cantidad de pedidos anticipados para el modelo 3 demuestra la popularidad de los vehículos eléctricos entre

consumidores cuando se les presenta una alternativa ecológica pero económica, apoyando así los pronósticos de crecimiento de EV a medida que se expande de un nicho a un segmento de mercado rentable.

La inversión en plataformas EV a través de una gama de nuevos modelos eléctricos es el reflejo de los fabricantes de automóviles para satisfacer la demanda creciente del consumidor. "Hoy en día, la falta de modelos adaptados para servir a un conjunto incipiente de compradores de EV pero de crecimiento rápido es problemático. Los modelos actuales de EV se han centrado en el mercado de consumidores premium menos sensible a altos precios; sin embargo, actualmente existen pocas alternativas de EV para los consumidores más interesados en camionetas todo terreno, *crossovers* y vehículos pequeños" (Knupfer, Hensley, Hertzke y Schaufuss, 2017, p. 13).

La introducción de modelos más asequibles como el modelo 3 está empezando a cambiar este panorama, que a su vez puede reforzarse a través de una comercialización más dinámica de esta nueva generación de vehículos eléctricos.

Actividades de apoyo

- Infraestructura

Dado que la propiedad de vehículos eléctricos aún está en sus primeras etapas, hay una cantidad creciente pero todavía diminuta de estaciones de carga de acceso público, con la mayor parte de la infraestructura de carga compuesta de cargadores residenciales. Esta escasez de estaciones de carga es un problema para el crecimiento del mercado de EV, exacerbado por los largos tiempos de carga típicos de los vehículos eléctricos y la ansiedad de rango de los consumidores.

"Una encuesta reciente descubrió que lo que detiene a los compradores de automóviles de elegir vehículos eléctricos es la falta percibida de estaciones de recarga, algo que el 85% de los encuestados mencionó, seguido por los altos costos (83%) y las preocupaciones por el rango (74%)" (Coren, 2017).

Ya que el éxito duradero de los vehículos eléctricos dependerá en gran medida del desarrollo de una infraestructura de carga de acceso público, tanto los gobiernos como los OEM han tomado iniciativas para implementar servicios de carga y comenzar a ampliar la infraestructura de carga en los mayores mercados de vehículos eléctricos. "El crecimiento de las estaciones de carga públicamente accesible fue impulsado principalmente por el rápido aumento en el número de cargadores rápidos, en gran parte atribuible a China, donde los cargadores crecieron siete veces hasta casi 90 mil unidades" (Electric Vehicles Initiative, 2017, pp.32).

De la misma manera, la red de súper cargadores de Tesla ahora consiste de más de 5,000 puntos de carga rápida a lo largo de varias principales autopistas estadounidenses. "La compañía planea en 2017 duplicar su carga de más de 9,000 conectores, que están ubicados en destinos públicos, como hoteles, *resorts* y restaurantes" ("Charging Is Our Priority", 2017).

El crecimiento de la infraestructura de carga global corre paralelo al aumento en el número de autos eléctricos: la tasa de crecimiento del 72% en el número de cargadores de acceso público en 2016 fue de magnitud similar al crecimiento del stock de EV (59 %). "La tasa mayor de crecimiento para los cargadores que los vehículos eléctricos es consistente con la necesidad de desplegar cargadores como un requisito previo para la adopción de vehículos eléctricos y la naturaleza naciente de la mayoría de los mercados de automóviles eléctricos" (Electric Vehicles Initiative, 2017, pp. 32).

Las ciudades en particular han sido fundamentales para estimular el crecimiento de vehículos eléctricos, y son un buen ejemplo de la importancia de una infraestructura de carga robusta. "Casi un tercio de las ventas mundiales de automóviles eléctricos tuvieron lugar en solo 14 ciudades en 2015, y a menudo alcanzan mayores cuotas de mercado de automóviles eléctricos en comparación con los promedios de sus respectivos países" (Hall et al., 2017, pp. 26).

Siendo los principales centros de venta de vehículos eléctricos, las ciudades muestran una fuerte correlación entre una infraestructura de carga disponible al

público y el crecimiento de las ventas de vehículos eléctricos. "Oslo y Utrecht, las dos principales ciudades en porcentaje de ventas de vehículos eléctricos, también son líderes en la disponibilidad de infraestructura de carga pública. En general, las ciudades con mayor consumo de vehículos eléctricos [tienden] a tener una mayor infraestructura de carga, proporcionando evidencia adicional de que la infraestructura de carga es una parte crucial de un entorno de apoyo para vehículos eléctricos" (Hall et al., 2017, pp. 27).

La importancia de una red de infraestructura significa que la implementación de estaciones de carga adicionales (públicas y privadas) debe adaptarse a las preferencias del consumidor y al crecimiento de vehículos eléctricos, teniendo en cuenta el impacto en la red eléctrica y el aumento en costos y riesgos relacionados. Estrategias de implementación exitosas también deberían tener en cuenta la interoperabilidad de la infraestructura de carga, dada la importancia para los conductores de operar vehículos en diferentes regiones, como la Unión Europea.

"Los marcos legislativos nacionales también son importantes para proporcionar incentivos financieros, ventajas fiscales y otras formas de incentivos monetarios para individuos, empresas y autoridades locales que deseen invertir en la instalación de equipos de carga de apoyo" (Electric Vehicles Initiative, 2017, pp. 34).

Además de los incentivos financieros y no financieros, los gobiernos nacionales y estatales están integrando políticas de infraestructura de carga en sus marcos legislativos y regulatorios (ver tabla 11). Hasta la fecha, un número creciente de países ha proporcionado políticas específicas para incluir la infraestructura de carga en códigos de construcción, lo que ha demostrado ser una medida eficaz para promover la implementación de estaciones de carga.

Tabla 11. Incentivos para la implementación de infraestructura de carga para EV

País	Incentivos para la implementación de infraestructura de carga
China	El gobierno central apoya a las municipalidades que implementan una infraestructura de carga pública al subsidiar la construcción de las estaciones de carga.
Estados Unidos	La mayoría del apoyo a la infraestructura de carga ocurre a nivel estatal. Por ejemplo, el estado de Colorado proporciona subsidios de hasta el 80% de los costos para una unidad EVSE y su instalación.
Francia	Los incentivos financieros incluyen créditos fiscales equivalentes al 30% de un cargador doméstico o subsidios para la instalación de cargadores residenciales o en lugares de trabajo.
Noruega	Noruega proporciona fondos públicos para estaciones de carga rápidas cada 50 km en promedio en las carreteras principales y contribuye incentivos para la instalación de cargadores públicos.
Países Bajos	Las nuevas reformas del gobierno han resultado en la instalación de estaciones de carga de acceso público y en incentivos fiscales para los inversores empresariales de las estaciones de carga.
Reino Unido	Las personas reciben \$ 650 USD por la instalación de un cargador en casa, y las empresas tienen derecho a concesiones de \$ 400 USD por enchufe para financiar puntos de carga para flotas de EVs y / o empleados.

Fuente: Electric Vehicles Initiative. (2017). *Global EV Outlook 2017: Two Million and Counting* (pp. 12-42). International Energy Agency

"En Francia, [una] legislación reciente ordenó que el 50% al 75% de los estacionamientos en cualquier edificio residencial nuevo o renovado deben preinstalarse con conductos que permitan la fácil instalación de [equipos de carga]; en edificios comerciales, 5-10% de los estacionamientos deben tener

conductos adecuados para instalar [equipos de carga] con una potencia nominal de al menos 22 kW" (Electric Vehicles Initiative, 2017, pp. 35). Del mismo modo, las leyes de propiedad de varios países europeos se están adaptando para permitir a los propietarios de vehículos eléctricos instalar infraestructura de carga privada en domicilios propios o alquilados, incluidos los estacionamientos.

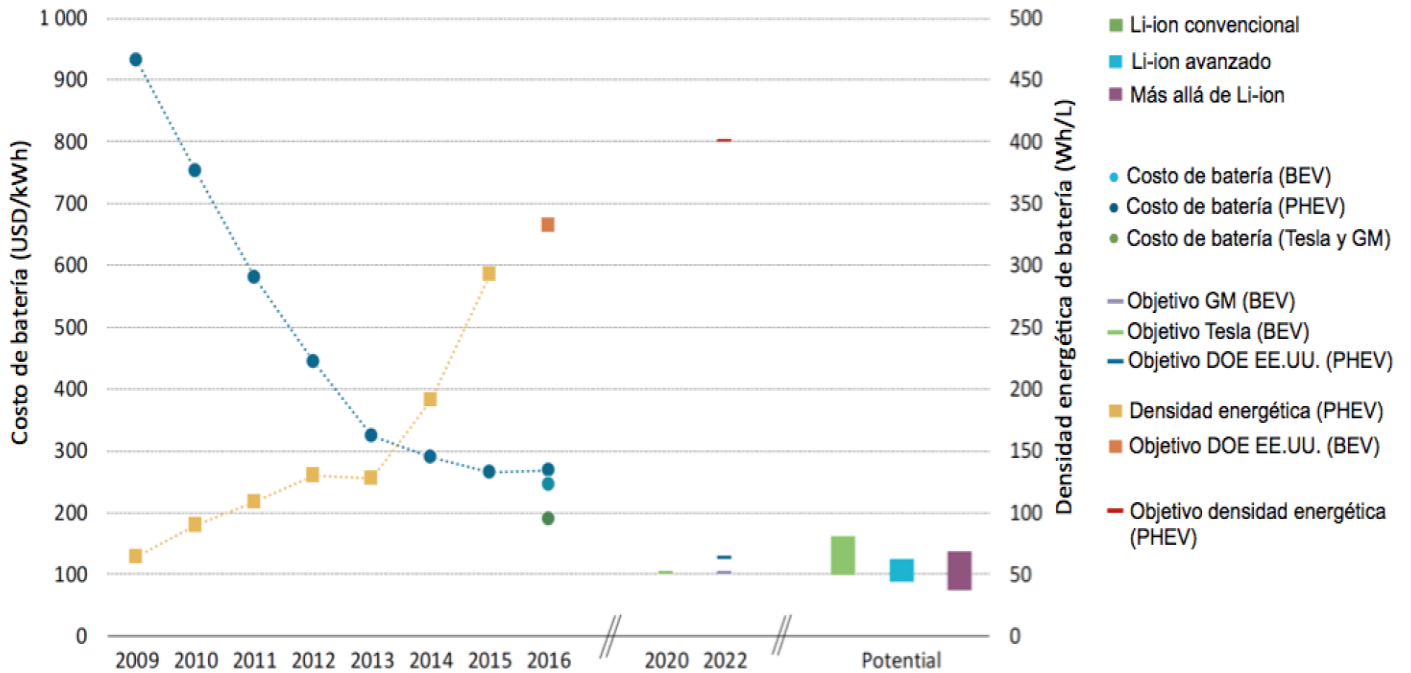
- Desarrollo Tecnológico

Como se mencionó anteriormente, los avances tecnológicos de baterías ayudarán a establecer el escenario para un mayor crecimiento de EV al transformar avances en costos más bajos, mayor alcance de manejo y mayor vida útil para las baterías. La fuente principal de estas mejoras futuras será las innovaciones a las celdas de la batería, puesto que los otros componentes del paquete de baterías se pueden beneficiar de las economías de escala para bajar costos.

