

## LA ERA DEL LITIO

*Asdrúbal Valencia Giraldo<sup>1</sup>*

1: Profesor Emérito, Universidad de Antioquia

### INTRODUCCIÓN

Ahora que las materias primas (petróleo, carbón, metales, etc.) están de capa caída en el mercado internacional, hay un elemento del cual se dice que en diez años decuplicará su demanda, se trata del litio. En un artículo anterior [1] se indicó el auge de las aleaciones aluminio-litio, una de las causas por las que aumentará el consumo de este metal, sin embargo la principal razón será el uso de las baterías de ion de litio en muchas aplicaciones, especialmente en los motores Tesla de los nuevos automóviles eléctricos. Por esta razón es conveniente hacer una revisión sobre el tema del litio, su extracción, sus propiedades, sus aplicaciones y su futuro.

### 1. EL LITIO

En la tabla periódica de los elementos, el litio encabeza el grupo IA, el de los metales alcalinos, constituido por litio (Li), sodio (Na), potasio (K), rubidio (Rb), cesio (Cs) y francio (Fr), los cuales se caracterizan por tener un sólo electrón en un orbital *s* más allá de la capa central electrónica, con tendencia a perderlo (debido a su poca afinidad electrónica y baja energía de ionización) y así formar un ion monopositivo  $M^+$ .

Los metales alcalinos presentan densidades muy bajas y son buenos conductores del calor y la electricidad; reaccionan de inmediato con el agua, el oxígeno y otras sustancias químicas, y nunca se les encuentra como elementos libres (no combinados) en la naturaleza. Los compuestos típicos de los metales alcalinos son solubles en agua y están presentes en el agua de mar y en depósitos salinos. Como estos metales reaccionan rápidamente con el oxígeno, se venden en recipientes al vacío y por lo general se almacenan bajo un aceite mineral como querosén.

El litio metálico, es de color blanco plateado y blando, como se muestra en la Figura 1. Es el metal más liviano que se conoce, densidad de  $0,531 \text{ g/cm}^3$  –flota en el agua– de número atómico 3 y peso atómico 6,941. Posee el mayor punto de fusión ( $186^\circ\text{C}$ ) y ebullición ( $1.336^\circ\text{C}$ ) del grupo de los metales alcalinos; posee además, el calor específico más alto de este grupo ( $0,784 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$  a  $0^\circ\text{C}$ ). En estado natural existen dos isótopos estables:  $^7\text{Li}$  en proporción de 92,4 % en peso y  $^6\text{Li}$  con 7,6 % [2].



*Figura 1. El Litio [3].*

El litio fue descubierto en 1817 por el químico sueco Johan August Arfwedson (1792-1841) quien lo individualizó con el nombre de litio (del griego λιθος, piedra), para indicar que dicho elemento proviene de un mineral. Arfwedson estudió en la Universidad de Upsala, donde se graduó en Leyes en 1809 y en mineralogía en 1812. En Estocolmo, conoció al químico Jöns Jakob Berzelius, quien le permitió el acceso a su laboratorio privado. Allí descubrió el litio en el año 1817, mientras analizaba una muestra de petalita.

La petalita o castorita es un feldespato con fórmula  $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$ . Además de este mineral, también son fuentes del litio la espodumena  $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ ; la lepidolita, una de las micas con fórmula genérica  $\text{K}(\text{Li},\text{Al})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$  y la ambligonita, un fosfato cuya fórmula es  $\text{LiAlPO}_4\text{F}$ .

En realidad el contenido de litio de la corteza terrestre ha sido estimado en 65 partes por millón. Aproximadamente 145 minerales existentes en ella contienen litio, pero sólo algunos lo poseen en cantidades comerciales. Además de los ya anotados se pueden mencionar la trifilita ( $\text{LiFe}^{2+}\text{PO}_4$ ), la zinwaldita [ $\text{KLiFe}^{2+}\text{Al}(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ ] y la eucryptita ( $\text{LiAlSiO}_4$ ).