La densidad de energía es de particular importancia debido al efecto que tiene sobre otras métricas de rendimiento de la batería. Por ejemplo, una mayor densidad de energía permitiría fabricar baterías de menor tamaño sin afectar la vida útil o el rango de manejo, al mismo tiempo que disminuiría el costo total de la batería y por ende del vehículo eléctrico. A partir de su proliferación en el mercado de vehículos eléctricos, las baterías de ion-litio se han vuelto más baratas gracias al incremento en su producción, pero las mejoras en su densidad de energía son la razón principal por la cual continúan siendo la mejor opción para vehículos eléctricos a futuro.

El Gráfico 9, que se basa en los resultados desarrollados por el Departamento de Energía (DOE) de los EE. UU. en 2016, muestra mejor la relación entre los costos y la evolución de las tecnologías de baterías, en particular la densidad de energía. El gráfico tiene como objetivo "reflejar el costo de producción de las tecnologías que se están investigando actualmente una vez que alcanzan una producción de alto volumen a escala comercial (QUOTE EV Outlook) .¹⁰

Gráfico 9. Evolución de la densidad de energía y costos de baterías Li-ion



Fuente: Electric Vehicles Initiative. (2017). *Global EV Outlook 2017: Two Million and Counting* (pp. 12-42). International Energy Agency

De acuerdo al Departamento de Energía de EE. UU., “aumentar los volúmenes de producción de 25,000 unidades a 100,000 unidades para un paquete de baterías BEV (100 kWh) permite un recorte en los costos de producción del paquete por kWh en un 13%. Otros estudios confirman que el volumen de producción es un factor clave en la reducción del costo del paquete de baterías: se estima que los volúmenes de producción de más de 200,000 paquetes de baterías al año cuestan \$200 USD / kWh o menos” (Slowik et al., 2016).

Para las tecnologías de baterías que actualmente se están investigando, esto se traduce en grandes reducciones potenciales de costos una vez que los volúmenes de producción sean lo suficientemente grandes, incluso si hoy en día tienen un costo mayor que las tecnologías de ion-litio convencionales. Dado que las tecnologías actualmente en la etapa de I + D rinden mejor que las baterías disponibles en el mercado, "la evaluación [del Departamento de Energía de EE. UU.] sugiere que los costos de la batería continuarán disminuyendo" (QUOTE EV Outlook) a medida que se introducen nuevas tecnologías al mercado.

El Gráfico 9 también incluye la estimación de costos de baterías para BEV del DOE de EE. UU., así como las estimaciones de Tesla y GM. Ambos fabricantes de automóviles pronostican un costo de \$ 100 USD / kWh dentro de los próximos dos a cuatro años, mientras que el DOE de EE. UU. espera un costo ligeramente más alto de \$100 USD/ kWh para 2022, un pronóstico similar al basado en los datos de BNEF. Esto confirma la relación entre nuevas tecnologías de baterías y los pronósticos de reducción de costos, lo cual eventualmente llevará a la paridad de costos entre vehículos eléctricos y vehículos convencionales.

En cuanto a las tecnologías de baterías actuales, los fabricantes de automóviles y baterías están en la búsqueda constante de optimizar los puntos fuertes y minimizar las fallas de las baterías en cuestión. Dado que las propiedades relevantes a la eficiencia de las baterías no se pueden maximizar en una sola celda, la selección de la química de las celdas que alcance el balance óptimo de estas propiedades es un paso crítico en el desarrollo de baterías para vehículos eléctricos.

En la Tabla 12 se muestra una evaluación de las baterías más comunes en la industria por parte de Boston Consulting Group (BCG), donde se evalúa a cada batería de acuerdo a cuatro diferentes factores que determinan su calidad. A partir de los resultados obtenidos, se puede apreciar que las cinco baterías son de una calidad similar, aunque cada una tiene sus fortalezas y debilidades

Tabla 12. Comparación de baterías Li-ion más comunes en el mercado

Batería	Seguridad	Funcionamiento	Vida Útil	Costo	Total
LFP	2	4	4	1	11
LMO	3	3	2	3	11
LTO	2	4	4	2	12
NCA	4	2	4	2	12
NMC	4	3	3	3	13

Fuente: Dinger et al. (2010). *Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020*. Boston Consulting Group.

Los fabricantes de automóviles son parciales a las baterías de cobalto por su rendimiento uniforme a través de todos los factores, aún cuando son más caras que las otras químicas de batería. Además, ya que el costo de baterías puede disminuir mediante su producción a gran escala, las baterías NMC y NCA tienden a ser las químicas predilectas de la industria automotriz.

Más allá de la química de la batería, los diseños de los electrodos y las celdas también juegan un rol importante en el desempeño del paquete de baterías. Dependiendo del formato de la celda, los mismos materiales pueden tener grandes variaciones en sus parámetros de rendimiento, por lo que incluso fabricantes de celdas y OEM que utilicen los mismos materiales de celda que sus competidores pueden tener densidades de energía y potencia muy diferentes. Esta es una oportunidad para que los fabricantes de baterías, proveedores automotrices y fabricantes de equipos originales creen valor a través de no solo el desarrollo de diferentes químicas de baterías, pero también de diseños.

Aparte del rendimiento electroquímico de los materiales activos y problemas adicionales a la manufactura de baterías, como la comprensión de los mecanismos de envejecimiento, los OEM y fabricantes de baterías también pueden optimizar sus diseños tomando en cuenta los demás componentes del paquete de baterías. Al nivel del empaque, las innovaciones pueden girar en torno a reducir el peso y el costo de los sistemas de manejo de calor, los componentes estructurales y de seguridad y el sistema electrónico, mismos que aumentan el volumen, peso y costo del producto terminado.

La tabla 13 muestra un resumen de las rutas existentes para la optimización de cada parámetro de la batería, tanto al nivel de la celda como en el paquete de baterías. Como lo demuestran las tecnologías de baterías actuales y en desarrollo, el potencial para reducir los costos por debajo del umbral de \$ 100 USD / kWh parece no solo posible, sino probable.

Tabla 13. Rutas para mejora de celdas y paquetes de batería

	Celda	Paquete
Energía	Alto voltaje/ materiales de alta capacidad	Balance de peso de componentes, estrategias de control
Potencia	Diseño de electrodos, utilización de materiales de alto rango (electrodos)	Conexiones celda con celda, estrategias de control, manejo térmico
Durabilidad	Entendimiento de mecanismos de degradación	Manejo térmico, estrategias de control
Seguridad	Electrolitos (sales, solventes y aditivos), separadores y recubrimientos de electrodos	Manejo térmico, estrategias de control, integración vehicular, sistema eléctrico
Costo	Formatos de celdas estandarizados, uso de materiales y procesos de bajo costo	Módulos, componentes eléctricos estandarizados, óptima selección de celdas

Fuente: Berg, H., Matic, A., y Johansson, P. (2017). *Emerging Battery Technologies Towards 2025* (pp. 1 - 45). Swedish Hybrid Vehicle Center.

- Abastecimiento

La demanda de materias primas aumentará inevitablemente junto con el mercado de EV, ya que los materiales activos de los electrodos y las piezas complementarias representan casi la mitad de los costos de la batería, tanto a nivel de la celda como del paquete de baterías. "Mientras que un BEV no lleva una cantidad significativa de partes móviles, sí requiere materias primas adicionales, principalmente para sus baterías. Además de litio, los materiales utilizados incluyen níquel, cobalto, grafito, manganeso y aluminio "(Erich y Witteveen, 2017, pp. 14).

En su mayor parte, el suministro de materias primas no se considera una restricción a futuro. El litio y el grafito, por ejemplo, representan una gran porción de la batería en términos de peso⁹, pero en cuestión de costos son componentes relativamente baratos. El grafito representa solo el 5% del costo total del electrodo negativo, mientras que "el litio representa menos del 2 por ciento de los costos al

nivel de la celda" (Dinger et al., 2010, pp. 7). Por lo tanto, cualquier aumento potencial en su precio solo tendría un impacto limitado en los costos de la batería.

La disponibilidad de cobalto, por otra parte, podría presentar un problema a futuro. El cobalto tiene un suministro global limitado, y su escasez podría afectar seriamente la cadena de suministro para los fabricantes de automóviles ya que constituye una pieza clave para las baterías de vehículos eléctricos. "Si aceptamos que los vehículos eléctricos representarán el 20% del mercado total de automóviles para 2025, se necesitarán cerca de 200,000 toneladas adicionales [de cobalto] al año para cubrir la demanda mundial" (Hernández, 2017), por lo que el mercado de el cobalto tendría que triplicar su producción en los próximos ocho años.

Esto plantea varios problemas para los fabricantes de automóviles: primero, aproximadamente el 63% del mercado mundial de cobalto pertenece a la República Democrática del Congo (RDC)¹¹, cuyos problemas políticos y de derechos humanos hacen que la minería en el país sea una opción improbable.

El segundo problema es que incluso tomando en cuenta a la RDC, la producción de cobalto no es suficiente para satisfacer la demanda del mineral: "Se prevé que en 2017, por primera vez, se [registre] un déficit de 900 toneladas, según los datos de la consultora Grupo CRU recogido por Reuters "(Hernández, 2017).

El déficit de producción sólo puede resolverse con nuevas minas, que los fabricantes de automóviles y terceros han financiado rápidamente como un amortiguador a los crecientes riesgos políticos en la República Democrática del Congo; hay perspectivas mineras en Canadá, Rusia y China siendo consideradas como posibles candidatos. Sin embargo, la incertidumbre sobre el grado de adopción de vehículos eléctricos deja un amplio margen de error sobre si la extracción de cobalto excederá o será inferior a la demanda esperada.

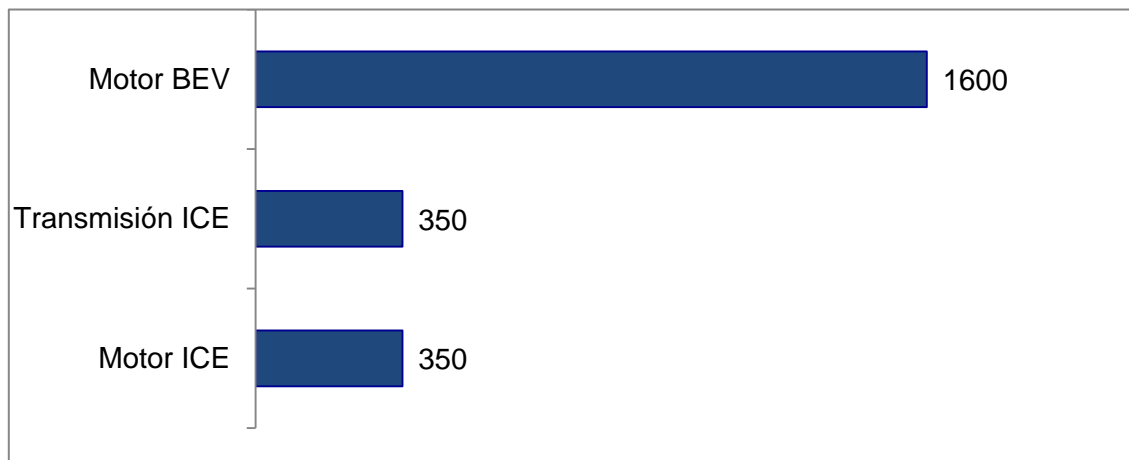
Impacto(s) sobre la industria automotriz

Entorno operativo

Uno de los primeros aspectos sobre los que el aumento de EV tendrá un efecto importante será el diseño y la producción de vehículos, empezando por el tren motriz eléctrico. Durante un siglo, los fabricantes de automóviles han desarrollado fábricas, empleos y una cadena de suministro alrededor del motor de combustión interna. El cambio a una plataforma de vehículos eléctricos significa la creación de nuevas cadenas de suministro, una pérdida neta de miles de empleos y una reestructuración masiva por miles de millones de dólares.

Dado que los motores eléctricos son más pequeños y menos complejos que los motores de combustión interna, su producción es más propensa a ser automatizada, lo que resulta en menos trabajo de producción. Los datos de varias plantas de fabricación de ICE y EV (ver gráfico 10) muestran que la cantidad de motores eléctricos producidos por empleado es significativamente más alta que la de los motores de combustión interna.

Gráfico 10. Promedio de componentes ICE y EV producidos anualmente por empleado



Fuente: Erich, M., y Witteveen, J. (2017). Breakthrough of electric vehicle threatens European car industry (pp. 2-19). ING Economics Department.. Promedios son estimados basados en información de plantas de producción de BMW, VW, Daimler y Nissan.

Debido a que casi un tercio del valor de la cadena de suministro automotriz está

directamente relacionado con la fabricación del tren motriz, la transferencia de ICE a EV amenaza un cambio en la dinámica de poderes dentro de la industria: "La falta de conocimiento y capacidad de producción significa que los fabricantes de automóviles dependen de proveedores para ayudarlos a construir vehículos eléctricos" (Erich y Witteveen, 2017, p. 14), la mayor parte del tiempo subcontratando la fabricación completa del tren motriz a mega proveedores como Bosch y Continental. "A diferencia de los vehículos ICE, donde sólo suministran partes, esto les da a los [proveedores] la oportunidad de convertirse en un taller de una sola parada al suministrar todo el motor de EV" (Erich y Witteveen, 2017, p. 14).

El sector automotriz enfrenta entonces una pérdida de valor en 'hardware'. A medida que los vehículos eléctricos tomen control de la cadena de suministro automotriz, "el mercado de trenes motrices de EV se caracterizará por la fuerte competencia, un enfoque en los precios y los márgenes, más subcontratación y menos espacio para diferenciar [entre productos]. Es probable que haya mucha comoditización, que en última instancia puede conducir a una pérdida de valor de la cadena de suministro del tren motriz y, por lo tanto, de todo el automóvil" (Erich y Witteveen, 2017, p. 15), lo que afectará negativamente a los fabricantes de automóviles pero que en última instancia beneficiará a los consumidores.

Otro impacto importante que los vehículos eléctricos tendrán sobre la industria automotriz es la inversión masiva que los fabricantes de automóviles enfrentarán durante la transición de sus operaciones comerciales hacia la electrificación. Debido a su escala de operación, un OEM necesita en promedio cinco a siete años para desarrollar nuevos modelos de vehículos. Por lo mismo, deben encontrar el equilibrio adecuado entre la venta de suficientes vehículos eléctricos para cumplir con las emisiones reglamentarias y la demanda de los consumidores, y al mismo prevenir que el costo adicional de los paquetes de baterías canibalice sus ganancias corporativas.

Al mismo tiempo, los fabricantes de automóviles no pueden permitirse el lujo de perder el enfoque en los modelos ICE, que a menudo son más rentables, lo que

deja un amplio margen para que los vehículos de motor de combustión continúen siendo relevantes durante las próximas décadas. Esto significa que incluso las compañías comprometidas con la completa electrificación de su plataforma seguirán vendiendo autos con motores de combustión interna al menos hasta 2024.

"Todos los nuevos modelos vienen como híbridos o eléctricos completos, pero los modelos existentes solo harán el cambio cuando deban renovarse por completo (o nunca se harán eléctricos y se retirarán)" (Marshall, Davies y Stewart, 2017).

La dificultad de predecir el grado y la velocidad de la adopción de los vehículos eléctricos es un riesgo significativo para los fabricantes de automóviles, ya que la producción de dichos vehículos requerirá una transformación que afectará negativamente la liquidez y las ganancias a corto plazo. "En un escenario, Morgan Stanley cree que todo el negocio de automóviles de Volkswagen podría sufrir pérdidas entre 2025 y 2028 a medida que se transforma" (*Electric cars are set to arrive far more speedily than anticipated*, 2017).

Algunos fabricantes de automóviles están mejor situados que otros para la transición: Las marcas premium como Daimler, BMW y Volvo tienen los recursos para invertir en una nueva plataforma eléctrica y son más ágiles que sus competidores, ya que tienen menos tipos de automóviles que rediseñar y reemplazar.

Los fabricantes de autos para el mercado de autos compactos y sub-compactos tienen una tarea más complicada, ya que operan con márgenes de ganancia muy delgados, y sin embargo aún deben invertir fuertemente en nuevas plataformas eléctricas en previsión de la adopción masiva de vehículos eléctricos. "Mientras que Volvo entregó menos de 535,000 autos el año pasado, [y] BMW y Mercedes-Benz vendieron más de 2 millones cada uno, los jugadores grandes como Volkswagen y Toyota movieron arriba de 10 millones de autos" (Marshall, Davies y Stewart, 2017).

Sin embargo, los fabricantes de automóviles parecen decididos a hacer la transición, incluso cuando afecte su flujo de caja y ganancias en el corto plazo. "Prepararse para una transición eléctrica será doloroso, pero perdersela por completo sería desastroso" (*Electric cars are set to arrive far more speedily than anticipated*, 2017).

Entorno industrial

Además de los fabricantes de equipos originales y los grandes proveedores de partes, el mercado de automóviles eléctricos agregará nuevos jugadores a la industria automotriz. "En un extremo de la cadena de valor están las empresas químicas y los productores de componentes de baterías; en el otro extremo están los operadores de movilidad y las compañías eléctricas. Todos [enfrentarán] duros desafíos a medida que trabajan para definir y asegurar posiciones sólidas en la cadena de valor" (Berkeley, 2017), pero mientras los fabricantes de automóviles lidian con su costoso legado de fábricas y gigantescas fuerzas de trabajo, los nuevos participantes estarán libres de tales restricciones.

Los fabricantes de celdas de baterías en particular tienen una gran oportunidad de crecimiento, ya que aquellos con tecnología superior pueden ganar terreno en el mercado y aumentar sus volúmenes de producción para disminuir sus precios. A medida que la industria madura, sin embargo, deben encontrar formas de diferenciar su tecnología de otros competidores y mantener una ventaja competitiva en un mar de diversidad de productos.

Los proveedores primarios, por otro lado, tendrán que enfocar sus esfuerzos en "conservar su rol como integradores para los OEM a medida que las prioridades de la industria y los centros de costos se desplazan hacia las baterías" (Dinger et al., 2010, pp.12). Las empresas químicas y otros proveedores secundarios suministrarán los materiales activos, separadores y otras partes clave para la fabricación de celdas; sin embargo, dado que el mercado de EV representa una pequeña fracción de su negocio, "probablemente preferirán usar a los fabricantes

de celdas como intermediarios para proteger sus márgenes del escrutinio de los OEM y proveedores primarios" (Dinger et al., 2010, pp.12).

Una pregunta clave que determinará la evolución de la industria es la manera en que los OEM manejarán las asociaciones con jugadores nuevos y los ya establecidos en función de los cambios de la cadena de valor. "Algunos OEM ya han formado fuertes vínculos con fabricantes de celdas a través de alianzas o acciones de propiedad. Estas relaciones le otorgan a los OEM acceso exclusivo al conocimiento, la tecnología y la capacidad de producción de los fabricantes de celdas y les permiten diferenciar sus vehículos en términos de la tecnología de la batería elegida" (Dinger et al., 2010, pp. 11). Sin embargo, la exclusividad de tales alianzas puede restringir la respuesta de un fabricante de automóviles a avances tecnológicos logrados por otros fabricantes de celdas y limitar los efectos de las economías de escala.

Otra alternativa para los fabricantes de automóviles es colaborar con proveedores de primer nivel con acceso a varios fabricantes de celdas y aprovechar su experiencia acumulada de negocios y tecnología de baterías. "Para los OEM, este modelo les brinda menos control y menos conocimiento detallado de la tecnología de la batería, pero les permite beneficiarse de los efectos de escala de apalancar una base de suministro [diversa]. También reduce sus costos iniciales y el costo potencial de cambiar a una tecnología alternativa, en caso de que una surgiera" (Dinger et al., 2010, pp. 11).

A corto plazo, y conforme los fabricantes de equipos originales continúen desarrollando su propio conocimiento y tecnología de baterías, las nuevas alianzas formadas con proveedores y fabricantes de celdas serán de suma importancia. "A medida que la tecnología madure y las baterías se conviertan gradualmente en *commodities*, los márgenes disminuirán y la escala será cada vez más importante, cambiando el énfasis a relaciones más tradicionales entre los fabricantes de celdas, los proveedores de primer nivel y los OEM" (Dinger et al., 2010, pp. 13).

El desarrollo de la infraestructura de carga para los vehículos eléctricos también puede tener un impacto considerable en la industria, ya que las cargas aplicadas a la red eléctrica tendrán consecuencias en la calidad del suministro de energía, el riesgo de aumento de costos para los consumidores y el papel de la industria energética en el desarrollo del mercado de vehículos eléctricos.

"Empresas energéticas, servicios públicos y operadores de sistemas de distribución [han capitalizado] su acceso a la infraestructura de distribución de energía y experiencia única en sistemas eléctricos [para] implementar redes de carga de vehículos eléctricos y diversificar sus negocios" (Electric Vehicles Initiative, 2017, pp. 36). Como resultado, las empresas energéticas han jugado un papel importante en el crecimiento global de la infraestructura de carga: "En Alemania, las compañías eléctricas representan el 35% de todas las estaciones de carga públicas" (Hall et al., 2017, pp. 32), mientras que "en China, la Corporación Estatal de Electricidad de China y la Red de Energía del Sur de China han abierto más de 27,000 estaciones de carga y más de 800 estaciones de intercambio de baterías de vehículos eléctricos para autobuses "(Hall et al., 2017, pp. 6).

En los Estados Unidos, la inversión en una red de estaciones de carga de acceso público aún se encuentra en sus primeras fases, pero muestra potencial para crecer rápidamente. En un esfuerzo por eliminar la dependencia de su sector energético en el carbón, varios intereses corporativos han realizado un esfuerzo por impulsar la electrificación del transporte, que si tiene éxito podría ser altamente beneficioso para la industria energética y la automotriz.

Para examinar los efectos de la electrificación del transporte sobre las ventas de electricidad, investigadores del Grupo Brattle modelaron "un desplazamiento constante de vehículos de transporte ... lejos de la quema de combustibles fósiles y hacia alternativas eléctricas, de modo que el [sector] estuviera completamente electrificado para 2050". Su conclusión fue que una transición completa a la electrificación para 2050 "aumentaría la demanda total de electricidad en 2,100 TWh, o el 56% de las ventas de electricidad de 2015 si los BEV se convirtieran en el modo exclusivo de transporte" (Weiss, Hledik, Hagerty y Gorman, 2017, pp. 6).

La predicción de las posibles ganancias para empresas eléctricas supone que la tendencia política y tecnológica hacia la des-carbonización del sector eléctrico continuará en efecto, especialmente tomando en cuenta la disminución significativa de los costos de baterías y sus mejoras de desempeño.