El litio está disuelto en el agua de mar, que contiene aproximadamente 0,17 ppm, pero debido a que este metal tiende a fijarse en las arcillas que se depositan en los fondos marinos una de sus fuentes principales son las salmueras, como las que se encuentran en Chile, Bolivia y Argentina; por ejemplo, en el núcleo del Salar de Atacama, se encuentran las salmueras que contienen las más altas concentraciones de litio y potasio que se conocen, además de considerables concentraciones de sulfato y boro. A su vez los recursos de litio de Bolivia están en salmueras, que tienen una densidad aproximada a 1.200 gramos por litro (g/l), por lo que una concentración de litio de 0,1% en peso equivale a 1.000 partes por millón (ppm) y 1,2 g/l. Estas salmueras están en los salares y se debe decir que un salar es un lago superficial en cuyos sedimentos dominan las sales, que se precipitan por la fuerte evaporación, que a largo plazo siempre es mayor que la entrada de las aguas en la cuenca, como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2.** a) Salar de Uyuni en Bolivia; b) Salar de Atacama en Chile; c) El salar de Salta en Argentina [4–6].

Aunque el litio fue descubierto en 1817, debido a su analogía con dos de su grupo: sodio y potasio, apenas en 1818 Humphry Davy y William Thomas Brande consiguieron aislar el elemento mediante electrólisis del óxido de litio. Posteriormente, en 1855, Robert Bunsen y Augustus Matthiessen consiguieron obtener litio en grandes cantidades, mediante electrólisis del cloruro de litio, en un pequeño crisol de porcelana, usando un fino hilo de hierro como cátodo y una varilla de carbón como ánodo [7,8].

Ya en 1898 en Estados Unidos se inició la producción comercial de minerales de litio con el envío de 30 toneladas de espodumena proveniente de la mina ETTA de Dakota del Sur y en 1923, en Alemania, se inició la producción comercial de litio para la fabricación de lubricantes.

La obtención de las sales de litio a partir de minerales, como la espodumena, implica la extracción de la roca, su trituración y molienda. Se continúa con la calcinación, la lixiviación en presencia de ácido sulfúrico y la filtración para obtener salmuera de  $\text{Li}_2\text{SO}_4$ , la cual se hace reaccionar con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Por filtración se separan el  $\text{CaCO}_3$  y el  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  y luego se remueven las otras impurezas por intercambio iónico o precipitación, para obtener el  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  de grado técnico (es decir, que contiene mínimo 99%), que es la materia prima para las industrias del vidrio, las cerámicas y los esmaltes; también es material básico para fabricar otros productos de litio, como catalítico para esterificación, aditivo y fundente para electrodos de soldadura, aditivo en las fusiones electrolíticas de aluminio y aditivo para el cemento de fraguado rápido. Si se purifica más se obtiene el  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  grado batería (99%).

De otro lado, en el caso de la salmuera, se empieza con la evaporación, la filtración y remoción de impurezas y la concentración de  $\text{LiCl}$ , que por electrólisis produce el litio. Se comprende, entonces, que es mucho menos costoso procesar las salmueras que los minerales.

De todas maneras se puede señalar que los principales países productores de litio son Australia, Chile, Argentina, China, Zimbabwe, Portugal y Brasil.

En el año 2015 Australia produjo 13400 toneladas métricas de litio; allí está el proyecto Greenbushes, operado por empresas de China y Estados Unidos; esta es la reserva singular de litio más grande el mundo, y ha estado en operación por más de 25 años. Además de litio para las empresas asiáticas, Australia exporta espodumena a China.

Por ahora Chile es el segundo productor de litio, con 12.900 toneladas en el año 2015. Se dice que tiene las mayores reservas de litio del mundo, más de 7,5 millones de toneladas de este metal, es decir, cinco veces más que Australia. Estos depósitos están sobre todo en las salmueras del desierto de Atacama, más fáciles de explotar que las minas de Australia, debido a que la región es muy árida y facilita la evaporación de la sal.