Sin embargo, dado que las ventas de electricidad dependen de la cantidad total de millas conducidas, la convergencia de otras tendencias en la industria automotriz "podría generar cambios fundamentales en la forma en la que se consumirá el transporte y así cambiar el número total de millas recorridas por el vehículo" (Weiss, Hledik, Hagerty y Gorman, 2017, p. 9).

Por ejemplo, la emergencia de la conducción autónoma o la movilidad compartida podrían alterar significativamente el uso convencional del transporte individualizado y tener un impacto considerable sobre la demanda eléctrica. "Los automóviles de propiedad individual de hoy en día tienen una tasa de utilización muy baja (típicamente de cuatro a ocho por ciento) y por lo tanto permanecen inactivos durante largos períodos de tiempo, lo que hace posible una carga de baja potencia durante varias horas. Los vehículos autónomos compartidos, por otro lado, bien podrían usarse más como taxis o autos Uber, que conducen de 150 a 250 millas por día, o cerca de diez veces más que el automóvil de propiedad privada promedio " (Weiss, Hledik, Hagerty y Gorman, 2017, p. 10).

El avance tecnológico de vehículos autónomos podría conducir a aumentos a largo plazo en millas recorridas de hasta un 35 por ciento, lo que a su vez daría lugar a aumentos significativos en la demanda total de electricidad. "Sin embargo, incluso si el [kilometraje total] se mantiene similar a los niveles actuales, en un mundo de transporte dominado por vehículos eléctricos, autónomos y compartidos, los patrones de carga y la infraestructura de soporte podrían ser significativamente diferentes" (Weiss, Hledik, Hagerty y Gorman, 2017, p. 10).

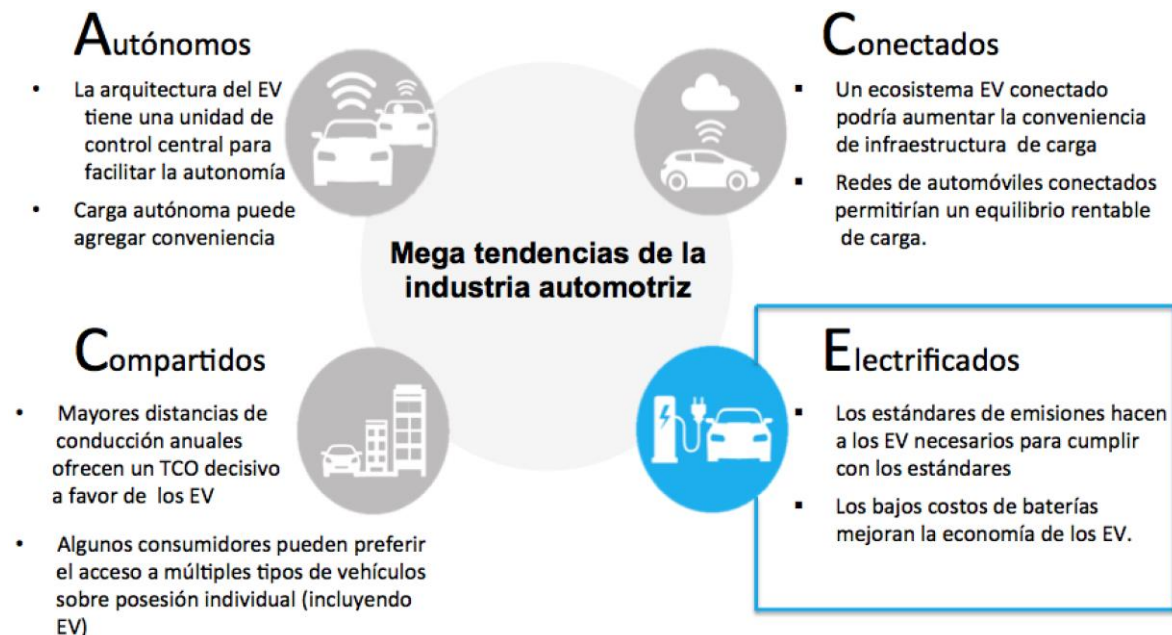
Por ejemplo, la ubicación de puntos de carga podría cambiar de casas particulares y lugares de trabajo a ubicaciones centralizadas a las que los vehículos podrían volver periódicamente, "o como parte de una infraestructura vial pública ... mediante la carga inductiva incrustada en las carreteras mismas" (Weiss, Hledik,

Hagerty y Gorman, 2017, pp. 10).¹²

Entorno remoto

Cambios en las preferencias de los consumidores, regulaciones más estrictas y avances tecnológicos en el sector automotriz suman a un cambio fundamental en la movilidad individual, de los cuales los vehículos eléctricos son solo una de varias respuestas dentro de la industria automotriz. El nuevo hábito de los consumidores de utilizar soluciones personalizadas a sus necesidades crea nuevos segmentos de vehículos especializados hacia fines muy específicos.

Figura 7. Megatendencias principales de la industria automotriz



Fuente: Knupfer, S., Hensley, R., Hertzke, P., y Schaufuss, P. (2017). *Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability* (pp. 1-26). McKinsey&Company.

"Cada vez más, las personas usan múltiples modos de transporte para completar sus viajes; los bienes y servicios se entregan a los consumidores en lugar de ser recogidos por ellos. Como resultado, el modelo comercial tradicional de venta de automóviles se complementará con una gama de diversas soluciones de movilidad bajo demanda, especialmente en entornos urbanos densos que desincentivan proactivamente el uso del automóvil privado" (Gao, Kaas, Mohr y Wee, 2016,

pp.5).

El potencial de la electrificación de vehículos para impactar a la industria automotriz se vuelve aún más pronunciado cuando se consideran sus interacciones con las otras mega tendencias de la industria. Por ejemplo, la energía eléctrica es ideal para vehículos autónomos (AV) porque facilita su funcionamiento al establecer la batería como la unidad de control central. "Igualmente, es probable que la popularidad de las [nuevas] soluciones de servicios de movilidad se estimule debido a los bajos costos operacionales ofrecidos por BEVs" (Knupfer, Hensley, Hertzke y Schaufuss, 2017, p. 13).

Los vehículos eléctricos, a su vez, se benefician de las otras tendencias al establecerse como la opción preferida para la creación de flotas autónomas o servicios de movilidad compartida. "Como resultado [del] desplazamiento hacia diversas soluciones de movilidad, hasta uno de cada diez automóviles nuevos vendidos en 2030 probablemente sea un vehículo compartido, lo que podría reducir las ventas de vehículos de uso privado. Esto significaría que más del 30 por ciento de las millas conducidas en autos nuevos vendidos podrían ser de movilidad compartida" (Gao, Kaas, Mohr y Wee, 2016, p. 5).

Debido a que los vehículos de movilidad compartida tienen un kilometraje mucho mayor que los vehículos de propiedad privada, los vehículos eléctricos pueden beneficiarse al máximo del crecimiento de estos servicios. Además, como los automóviles están cada vez más integrados y conectados entre sí, los fabricantes de automóviles no tendrán más remedio que participar en el nuevo entorno de movilidad o arriesgarse a volverse obsoletos, consolidando aún más la importancia de establecer plataformas de vehículos eléctricos.

"Un cambio de paradigma hacia la movilidad como servicio, junto con los nuevos participantes [en el sector automotriz], inevitablemente obligará a los fabricantes de automóviles tradicionales a competir en múltiples frentes. Los proveedores de movilidad (Uber), los gigantes tecnológicos (Apple, Google) y los OEM especializados (Tesla) aumentan la complejidad del panorama competitivo, [así que] los actores automotrices tradicionales están bajo presión continua para

reducir costos, mejorar la eficiencia del combustible, reducir emisiones y ser más eficientes en términos de capital ..., lo que probablemente lleve a cambios en las posiciones dentro del mercado en las cambiantes industrias automotriz y de movilidad, [y] potencialmente conduzca a la consolidación o nuevas formas de asociación entre los jugadores titulares " (Gao, Kaas, Mohr y Wee, 2016, pp. 10).

De los efectos más profundos que las tendencias de la industria automotriz son capaces es un cambio duradero en la propiedad del automóvil. "Ya vemos señales tempranas de que la importancia de la propiedad de automóviles privados está disminuyendo: en los Estados Unidos, por ejemplo, la proporción de jóvenes (de 16 a 24 años) con licencia de conducir disminuyó del 76% en 2000 al 71% en 2013, mientras que ha habido más del 30 por ciento de crecimiento anual en los miembros que comparten automóviles en América del Norte...en los últimos cinco años" (Knupfer, Hensley, Hertzke y Schaufuss, 2017, pp. 8).

La electrificación del vehículo, la movilidad compartida y la tecnología de conducción autónoma podrían significar la sustitución gradual de vehículos propios por servicios de transporte, en el que las flotas de automóviles ofrezcan viajes a demanda. Basado en el modelo de movilidad compartida, "puede tener más sentido que los autos sean propiedad de una [empresa] que posea cientos o miles de automóviles con una estructura financiera optimizada, en lugar de que los conductores individuales obtengan sus propios contratos de arrendamiento ... [Además], lo que importa [para las empresas] es el retorno de la inversión y una lista de verificación de características, y no el estilo, diseño, innovación o ajuste y acabado [del vehículo]. Eso plantea un desafío para [empresas como] Apple e incluso para Tesla. Si los usuarios no son los compradores, las manijas de las puertas retráctiles o los chaflanes con corte de diamante no importan" (Evans, 2017).

Un análisis detallado de McKinsey&Company sugiere que las áreas densas con una gran base vehicular ya establecida son terreno fértil para estos nuevos servicios de movilidad, y muchas ciudades y suburbios de Europa y América del Norte se ajustan a este perfil. Dado que la población mundial seguirá

desplazándose hacia las ciudades (con más de 1.100 millones de nuevos residentes urbanos para el año 2030) [Electric Vehicles Initiative, 2017], la necesidad de soluciones de movilidad que cumplan con las reglamentaciones ambientales solo aumentará en los próximos años.

Así, el tipo de ciudad se convertirá en un posible indicador del comportamiento de movilidad, reemplazando la perspectiva regional tradicional de la industria automotriz. Las ciudades han demostrado ser actores clave para ayudar a acelerar la transición hacia vehículos eléctricos "como resultado de políticas locales dedicadas que complementan los esquemas nacionales de EV, [creando así] un ambiente favorable para el uso de EV y barreras del consumidor reducidas" (Electric Vehicles Initiative, 2017, pp. 36).

Para los fabricantes de automóviles, comprender dónde se encuentran las oportunidades comerciales futuras requerirá una visión más precisa de los mercados de movilidad, específicamente cómo los factores de la ciudad tales como la densidad de población, el desarrollo económico y la prosperidad afectarán las ventas. "En ciudades como Londres, por ejemplo, la propiedad de automóviles ya se está convirtiendo en una carga para muchos, debido a las tarifas de congestión, la falta de estacionamiento, el tráfico, etcétera. Por el contrario, en áreas rurales como el estado de Iowa en los Estados Unidos, el uso del automóvil privado seguirá siendo el medio preferido de transporte" (Gao, Kaas, Mohr y Wee, 2016, pp. 6).

CONCLUSIONES

A pesar de las barreras de entrada de la industria automotriz, el clima político actual ha impulsado el mercado de vehículos eléctricos desde un nicho de mercado a un segmento en crecimiento con un gran potencial de disrupción. La combinación de regulaciones ambientales y una base sólida de políticas de apoyo ha posibilitado el crecimiento del mercado de vehículos eléctricos y continuará impulsando la demanda en el corto plazo.