En el año 2015 Argentina produjo 3.800 toneladas de litio y sobrepasó a China, ubicándose como tercer país productor. Es sabido que Bolivia, Argentina y Chile comparten el “triángulo del litio”, y Argentina se beneficia de las mismas condiciones geológicas que han creado los salares que han impulsado la producción de Chile, y su más importante fuente es el “Salar del Hombre Muerto”, ubicado en el sur de la Puna de Atacama sobre el límite septentrional y occidental de la provincia de Catamarca con la provincia de Salta. Un salar sólo puede existir si hay ríos que desembocan en él y con ello depositar allí los minerales. En el caso del Salar del Hombre Muerto, el principal afluente es el río Los Patos.

A su vez China produjo 2.300 toneladas de litio en 2015, y aunque es el mayor consumidor, todavía no tiene una gran industria extractora. La mayoría de este metal lo obtiene de las planicies de Chang Tan en el oeste del Tibet, donde el lago Drangyer Tsaka, tiene concentraciones de sales de litio hasta de 600 ppm, por eso se dice que las reservas de China son de unas 3.500.000 toneladas. Pero mientras tanto la mayoría del litio lo importa de Australia, donde han invertido en yacimientos.

La producción de Zimbabwe en 2015 fue de 900 toneladas. Las principales minas son las de Bikita y Kamative, el principal mineral de la primera es eucryptita y de la segunda, la petalita.

La producción total de Portugal en 2015 fue de 300 toneladas de litio, que se extrae del campo Gonçalo, de aplita-pegmatita, ubicado al norte del país.

Finalmente se debe señalar que Brasil produjo 160 toneladas de litio en 2015. Se sabe que hay depósitos de minerales litio al norte del país, incluyendo Minas Gerais y Ceará, pero no se sabe mucho más sobre las reservas de litio de Brasil.

En Estados Unidos existe el depósito de Silver Peak de 12,2 km de largo por 6,5 km de ancho con un promedio de cloruro de litio de 0,244% y se conocen reservas de 3.800.000 toneladas de litio. En ese país existen además otros depósitos de salmuera como Searles Lake en California, que en su parte central tiene 31 km<sup>2</sup> de superficie, constituido su mayor parte por cloruro de sodio y un espesor medio de 21 m, formado por mantos salinos casi horizontales. El contenido de litio oscila entre 0,006 y 0,0011% de litio y las reservas se han calculado en 42.000 toneladas [9–11].

Recientemente se ha descubierto un nuevo depósito en Afganistán y se dice que este país llegará a ser una de las principales fuentes de litio, aunque la situación presente no haga fácil su explotación.

En la Figura 3 se muestran las principales aplicaciones del litio en 2015, donde ya la aplicación en baterías de ión litio representa un 39% y se dice que, mientras los otros usos no aumentarán mucho, el de las baterías mencionadas será tal que en 10 años se necesitará 10 veces más litio que ahora.

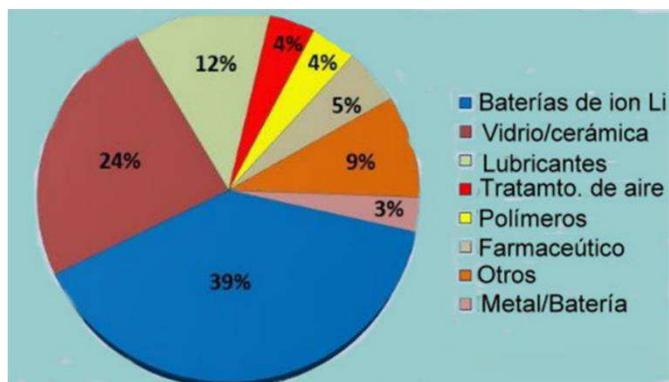


Figura 3. Uso del litio en 2015 [12].

El futuro de las aleaciones de litio [1], especialmente con aluminio ya se reseñó, por lo que ahora se hará una breve introducción al asunto de las baterías.

## 2. BATERÍAS DE LITIO

Las baterías son artilugios muy antiguos pues mucho antes de Volta, en el imperio de los Partos (247 a. C. – 224 d. C.) se produjo la llamada batería de Bagdad o pila de los Partos que, en realidad es el nombre dado a una colección de artefactos descubiertos en 1936 cerca de Bagdad. Estos son una jarra cerámica, un cilindro de cobre y una barra de hierro, que se cree constituían una batería basada en el par electroquímico del cobre y el hierro y se han propuesto varios jugos de frutos, fermentados como electrolitos, como se muestra en la Figura 4 [13–15].

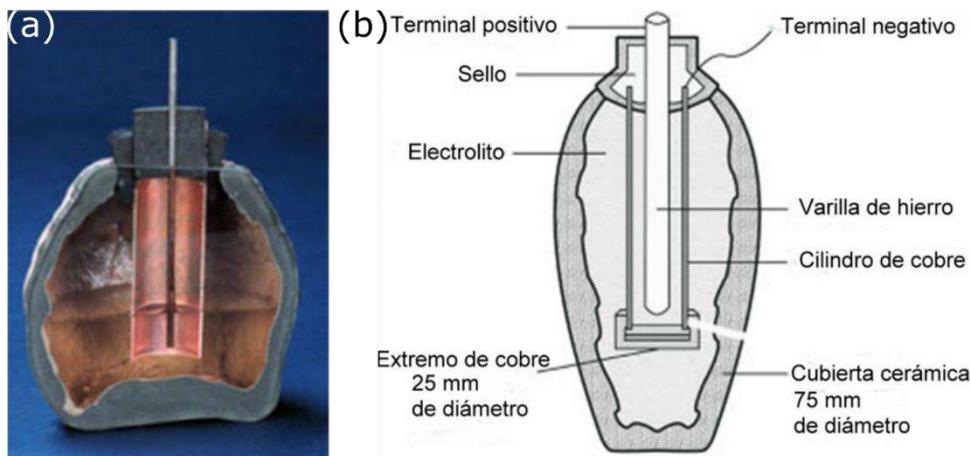


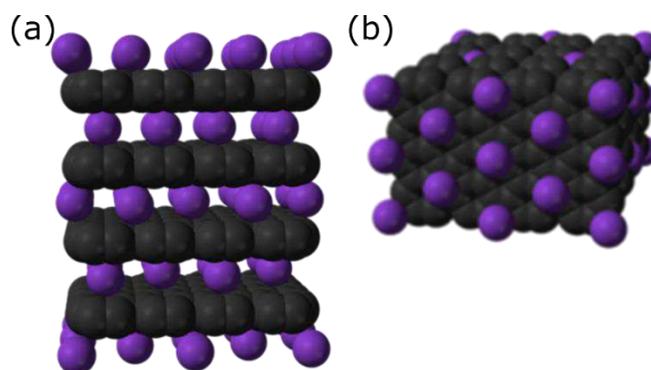
Figura 4. La pila de Bagdad a) Imagen b) Esquema [16].

Luego, a partir de la pila de Volta (1796) el desarrollo de las baterías ha sido continuo y uno de los últimos avances es la batería de ion de litio.

Las baterías de litio fueron idea de M. S. Whittingham, mientras trabajaba en la Exxon en el decenio de 1970, quien usó sulfuro de titanio y litio metálico como electrodos [17]. Sin embargo, esta batería recargable nunca llegó a la práctica porque el mencionado sulfuro es difícil de fabricar y era muy caro en esa época. Al mismo tiempo su reacción forma sulfuros de hidrógeno que huelen muy mal. Por estas y otras razones, la Exxon no avanzó

en el desarrollo de este tipo de pila [18]. Además, las baterías con electrodos de litio metálico presentaban problemas de seguridad porque este elemento es muy reactivo; arde en la atmósfera normal en la presencia de humedad y oxígeno. Fue por ello que la investigación se enfocó en buscar, en vez del litio metálico, compuestos que fueran capaces de liberar el ion litio.