Complementando el clima político está el costo decreciente de las baterías de EV, que continuarán disminuyendo a medida que aumenten los volúmenes de producción de baterías. La caída de los costos de baterías es esencial para lograr la paridad de costos entre los vehículos eléctricos y vehículos convencionales, que debería de ocurrir antes de 2028 si las tendencias actuales se mantienen.

También se están desarrollando varias nuevas tecnologías de baterías, con las cuales se busca aumentar la densidad de energía de la batería o la duración de su vida útil principalmente a través de la optimización de la química de las celdas. El rendimiento superior de estas nuevas tecnologías y sus potenciales reducciones de costos constituyen una base fundamental para el aumento pronosticado de vehículos eléctricos en la industria automotriz.

El efecto que los vehículos eléctricos tengan sobre la industria automotriz dependerá del grado de su adopción, pero tendrán un impacto no obstante. Los primeros signos de cambio incluyen los compromisos recientes de los principales fabricantes de automóviles hacia la electrificación parcial o total de sus plataformas, nuevas formas de asociación entre los fabricantes de celdas, los proveedores de primer nivel y los OEM, así como los nuevos participantes en la industria automotriz.

Otros efectos son menos probables de que sucedan, pero tendrían un mayor impacto. La convergencia de la electrificación con otras tendencias de la industria podría alterar la posesión individuales del automóviles, el diseño de ciudades e incluso la función principal de los vehículos en el futuro a medida que la movilidad

como servicio y la automatización se vuelven más pronunciadas. El futuro de la industria automotriz tiene muchas opciones, pero para bien o para mal, en un papel menor o como los principales actores, los vehículos eléctricos serán parte de ese futuro.

ANEXO I: Estudio de caso de Tesla Motors

Aunque ha habido varios desarrollos clave que impulsaron la nueva popularidad del automóvil eléctrico y su posterior aumento en su demanda, uno de los más fundamentales ha sido el éxito de Tesla Motors en una industria tan conservadora como la automotriz.

Desde su creación en 2003, Tesla ha evolucionado desde un pequeño "startup" de Silicon Valley hasta uno de los fabricantes de automóviles más valiosos del mundo, creciendo en paralelo al automóvil eléctrico. Su modelo S y modelo X han innovado al vehículo eléctrico, una invención centenaria que hasta ahora sólo existía al margen del ámbito automovilístico, y la ha llevado hasta el mismo nivel que otros autos de lujo. "El elegante diseño de Tesla y su ingeniosa tecnología ... han asegurado que solo el Mercedes S-Class, que Daimler-Benz ha pasado décadas refinando, se venda mejor en los salones de lujo" ("On a Charge - Tesla's Mass-Market Ambitions", 2017).

Como resultado, Tesla ha sido el principal responsable del establecimiento del vehículo eléctrico como un modo de transporte alternativo y viable. "Rodamos la cinta hasta 2017 y Tesla está avanzando en tecnología autónoma, produciendo dos autos de lujo, vendiendo baterías comerciales a gran escala y a punto de incursionar en instalaciones solares" (Debord, 2017). En lugar de desvanecer como el resto de los entrantes a la industria automotriz desde la década de 1960, Tesla está prosperando a medida que más consumidores se unen a su visión de un mundo electrificado.

Los consumidores no son los únicos que están optando por Tesla; muchos inversionistas también respaldan a la compañía y su potencial para revolucionar la industria. En abril de 2017, el valor de mercado de Tesla alcanzó más de \$ 51 mil millones de dólares, superando a General Motors y convirtiéndose brevemente en el fabricante de automóviles más valioso de los Estados Unidos. Desde entonces ha disminuido, pero con un valor de mercado de \$ 29 mil millones de dólares, Tesla se mantiene muy por encima del hasta hace poco segundo fabricante más grande de automóviles estadounidense, Ford.

"Esa valoración no tuvo nada que ver con la cantidad de autos que vendía la compañía de Elon Musk, que era (y aún es) una fracción de la producción de fabricantes de automóviles establecidos como GM o Ford. En cambio, el valor de Tesla fue impulsado por la percepción de que está mejor posicionado para producir automóviles totalmente eléctricos que los grandes fabricantes de automóviles, al menos en los Estados Unidos" (Debord, 2017).

Sin embargo, la mayor innovación de Tesla no es ninguno de sus modelos eléctricos. El concepto de usar electricidad para impulsar automóviles no es una idea novedosa después de todo, y varios otros fabricantes de automóviles están progresando en su afán de convertirse en participantes importantes en el mercado.

Más bien, el ascenso y el éxito continuo de Tesla se debe a sus prácticas comerciales que han derribado el status quo de la fabricación de automóviles y, al hacerlo, han allanado el camino para una nueva etapa de innovación y disrupción en la industria automotriz.

Los automóviles son tanto el sector manufacturero más grande como el sector minorista más grande, por lo que una gran cantidad de modelos de negocio dependen del mecanismo tradicionales de manufactura, venta y propiedad de automóviles. Tesla, por otro lado, difiere de otros fabricantes de automóviles porque su modelo de negocio es fundamentalmente diferente; "En caso de que sus vehículos se conviertan en algo común y verdaderamente producido en masa ..., significará un gran cambio en los ingresos de toda la economía" (Gross, 2017).

Las siguientes son algunas de las prácticas comerciales que caracterizan y diferencian a Tesla de todos los demás fabricantes de automóviles de la industria:

Marketing. Los fabricantes de automóviles a menudo gastan de manera desproporcionada en publicidad para hacerse notar en un campo atestado. En 2015, tres de los diez principales anunciantes en los Estados Unidos fueron compañías de automóviles: General Motors (no. 3, \$3.1 mil millones), Ford (no. 6, \$2.5 mil millones) y Fiat / Chrysler (no.8, \$2.2 mil millones) .

Pero Tesla es un caso atípico en la industria automotriz, ya que ha logrado acumular ventas significativas sin emitir ningún anuncio o invertir en material publicitario. Tesla tampoco participa en gran parte de los costosos esfuerzos de comercialización que son común para el resto de la industria: "las compañías de automóviles gastan toneladas de dinero para aparecer en espectáculos automotrices, pagar por modelos portavoces, exhibiciones, atracciones y otros eventos. Tesla ni siquiera se molestó en presentarse al Auto Show de Nueva York "(Gross, 2017)

Concesionarios de automóviles. Las compañías automotrices también gastan de manera desproporcionada en sus vastas redes de concesionarios de automóviles, ya que son el único camino para llegar a los consumidores por lo que, en cierto modo, son los clientes principales de los fabricantes de autos. Tesla no tiene distribuidores; en su lugar, vende directamente al consumidor a través de sus propias tiendas minoristas, y mediante pedidos en línea. Por lo tanto, cada vehículo de Tesla representa una pérdida de ganancias para un concesionario de automóviles una amenaza potencial para una estructura centenaria de distribución y venta de automóviles en la que los vehículos se venden a través de comerciantes que mantienen grandes lotes e inventarios.

Sin embargo, también hay desventajas a los métodos de Tesla. Por ejemplo, no está claro si el ahorro de vender directamente al consumidor compensa los costos de mantener las salas de exposición de Tesla. Y mientras que eliminar los concesionarios aumenta las ganancias brutas de Tesla y su control sobre la cadena de distribución, también aumenta el riesgo de tener autos sin vender inactivos en sus salas de exposición y tiendas, un riesgo que los otros fabricantes de automóviles mitigan a través de su red de concesionarios.

Investigación y desarrollo. Tesla, incluso con todos los productos que maneja, se maneja de manera frugal. "Sanford C. Bernstein, una firma de investigación, considera que el gasto total de Tesla en capital y en investigación y desarrollo hasta el momento es inferior a \$4 mil millones de USD, una séptima parte de lo que gasta Volkswagen en un año" ("On a Charge - Tesla's Mass-Market

Ambiciones ", 2017). A pesar de su baja inversión en I + D, Tesla se ha establecido rápidamente como una marca de lujo en menos de catorce años, en una industria donde la convención sugiere que debería tomar veinticinco años.

Incentivos. Las compañías de automóviles, en un esfuerzo por mantener sus niveles de inventario a un nivel factible, gastan mucho efectivo en incentivos: descuentos, los paquetes de opciones, las recompensas en efectivo y las características adicionales son algunos ejemplos de incentivos utilizados para mover vehículos fuera del inventario. En contraste a las armadoras, Tesla ha construido un modelo de negocio en el que cobra la cantidad total, y los pocos incentivos que sí ofrece están respaldados financieramente por el gobierno de los EE.UU: las personas que compran automóviles totalmente eléctricos en los Estados Unidos tienen derecho a un crédito tributario federal de \$ 7,500 USD.

Un nuevo modelo de negocios. Un aspecto único del modelo de negocios de Tesla es que le pide a sus clientes depósitos un año o más por adelantado antes de la entrega de su vehículo. Estos depósitos son, sin lugar a dudas, un pasivo a largo plazo, pero también funcionan como préstamos sin intereses para Tesla. A fines de 2016, Tesla tenía \$283 millones de dólares en depósitos de clientes, con otros \$325 millones en camino de los depósitos para su nuevo vehículo, el modelo 3.

Tesla también ha reescrito la economía de la manufactura de automóviles eléctricos. Mientras que otros fabricantes de automóviles saturaban sus vehículos eléctricos con baterías voluminosas y costosas, Tesla redujo sus costos al unir cientos de pequeñas baterías portátiles producidas en masa que cuestan la mitad de lo que otros fabricantes de automóviles pagan a sus proveedores por baterías diseñadas a medida. Con la próxima apertura de su Giga-fábrica, una enorme planta de baterías cerca de completarse en el desierto de Nevada, Tesla afirma que reducirá los costos en otro 30%.

Además de reducir los costos de producción de sus baterías, Tesla los agrega a vehículos más grandes y caros, con precios que comienzan en \$ 70,000 USD, para poder absorber más fácilmente el costo de la batería. "[La batería] también da

a los autos un rango decente de más de 250 millas (400 km) entre cargas y aceleración relámpago" ("On a Charge - Tesla's Mass-Market Ambitions", 2017).

Las baterías son uno de los múltiples componentes que Tesla maneja en su línea de producción, la cual se parece mucho a la línea de producción original de Henry Ford debido a su fuerte integración vertical. En sus esfuerzos por atraer a los compradores y hacer frente a la "ansiedad de rango", Tesla fabrica sus propias piezas, construye sus propios automóviles y los entrega directamente al cliente.

En el proceso, se ha vuelto mucho más integrado que los fabricantes de automóviles de antaño. Tesla incluso ha construido su propia red de más de 3,500 cargadores. "Estos [supercargadores] pueden cargar una batería al 80% en 40 minutos, y los conductores de Tesla pueden cargar sin cargo" (B. Lee, 2017).

Todas las herramientas, la forja y el diseño involucrado en los vehículos de Tesla utiliza capital a un ritmo desmesurado, por lo que Tesla requiere una gran cantidad de efectivo para sus operaciones diarias. "Barclays, un banco, cree que la empresa consumirá \$11 mil millones en los próximos cinco años y no generará ganancias significativas hasta entonces" ("On a Charge - Tesla's Mass-Market Ambitions", 2017).