Entre tanto J. O. Besenhard et al [19,20] descubrió la intercalación reversible en grafito y en óxidos catódicos. Los compuestos de intercalación en grafito son materiales compuestos, de fórmula  $CX_m$ , donde el ion  $X^{n+}$  o  $X^{n-}$  se intercala entre capas de carbono con carga opuesta, como se muestra en la Figura 5. En general  $m$  es mucho menor que 1. Besenhard propuso la aplicación de estas técnicas a las pilas de litio, pero la descomposición del electrolito y la co-intercalación del solvente fueron limitantes muy grandes para la vida de las baterías.



**Figura 5.** Compuesto de intercalación potasio grafito  $KC_8$ . a) Vista lateral b) Vista superior [21].

Por la misma época –en 1973– el ingeniero Adam Heller, de la Universidad de Texas, patentó la batería de cloruro de tionilo ( $SOCl_2$ ), que todavía se usa en implantes médicos y sistemas militares con vida superior a 20 años.

Ya en 1977, Samar Basu, que entonces estaba en la Universidad de Pennsylvania, trabajó en la intercalación electroquímica de litio en grafito [22,23]; este científico indio pasó luego a los laboratorios Bell donde se desarrolló un electrodo de grafito con litio intercalado ( $LC_6$ ), lo que proporcionó una alternativa para las baterías con electrodo de litio metálico [24,25]. En la actualidad Basu es profesor en el Colegio Bengalí de Ingeniería, en la India.

Posteriormente en 1979, un grupo de investigación de la Universidad de Stanford, liderado por Ned A. Godshall fabricó una celda recargable de litio con un voltaje de 4 V, usando óxido de cobalto litio ( $LiCoO_2$ ) como electrodo positivo y litio metálico como cátodo [26]. Al año siguiente el grupo de John Goodenough y Koichi Mizushima en la Universidad de Oxford presentó resultados similares [27]. Esto hizo posible la comercialización de las baterías de litio porque el  $LiCoO_2$  es un material estable que libera iones de litio, o sea que se puede usar con un material negativo diferente al litio metálico, lo cual abrió un amplio abanico de posibilidades. El mismo grupo de Godshall había encontrado una aplicación similar para los óxidos de litio-metal de transición, como las espinelas  $LiMn_2O_4$ ,  $Li_2MnO_3$ ,  $LiMnO_2$ ,  $LiFeO_2$ ,  $LiFe_5O_8$ , and  $LiFe_5O_4$  (y luego litio-cobre-óxido y litio-níquel-óxido, como cátodos) [26]. En 1982 obtuvieron una patente para esto. Estas celdas se siguen utilizando.

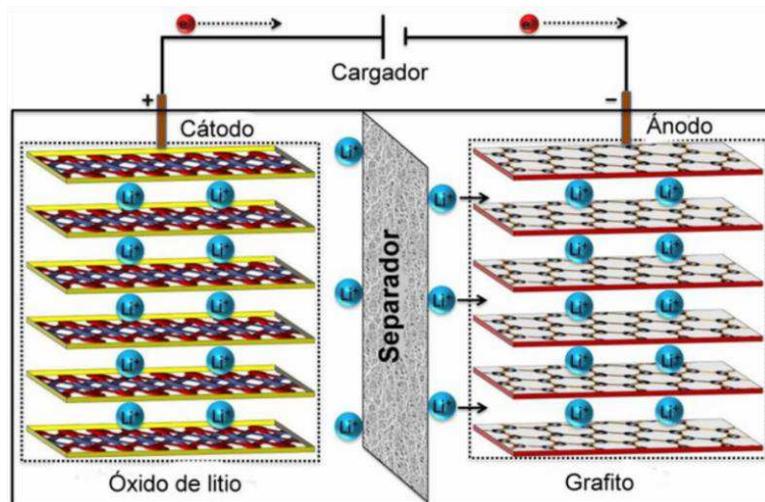
El francés Rachid Yazami, de origen marroquí, trabajando con el CNR en 1980, fue el primero en descubrir la intercalación reversible de litio en grafito en una celda electroquímica, usando un polímero como electrolito, que es el más usado todavía. Yazami también trabajó con otras formas de materiales grafíticos para cátodos, como el óxido de grafito y el fluoruro de grafito [28].

Durante 1985, en los laboratorios de la Kawasaki en el Japón, Akira Yoshino armó un prototipo de pila usando como electrodo un material carbonáceo dentro del cual se pueden insertar iones de litio y el otro electrodo hecho de óxido de litio cobalto ( $\text{LiCoO}_2$ ), los cuales son estables en el aire. Así con materiales sin litio metálico, se aumentó la seguridad y eso permitió la producción en gran escala [29].

Los ya mencionados John Goodenough y Arumugan Manthiram, trabajando en la Universidad de Texas, en 1989 mostraron que los electrodos positivos que contenían polianiones como los sulfatos producen voltajes más elevados que los óxidos, debido al efecto de inducción del polianión [30].

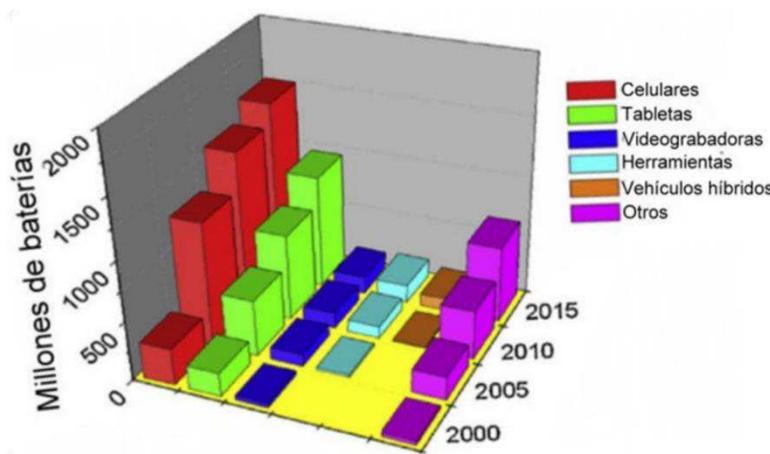
Lo cierto es que, desde que en 1991 las compañías Sony y Asahi Kasei comercializaron las primeras baterías de ion de litio. El desarrollo de éstas ha sido continuo y su mejoramiento es constante.

En resumen y de manera muy simple, en la Figura 6 se esquematiza una batería de ion de litio con ánodo de grafito y un cátodo de óxido de litio y cobalto. En la fase de descarga un átomo de litio, en el cátodo, se divide en un ion de litio y un electrón; el ion de litio migra a través de la estructura interna del material de la batería, se inserta en el cátodo –por ejemplo ( $\text{LiCoO}_2$ )–, en tanto que el electrón deja la batería y fluye por el circuito al que está unida la pila. Durante la fase de carga, los iones de Li se intercalan entre las capas individuales de grafeno (del grafito) para formar hexacarburo de litio ( $\text{LiC}_6$ ).



**Figura 6.** Esquema de una batería de ion de litio [31].

Los principales usos actuales de las baterías de ion litio se esquematizan en la Figura 7, donde se observa que su aplicación en los vehículos automotores todavía es, en cierto modo incipiente, pero las mejoras que se hacen y que se harán aumentarán enormemente esta demanda.



**Figura 7.** Evolución de la venta de baterías de ion de litio [32].

De todas maneras el desarrollo de las baterías de litio requiere cambios en las estructuras químicas y mejoras en la seguridad, la sostenibilidad ambiental y el contenido energético, todo lo cual sólo se puede lograr renovando por completo el concepto de batería de ion de litio, que hasta ahora se basa principalmente en la química de la inserción. Se debe tener en cuenta que los electrodos de inserción se basan en metales 3d sostenibles, como Ti ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ) o Fe ( $\text{LiFePO}_4$ ), que se obtienen partir de minerales que requieren energía para su extracción y fabricación, lo cual incide sobre la sostenibilidad a largo plazo [32–34].