Aquí es donde entra en juego el modelo de negocios de Tesla, ya que sus depósitos de clientes y sus recortes a sus costos operativos compensan su alta necesidad de liquidez. Tesla ha logrado reducir incluso los gastos de capital, después de haber comprado una fábrica en California de GM y Toyota, luego de un proyecto fallido en 2008 por parte de las armadoras, a sólo \$42 millones USD. Tesla también compró el equipo de la fábrica a un precio barato, beneficiándose de otros fabricantes de automóviles que luchaban por reducir su capacidad a raíz de la crisis financiera.

A medida que Tesla ha madurado ha logrado obtener una base de clientes sin publicar publicidades ni aparecer en autos y sin construir una red de distribuidores. En 2015, después de poco más de diez años en el negocio, las ventas de Tesla superaron los 50,000 automóviles; para 2020, espera vender 500,000 al año.

Con su modelo de negocios alternativo, Tesla ha demostrado que las barreras de entrada a la industria automotriz son mucho más bajas de lo que se pensaba, y en el proceso ha puesto los cimientos para un ecosistema comercial alternativo. Esta es la verdadera innovación de Tesla, y la amenaza que representa para el resto de las armadoras.

Sin embargo, el modelo de negocios de Tesla no está exento de riesgos.

Durante toda su existencia, Tesla ha operado en un nicho de mercado. No tiene competidores directos y se ha centrado en construir un automóvil atractivo para consumidores que aprecian la velocidad y el diseño sobre el rendimiento del auto, similar a otras marcas de lujo. Si bien son los más rápidos, los automóviles que operan en la parte alta del mercado no son conocidos por su calidad, y tampoco lo son los vehículos de Tesla.

Desde su introducción al mercado, el modelo S de Tesla (su modelo más vendido) ha pasado por una serie de problemas de calidad y fiabilidad, desde dificultades de rendimiento hasta retrasos en la fabricación. "Un gran ejemplo es el problema del moho que crece en el interior del techo del Modelo S, particularmente en los automóviles noruegos. Debido a que su techo solar panorámico es difícil de fabricar e instalar según especificaciones precisas, los techos del modelo S a menudo gotean" (B. Lee, 2017) y son susceptibles a moldes agresivos que los invaden a velocidades alarmantes.

Tesla tampoco es muy bueno para la producción de sus vehículos "incluso en volúmenes modestos, que en dos años seguidos no cumplieron con el marco de entrega a tiempo" (De Bord, M. 2017), en 2010 y 2011. Algunos de los desafíos pueden atribuirse a la cadena de suministro, ya que Tesla apenas ha captado la atención de proveedores de primer nivel.

Sin embargo, incluso tomando en cuenta sus problemas en la cadena de suministro, para ser un fabricante de automóviles exitoso que lleva más de una década en la industria, Tesla fabrica una cantidad sorprendentemente baja de

vehículos. Mientras un fabricante como Ford produce 10 millones de automóviles anualmente, Tesla nunca ha fabricado ni 100,000 en un año.

Una posible explicación para las complicaciones de fabricación de Tesla podría ser la "cultura 'startup' de Tesla, que ... enfatiza la flexibilidad, el esfuerzo individual y trabajar largas horas para alcanzar metas ambiciosas" (B. Lee, 2017). Lo que no enfatiza es lo que ha logrado que todos los demás fabricantes de automóviles sean exitosos: una cadena de producción regimentada, enfocada en la eliminación de desperdicios e ineficiencias y en la optimización de la calidad del producto final.

"Cuando una cultura funciona bien, existe la suposición de que puede universalizarse ... Tesla es una cultura emergente, pero [demuestra] una arrogancia ... que se muestra al pensar que la cultura de Silicon Valley se puede aplicar a la fabricación de automóviles" (B. Lee, 2017).

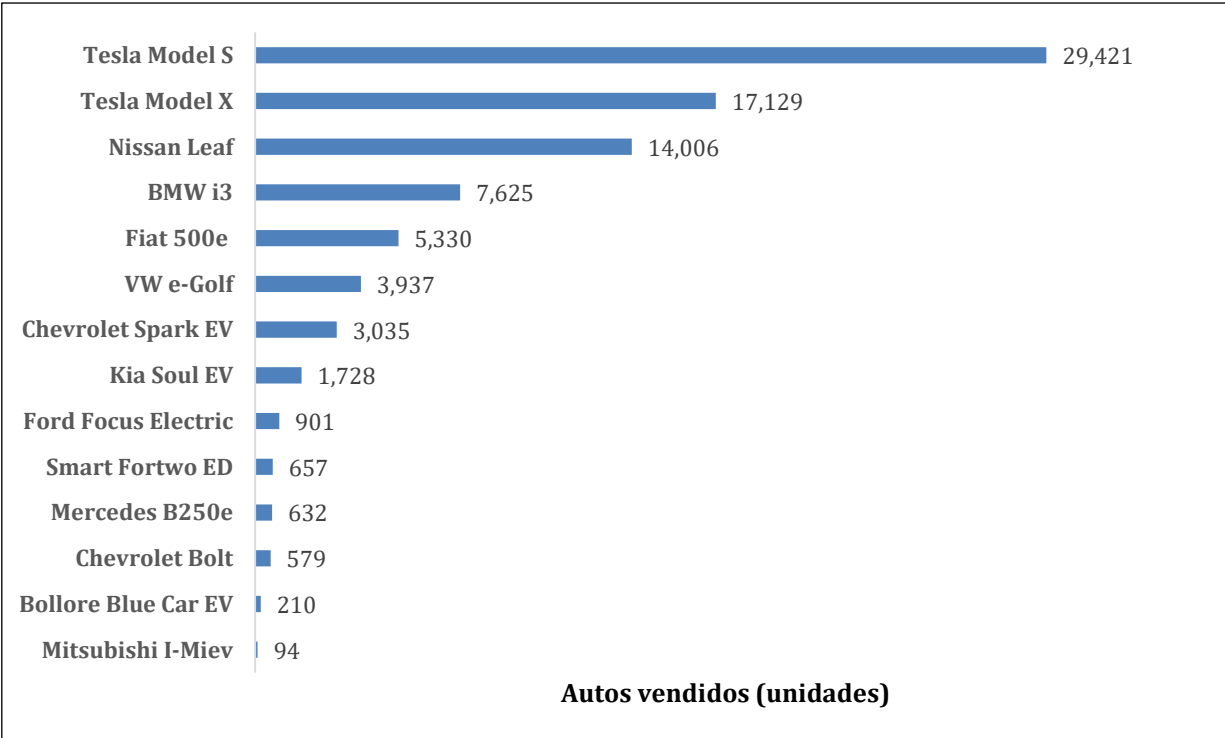
Los problemas de Tesla con su propia calidad y confiabilidad no lo han afectado hasta ahora, ya que opera en un espacio de lujo que es más tolerante de dichos errores. Sin embargo, también influye el misticismo asociado con la marca, "un retroceso a una era previa de la industria automotriz; aprovechan la idea de que hay un nuevo espacio tecnológico para ser conquistado "(B. Lee, 2017).

"La gente tiene una respuesta emocional a Tesla, pero no necesariamente a Leaf, Bolt y otros modelos ... [porque] la gente está comprando la misión [de Elon Musk]. En cierto nivel, es para salvar al mundo, y él tiene un producto para respaldarlo ". (Coren, 2017).

Sin embargo, a medida que la compañía aumenta en escala y se esfuerza por transformarse de una marca de lujo a una en el mercado principal, la confiabilidad y la calidad van a ser problemas reales para Tesla. El nivel de calidad que han alcanzado en el Modelo S no será suficiente para tener éxito en el mercado de autos producidos en serie, donde el valor de los fabricantes se refleja en su conocimiento institucional acumulado y sus altos estándares de producción.

A pesar de sus deficiencias, Tesla sigue por delante de su competencia. "Los sedanes modelo S de la compañía y los SUV modelo X representaron más de la mitad del mercado EV en Estados Unidos en 2016, más que los siguientes 12 modelos combinados" (Coren, 2017).

Gráfico 11. Modelos de vehículos eléctricos vendidos en Estados Unidos, 2016



Fuente: Coren, M. (2017). *Tesla's biggest competition for the Model 3 will not come from other electric vehicles*. Quartz. <https://qz.com/1040213/teslas-biggest-competition-for-the-model-3-will-not-come-from-other-electric-vehicles/>

Su dominio sobre el mercado estadounidense (ver gráfico 11) es respaldado por el hecho de que Tesla es, por mucho, la marca EV más visible. "La firma de análisis y visualización de datos Quid examinó 3,142 artículos de noticias estadounidenses sobre vehículos eléctricos en 2017. Descubrió que se mencionó a Tesla en casi todos los principales temas de EV y apareció en el doble de artículos en comparación con su competidor más cercano, el Chevy Bolt "(Coren, 2017).

Nuevos entrantes

La aparición de nuevos participantes en la industria automotriz, incluso en nichos de mercado como los vehículos eléctricos, es un signo prometedor de cambio dentro de la industria hacia nuevos desarrollos tecnológicos. El hecho de que la mayoría de estos participantes sean compañías de tecnología como Apple, Google y Uber solo refuerza la creencia en una nueva ola de innovación en el automóvil, ya sea que se trate de mejores vehículos eléctricos o la creación de vehículos autónomos, o una convergencia entre ambos.

El surgimiento de nuevos participantes en la industria automotriz también sirve como un claro ejemplo del creciente legado de Tesla, y al mismo tiempo destaca su postura única tanto entre los fabricantes de automóviles tradicionales como entre los recién llegados.

En marcado contraste con el enfoque de Tesla para ingresar a la industria automotriz, las compañías de tecnología están optando por dejar la fabricación de vehículos a los OEM tradicionales. "Los gigantes tecnológicos Apple Inc. y Google de Alphabet Inc., que alguna vez intentaron destruir Detroit, han llegado a la conclusión de que por ahora no quieren construir autos". (Naughton, Webb y Bergen, 2016).

En lugar, las empresas de Silicon Valley están colaborando con fabricantes de automóviles y creando plataformas compartidas para el desarrollo de nuevos vehículos eléctricos o autónomos. Google, por ejemplo, contrató un equipo de expertos para su programa de vehículos autónomos (AV). Su equipo incluye a Alan Mullaly, el CEO previo de Ford y a Lawrence Burns, el jefe anterior de I + D de General Motors.

"Es un equipo de ensueño con experiencia real en la fabricación de automóviles. Con su conocimiento acumulado – y observando los conflictos de Tesla – saben que construir su propio auto es una misión de locos. También reconocen que la cultura de Silicon Valley es fundamentalmente diferente de la cultura de la manufactura" (B. Lee, 2017).

Google también está colaborando con fabricantes de automóviles como Fiat Chrysler, el cual le proporcionó a Google 100 furgonetas para su transformación en vehículos de conducción automática. Del mismo modo, Volvo le ha proporcionado vehículos utilitarios deportivos a Uber para probar taxis robot en Pittsburgh.

Estas ofertas personifican la marcada diferencia entre Tesla y otros nuevos participantes en la industria automotriz. Mientras que Tesla se ha sumergido en todos los aspectos de la producción de automóviles, corporaciones como Google están tratando de transformar a la industria sin convertirse en una compañía automotriz. "[Ellos] siguen apostando por suministrar el software autónomo que impulsará los paseos en robot, pero la concesión de que no están a la altura de la compleja tarea de producción en masa inclina el equilibrio de poder hacia los fabricantes de automóviles tradicionales "(Naughton, Webb y Bergen, 2016).