### 3. EL MOTOR TESLA

Fundada en 1992, AC Propulsion, una pequeña compañía de Silicon Valley –creada por unos jóvenes ingenieros innovadores–, desarrolló la tecnología de un vehículo eléctrico y empezó a proporcionar productos y servicios de ingeniería automotriz a otros clientes en todo el mundo. En 1994, la empresa presentó el AC-150, un sistema impulsor muy innovador de 200 HP para carros de tamaño mediano, lo cual demostró que se podían lograr simultáneamente un alto desempeño y una elevada eficiencia en los vehículos eléctricos. Este sistema incorporaba un cargador integrado “reductor”, que proporcionaba una capacidad de carga de 18 kW con mínima adición de componentes. En 1997 AC Propulsion lanzó el auto T-Zero, en la feria de Los Ángeles, el cual proporcionaba de 0 a 100 kph en 4 segundos y tenía una autonomía de 300 kilómetros, con baterías de ácido. En 2003 el T-Zero se mejoró con la tecnología de las baterías de ion litio que daba de 0 a 100 kph en 3,6 segundos y con una autonomía de 500 km. En la Figura 8 se muestra el T-Zero [35].

Todo esto deslumbró al joven empresario Elon Musk, fundador de Pay Pal, quien decidió comprarles la idea para conectarla con las posibilidades reales de masificar esta movilidad alternativa. Así nació Tesla Motors, nombre que se deriva del motor que utilizaba este primer prototipo, el cual era de corriente alterna, tal como el que hizo el físico e ingeniero Tesla en 1882 [36].



*Figura 8. El T-Zero [37].*

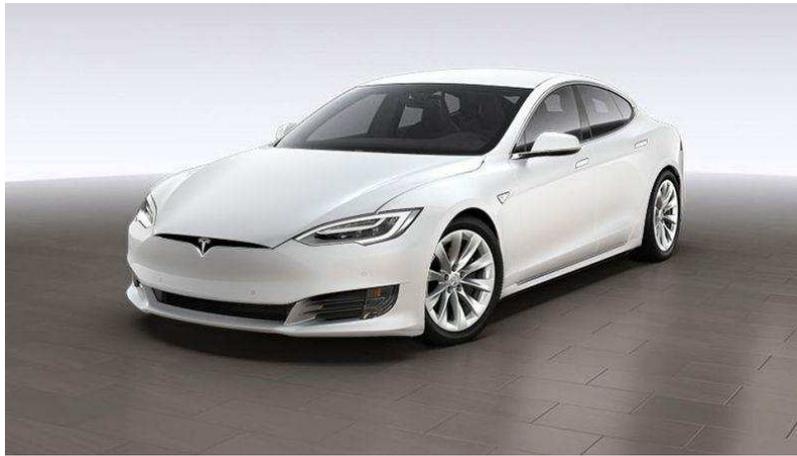
Tesla Motors saltó a la palestra con el Tesla Roadster, del cual se produjeron varios prototipos desde 2004 hasta 2007 y la producción en serie del vehículo se inició el 17 de marzo de 2007. Sin embargo, la primera producción del Roadster, el P1, (Figura 9), se entregó al presidente de Tesla Motors, Elon Musk el 1 de febrero de 2008. El motor de este auto se basa en una batería de ion de litio de 18 mm de diámetro y 65 mm de longitud. Son 6.831 celdas dispuestas en 11 módulos conectados en serie, cada módulo contiene 9 "ladrillos" conectados en serie y cada "ladrillo" contiene 69 celdas conectadas en paralelo (11S 9S 69P). El tiempo de carga completa es de 3 horas y media, la vida de la batería se estima en más de 160.000 km. La energía eléctrica es alrededor de 53 kW h. El peso total está entre 400 y 450 kg.