Mientras tanto, los fabricantes de automóviles se mantienen competitivos al inyectar miles de millones de dólares en el desarrollo de sus propios sistemas de auto-conducción, expandiendo sus laboratorios de investigación de Silicon Valley e instalando características semiautónomas en sus vehículos actuales. "Según Gary Shapiro, presidente y CEO de la Consumer Technology Association ... la tecnología ahora representa la mitad del costo de un automóvil" (Naughton, Webb y Bergen, 2016).

Lo que falta a los OEMs es una fuerza laboral competente de ingenieros de software, lo que representa una oportunidad para que las compañías de tecnología proporcionen un requisito necesario para la creación de la próxima gran innovación en la industria. "Las empresas tecnológicas (también) creen que podrían aumentar los márgenes anémicos de la manufactura de vehículos si tuvieran acceso a datos de rendimiento de los vehículos que permitirían una fabricación más eficiente" (Naughton, Webb y Bergen, 2016).

Las compañías de automóviles controlan esas bases de datos y es improbable que las compartan con un competidor, aunque podrían estar más abiertos a la idea de compartirlo con un socio. Debido a que ni las armadoras automotrices ni

las compañías tecnológicas tienen los recursos o el conocimiento para poseer con éxito el primer automóvil autónomo, un acuerdo entre ambas partes parece ser el resultado más probable.

Más allá del futuro del vehículo autónomo, es evidente que incluso en contra de nuevos participantes con amplios recursos, las barreras de entrada a la industria automotriz aún son altamente efectivas. Esta es la razón por la cual Tesla es un caso atípico, y por qué su triunfo como un fabricante de automóviles establecido tiene un impacto tan amplio en la industria.

El modelo 3

Con numerosas fortalezas que le han dado su ventaja competitiva, pero con debilidades potencialmente fatales, la última prueba de Tesla como un fabricante de automóviles viable podría venir con el éxito o el fracaso de su modelo 3.

En su búsqueda de penetrar el mercado automotriz, Tesla se está preparando para lanzar el modelo 3, un automóvil diseñado para atraer a clientes convencionales con un precio de \$ 35,000 USD. Su objetivo es producir 20,000 vehículos modelo 3 para fines de 2017, a fin de satisfacer los 500,000 pedidos previos de los que ya aceptó depósitos.

Es un objetivo desafiante, incluso para Tesla. A diferencia de los clientes anteriores que a menudo poseen más de un automóvil, es más probable que los compradores en el rango de \$ 30,000 a \$ 50,000 USD dependan del modelo 3 como su único medio de transporte y, por lo tanto, pueden ser menos tolerantes con los problemas de calidad. También pueden carecer de espacio para cargar su automóvil en sus hogares, lo que hace que la disponibilidad de cargadores públicos sea aún más necesaria.

Incluso más importante es que el costo y el rendimiento se convertirán en factores cruciales para el modelo 3, "poniéndolo en competencia con autos de combustibles fósiles como el BMW Serie 3 y el Mercedes Clase C, no solo otros automóviles eléctricos" ("On a Charge - Tesla's Mass-Market Ambitions ", 2017).

Tesla puede considerarse una compañía de tecnología, pero la producción del modelo 3 lo convertirá en un fabricante a gran escala de un vehículo de un mercado masivo, cambiando efectivamente los clientes a los que sirve y los competidores a los que se enfrenta.

Para que el modelo 3 tenga éxito, Tesla tendrá que aumentar drásticamente su producción en más de diez veces su capacidad actual en el próximo año; en otras palabras, necesitaría crecer a una velocidad similar a la del Modelo T de Henry Ford. "El revolucionario automóvil producido por Henry Ford comenzó su producción en masa alrededor de 1911, cuando 12,000 ejemplos salieron de la línea de montaje. Para 1914, ese número había aumentado a 300,000" (De Bord, 2017).

Un aumento en la capacidad de producción de esa magnitud "es [un paso] complicado para Tesla porque la compañía no está explotando su ventaja actual en el mercado, sino que está tratando de crear y dominar un nuevo mercado" donde la competencia es intensa y los márgenes de ganancia son mucho menores. "Con sus vehículos modelo S y modelo X, Tesla domina el nicho de mercado de los automóviles eléctricos de lujo. Pero quiere capturar una porción masiva del mercado actualmente marginal para los EV – y al hacerlo alentar una transición rápida de todo el transporte a la energía eléctrica "(De Bord, M. 2017).

Los analistas calculan que Tesla, en el mejor de los casos, aumentará su producción a 320,000 automóviles, en lugar de su objetivo de 500,000 automóviles, para 2020.

"Pero tal vez no importe. [Elon] Musk insiste en que está más interesado en interrumpir la industria del automóvil y avanzar en el cambio a los coches eléctricos que en jugar con el juego de números de sus rivales. Entre los vecinos de Silicon Valley a los que Tesla le gusta compararse, la integración vertical es la sensación del momento, y las firmas tecnológicas más grandes están menos interesadas en hacer cosas que en la creación de "plataformas" de software, y la variedad de los servicios se pueden construir en base a ello" ("On a Charge - Tesla's Mass-Market Ambitions", 2017).

Notas Finales

¹ Si bien el desarrollo de mejores tecnologías de combustión es suficiente para satisfacer las normas de emisiones a corto plazo, los estándares de emisión de gases de invernadero seguirá a la alza. En la Unión Europea, por ejemplo, el estándar para emisiones de CO₂ podría bajar de 130g/km hasta 68 g/km para el 2025, una reducción de casi el 50%. Datos obtenidos a partir del artículo *Electric cars are set to arrive far more speedily than anticipated*, Febrero 2017.

² Las fuentes consultadas fueron OPEC, EIA, BP y BNEF.

³ Tanto el sodio como el magnesio son metales abundantes con altas densidades de energía que ofrecen competitividad de costos sin sacrificar rendimiento operacional. El Mg tiene el beneficio adicional de tener dos electrones involucrados en sus reacciones redox, lo que duplica su capacidad de energía. Sin embargo, ninguno se produce con fines industriales: mientras que las baterías Na-ion son particularmente sensibles al aire y las baterías Mg tienen problemas con la estabilidad del electrolito, el principal problema de ambos es encontrar materiales duraderos para ciclos prolongados y las velocidades necesarias para las aplicaciones del vehículo.

⁴ Tres plantas de almacenamiento masivo de baterías, construidas por Tesla, AES Corp. y Altagas Ltd., están oficialmente en funcionamiento en el sur de California a partir de 2017. En conjunto, representan el 15 por ciento del almacenamiento de la batería instalado en todo el planeta en 2016.

⁵ Las estaciones de carga se clasifican según su potencia de carga, lo que afecta directamente al tiempo de carga de EV. "Los niveles I y II son adecuados para el hogar, ... [aunque] el poder de carga del nivel II puede ser 5 veces mayor que el Nivel I" (Young et al., 2013).

El nivel III es para carga rápida y puede cargar un EV con un rango de 300 km en una hora. Su potencia de carga puede superar los 100 kW, y como tal requiere un cargador externo. El nivel III no es adecuado para uso doméstico.

⁶ A pesar de un aumento continuo en el stock global de vehículos eléctricos, las tasas de crecimiento anual han disminuido consistentemente desde 2011. En 2016, el crecimiento de las acciones fue del 59%, por debajo del 76% en 2015 y 84% en 2014.

⁷ Se puede observar en la tabla 7 que en el segmento de autos pequeños se usan baterías pequeñas con un contenido energético promedio de 18.2 kWh y un alcance de 150 km.

Las baterías pequeñas se utilizan para los automóviles urbanos por dos razones: implementar una batería más grande aumentaría significativamente el costo total, y el espacio en un automóvil urbano a menudo limita el volumen de la batería.

Las baterías más grandes se utilizan en el segmento de autos medianos a grandes, con un promedio de energía de la batería de 36.2 kWh y un rango promedio mayor de 231 km. Sin embargo, el promedio para este segmento puede ser engañoso debido a las grandes baterías de Tesla. La mediana da una mejor representación del mercado actual, con un contenido energético de 24.2 kWh y un alcance de 190 km.

⁸ Se estima que el tren motriz de un BEV tiene alrededor de 200 componentes, mientras que un ICE tiene 1,400 componentes (Erich y Witteveen, 2017).

⁹ Aunque se desconocen las cantidades exactas por fabricante, se estima que una batería Tesla de 70kWh contiene 63kg de litio y 54kg de grafito. Esto sigue siendo solo una parte del total, ya que el peso del paquete de baterías es de alrededor de 450 kg. (Erich y Witteveen, 2017).

¹⁰ Las estimaciones de costos y la densidad volumétrica de energía del Departamento de Energía de EE. UU. se basan en un paquete de baterías diseñado para entregar 320 km de alcance eléctrico, lo suficientemente adecuado para un BEV. Los costos deben interpretarse como proyecciones de la producción de alto volumen de tecnologías que se están investigando actualmente.

¹¹ La minería artesanal es legal en el Congo pero está mal regulada. En 2014, el gobierno estimó que unas 14,000 toneladas de sus exportaciones de cobalto, o 20 por ciento de las exportaciones totales, provenían de minas informales que según Amnistía Internacional pueden funcionar a partir del trabajo infantil.

¹² Puntos de carga rápida actualmente tienen un nivel de potencia de 100 kW o más, y los puntos de carga inductiva podrían cargarse a niveles de potencia de 200 kW, en comparación con la carga de nivel 1 (~ 2 kW) y nivel 2 (~ 6 a 8 kW).

Bibliografía

- 1) Kallstrom, H. (2015). *Why growth shifted in the global automotive industry - Market Realist*. (pp. 1-30) .<http://marketrealist.com/2015/02/shift-growth-global-automotive-industry/>
- 2) B. Lee, T. (2017). *Tesla's real problem isn't that its cars are expensive. It's that they're unreliable*. <https://www.vox.com/2016/6/9/11880450/tesla-doomed>
- 3) Sedgwick, D. (2013). Global Industry craves mega suppliers. *Automotive News*, June 2013 Issue.
- 4) Dediu, H. (2015). *The Entrant's Guide to the Automobile Industry*. Asymco. <http://www.asymco.com/2015/02/23/the-entrants-guide-to-the-automobile-industry/>
- 5) Marshall, A., Davies, A., y Stewart, J. (2017). "Volvo's Electric Car Plan Isn't as Bold or Crazy as It Seems". WIRED. Retrieved 5 September 2017, from <https://www.wired.com/story/volvos-electric-car-plan/>
- 6) *Electric cars are set to arrive far more speedily than anticipated*. (2017). The Economist.<https://www.economist.com/news/business/21717070-carmakers-face-short-term-pain-and-long-term-gain-electric-cars-are-set-arrive-far-more>
- 7) Mayersohn, N. (2017). *The Internal Combustion Engine Is Not Dead Yet*. TheNewYorkTimes.com.https://www.nytimes.com/2017/08/17/automobiles/wheels/internal/combustion/engine.html?rref=collection/timestopic/ElectricandHybridVehicles&action=click&contentCollection=timestopics®ion=stream&module=stream_unit&version=latest&
- 8) Schmitt, B. (2017). *The Internal Combustion Engine Will Survive Us All*. <https://www.forbes.com/sites/bertelschmitt/2017/07/20/the-internal-combustion-engine-will-survive-us-all/#508531a73a3d>
- 9) *Moody's: Auto sector faces rising credit risks due to carbon transition*. (2017). Moodys.com. Retrieved 2 September 2017, from

https://www.moody's.com/research/Moodys-Auto-sector-faces-rising-credit-risks-due-to-carbon--PR_354984

- 10) Plumer, B. (2017). *¿Qué es el Acuerdo de París?*. *New York Times*. Retrieved 3 October 2017, from <https://www.nytimes.com/es/2017/06/01/que-es-el-acuerdo-de-paris/?mcubz=3>
- 11) Ewing, J. (2017). *France Plans to End Sales of Gas and Diesel Cars by 2040*. *The New York Times*. Retrieved from <https://www.nytimes.com/2017/07/06/business/energy-environment/france-cars-ban-gas-diesel.html>
- 12) Vaughan, A. (2017). *Electric cars accelerate past 2m mark globally*. *The Guardian*. Retrieved 10 October 2017, from <https://www.theguardian.com/environment/2017/jun/07/electric-cars-sales-2-million-worldwide-global-sales>
- 13) *Automotrices instalarán red de 400 electrolinerías en Europa*. (2017). *Manufactura.mx*. Accesada el 5 de noviembre 2017, desde <http://www.manufactura.mx/automotriz/2017/11/03/automotrices-instalaran-red-de-400-electrolineras-en-europa?hootPostID=f4b21a1a7e3cfbc7607ab2003900652d>
- 14) Seymour, T. (2017). *Discovery of new cobalt mines is needed to maintain EVs' impetus*. *Fleetnews*. Retrieved 5 November 2017, from <https://www.fleetnews.co.uk/news/fleet-industry-news/2017/10/31/discovery-of-new-cobalt-mines-is-needed-to-maintain-evs-impetus>
- 15) Hernández, M. (2017). *Cobalto, el elemento que podría poner en riesgo los planes de futuro de Tesla*. *El Mundo*. Retrieved 5 November 2017, from <http://www.elmundo.es/economia/macroeconomia/2017/11/03/59f775c7468aeb0c578b460f.html>
- 16) Wilson, T. (2017). *We'll All Be Relying on Congo to Power Our Electric Cars*. *Bloomberg.com*. Retrieved 5 November 2017, from <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-10-26/battery-boom-relies-on-one-african-nation-avoiding-chaos-of-past>

- 17) *Electrifying everything*. (2017). *Economist.com*. Retrieved 5 November 2017, from <https://www.economist.com/news/briefing/21726069-no-need-subsidies-higher-volumes-and-better-chemistry-are-causing-costs-plummet-after>
- 18) Randall, T. (Enero 30, 2017). *Tesla's Battery Revolution Just Reached Critical-Mass*. *Bloomberg.com*.
<https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-01-30/tesla-s-battery-revolution-just-reached-critical-mass>
- 19) Randall, T. (2017). *Tesla Unveils the World's Fastest Production Car: 0 to 60 in 2.5 Seconds*. *Bloomberg.com*.
<https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-08-23/tesla-releases-world-s-fastest-production-car-0-to-60-in-2-5-seconds>
- 20) Berckmans, G., Messagie, M., Smekens, J., Omar, N., Vanhaverbeke, L., y Van Mierlo, J. (2017). Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030. *Energies*, 10 (9), 1-20.
- 21) Berg, H., Matic, A., y Johansson, P. (2017). *Emerging Battery Technologies Towards 2025* (pp. 1 - 45). Swedish Hybrid Vehicle Center.
- 22) Dinger, A., Martin, R., Mosquet, X., Rabl, M., Rizoulis, D., Russo, M., y Sticher, G. (2010). *Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020* (pp. 2-18). Boston Consulting Group.
- 23) Yu, C., Ganapathy, S., Eck, E., Wang, H., Basak, S., Li, Z., y Wagemaker, M. (2017). Accessing the bottleneck in all-solid state batteries, lithium-ion transport over the solid-electrolyte-electrode interface. *Nature Communications*, 8(1). <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-017-01187-y>
- 24) Young, K., Wang, C., Wang, L., y Strunz, K. (2013). *Electric Vehicle Integration Into Modern Power Networks* (pp. 15-37). New York: Springer Science & Business Media.
- 25) Schmitt, B. (2017). *Ultra-Charging Solid-State EV Batteries Around the Corner, Toyota Confirms*. *Forbes.com*. Retrieved 5 November 2017, from <https://www.forbes.com/sites/bertelschmitt/2017/07/25/ultrafast-charging-solid-state-ev-batteries-around-the-corner-toyota-confirms/#2583818744bb>

- 26) DiStasio, C. (2016). *Researchers accidentally discover a way to make batteries last basically forever*. *Inhabitat.com*. Retrieved 5 November 2017, from <https://inhabitat.com/gold-nanowires-helped-researchers-design-a-battery-that-basically-lasts-forever/>
- 27) *Graphene-nanotube hybrid boosts lithium metal batteries*. (2017). *Phys.org*. Retrieved 5 November 2017, from <https://phys.org/news/2017-05-graphene-nanotube-hybrid-boosts-lithium-metal.html#nRlv>
- 28) Shankleman, J. (2017). *The Electric Car Revolution Is Accelerating*. *Bloomberg.com*. Retrieved 5 November 2017, from <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-07-06/the-electric-car-revolution-is-accelerating>
- 29) Goldman, J. (2014). *Comparing Electric Vehicles: Hybrid vs. BEV vs. PHEV vs. FCEV*. Union of Concerned Scientists. Retrieved 20 October 2017, from <http://blog.ucsusa.org/josh-goldman/comparing-electric-vehicles-hybrid-vs-bev-vs-phev-vs-fcev-411>
- 30) Erich, M., y Witteveen, J. (2017). *Breakthrough of electric vehicle threatens European car industry* (pp. 2-19). ING Economics Department.
- 31) Randall, T. (2017). *Here's How Electric Cars Will Cause the Next Oil Crisis*. *Bloomberg.com*. Retrieved 25 February 2016, from <https://www.bloomberg.com/features/2016-ev-oil-crisis/>
- 32) Coren, M. (2017). *Tesla's biggest competition for the Model 3 will not come from other electric vehicles*. *Quartz*. Retrieved 19 October 2017, from <https://qz.com/1040213/teslas-biggest-competition-for-the-model-3-will-not-come-from-other-electric-vehicles/>
- 33) DeBord, M. (2017). *The Model 3 could be the worst thing that ever happened to Tesla*. *Business Insider*. Retrieved 18 October 2017, from <http://www.businessinsider.com/tesla-model-3-could-be-a-mistake-2017-2>
- 34) DeBord, M. (2017). *Tesla is taking a long time to ramp up production for the Model 3 – here's why*. *Business Insider*. Retrieved 19 October 2017, from <http://www.businessinsider.com/tesla-model-3-production-slow-ramp-2017-9>

- 35) Gross, D. (2017). *Tesla's Real Innovation Isn't the Electric Car*. *Slate Magazine*. Retrieved 18 October 2017, from http://www.slate.com/articles/business/the_juice/2016/04/tesla_s_real_innovation_is_its_business_practices_not_
- 36) On a Charge - Tesla's Mass-Market Ambitions. (2017). Retrieved 19 October 2017, from <https://www.economist.com/news/business/21695012-tesla-becomes-more-regular-carmaker-it-faces-bumpier-ride-charge>
- 37) Naughton, K., Webb, A., y Bergen, M. (2016). *Silicon Valley Just Realized How Hard It Is to Make a Car*. *Bloomberg.com*. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-10-25/bill-ford-to-silicon-valley-the-future-of-cars-is-in-detroit>
- 38) Williams, B. (2017). *Here's how every major automaker plans to go electric*. *Mashable*. <http://mashable.com/2017/10/03/electric-car-development-plans-ford-gm/#05R29KAWgiq7>
- 39) Shankleman, J. (2017). *Big Oil Just Woke Up to Threat of Rising Electric Car-Demand*. *Bloomberg.com*. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-07-14/big-oil-just-woke-up-to-the-threat-of-rising-electric-car-demand>
- 40) Knupfer, S., Hensley, R., Hertzke, P., y Schaufuss, P. (2017). *Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability* (pp. 1-26). McKinsey&Company.
- 41) Electric Vehicles Initiative. (2017). *Global EV Outlook 2017: Two Million and Counting* (pp. 12-42). International Energy Agency
- 42) Kravitz, R y Zamorano, A. (2017). *Global EV Trends and Forecast* (pp. 1-20). Bloomberg New Energy Finance
- 43) Idaho National Laboratory.(2011). *How do Gasoline and Electric Vehicles Compare?* (pp. 1-2)
- 44) Weiss, J., Hledik, R., Hagerty, M., y Gorman, W. (2017). *Electrification: Emerging Opportunities for Utility Growth* (pp. 6-14). The Brattle Group.
- 45) Gao, P., Kaas, H., Mohr, D., y Wee, D. (2016). *Disruptive trends that will transform the auto industry* (pp. 6-11). McKinsey&Company.

- 46) Evans, B. (2017). *Ways to think about cars*. Benedict Evans. <https://www.ben-evans.com/benedictevans/2015/7/27/ways-to-think-about-cars>
- 47) Berkeley, J. (2017). *The death of the internal combustion engine*. *Economist.com*. <https://www.economist.com/news/leaders/21726071-it-had-good-run-end-sight-machine-changed-world-death>
- 48) Munoz, C. (2017). *An infrastructure for charging electric vehicles takes shape*. *Economist.com*. <https://www.economist.com/news/business/2172867-1-reliable-network-should-not-prove-insurmountable-roadblock-infrastructure-charging>
- 49) Hall, D., Moutak, M., y Lutsey, N. (2017). *Electric Vehicle Capitals of the World: Demonstrating the Path to Electric Drive* (pp. 26-31). The International Council of Clean Transportation.
- 50) Slowik, P., Pavlenko, N., y Lutsey, N. (2016). *Assessment of Next-Generation Electric Vehicle Technologies* (pp. 1-13). The International Council on Clean Transportation.
- 51) USDOE. (2017). *Cost and Price Metrics for Automotive Lithium-Ion Batteries* (pp. 1-4). U.S. Department of Energy.
- 52) Saha, A. (2011). *Mapping of Porter's value chain activities into business functional units*. *Management Innovation Exchange*. <http://www.managementexchange.com/hack/mapping-porter's-value-chain-activities-business-functional-units>
- 53) Jurevicius, O. (2013). *Strategic Management Insight: Value Chain Analysis*. <https://www.strategicmanagementinsight.com/tools/value-chain-analysis.html>
- 54) Wright, K. (2015). *External and Internal Environmental Analysis*. <https://www.linkedin.com/pulse/external-internal-environmental-analysis-kathy-wright/>
- 55) Lippert, J. (2017). *Why Electric Cars Are Everywhere Except Here, Now*. *Bloomberg.com*. Retrieved from <https://www.bloomberg.com>

/news/articles/2017-07-19/why-electric-cars-are-everywhere-except-here-now-quicktake-q-a

- 56) Warren, T. (2017). *China may lead the electric car revolution*. *The Verge*
<https://www.theverge.com/2017/4/23/15390554/china-may-lead-the-electric-car-revolution>
- 57) *Charging Is Our Priority*. (2017). *Tesla.com*.
<https://www.tesla.com/blog/charging-our-priority>