*Figura 9. El Tesla Roadster 2011 [38].*

En 2012, Tesla lanzó el Model S (Figura 10), el primer sedán eléctrico del mundo. El Model S, que se creó desde sus orígenes para que fuera 100 % eléctrico, ha redefinido el concepto de auto de cuatro puertas. Con un espacio para siete pasajeros y más de 1800 litros de almacenamiento, el Model S proporciona la comodidad y utilidad de un sedán familiar y logra la aceleración de un auto deportivo: de 0 a 100 km/h en aproximadamente 5 segundos. Su batería plana está integrada en el chasis y se encuentra justo bajo la cabina del ocupante, lo que brinda al automóvil un bajo centro de gravedad que permite un espectacular agarre y control mientras conduce los 435 km que dura la carga. El Model S

fue nombrado Auto del Año 2013 de Motor Trend y logró una calificación de seguridad de cinco estrellas de la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en Carreteras (NHTSA por sus siglas en inglés) de EE.UU.



*Figura 10. El Model S de Tesla Motors [39].*

A finales de 2014, Elon Musk dio a conocer dos configuraciones de tracción en las 4 ruedas con motor doble para el Model S que mejoran aún más el control y rendimiento del vehículo. El 85D cuenta con un motor de alta eficiencia en la parte frontal y trasera, lo que le da al auto un control de tracción incomparable en todas las condiciones. El P85D junta un motor frontal de alta eficiencia con un motor trasero de rendimiento para obtener la aceleración de un superauto, así se logran 0 a 100 km/h en 3,2 segundos.

Con más de 60.000 vehículos que recorren carreteras en todo el mundo, Tesla lanzó el Model X, una camioneta que ingresó a producción masiva en 2015 (Figura 11). Según la empresa el Model X es el vehículo deportivo utilitario (SUV) más seguro, rápido y poderoso de la historia. Con tracción en las cuatro ruedas y una batería de 90 kWh que brinda 470 kilómetros de autonomía. El Model X cuenta con amplios asientos para siete adultos con todo su equipo. Es sorprendentemente rápido, acelera de 0 a 100 kph en tan sólo 3,4 segundos.



*Figura 11. Model X de Tesla Motors [40].*

Respecto a la tecnología de estos carros, hay que anotar que una batería de ion de litio requiere 0.3 kg de metal Li o 1.5 kg de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  por kWh de potencia de la batería. Un auto híbrido promedio utiliza unos 5 kWh en baterías, esto es 1.5 kg de litio o 7 kg de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$

por auto. Pero un auto totalmente eléctrico requiere baterías de 90 kWh, esto es 3 kg de Litio o 13 kg de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  por auto.

Se debe anotar que el precio de las baterías de ion de litio va desde 300-800 US/kWh (comparada con 50-100 US\$/kWh para la tecnología de plomo ácido).

Se hace énfasis en que los dueños de autos Tesla gozan del beneficio de poder cargarlos en casa, por lo que nunca tienen que visitar una gasolinera ni gastar un centavo en gasolina. Para recorridos de grandes distancias, la red de estaciones Supercharger de Tesla ofrece un acceso conveniente y gratuito a carga de alta velocidad, donde pueden obtener la mitad de una carga en tan sólo 20 minutos. Las estaciones Supercharger ahora conectan rutas populares en Norteamérica, Europa y Asia Pacífico. Pero los carros son relativamente pocos, sobre todo por su costo.

Realmente –de acuerdo con los expertos– los carros Tesla son apenas el inicio de los vehículos eléctricos, que pueden ser menos contaminantes que los de combustible, dependiendo de cómo se produzca la electricidad, pues si esta proviene de termoeléctricas alimentadas con carbón, pueden ser más contaminantes que los vehículos con motor de combustión interna.

Además, los vehículos eléctricos tienen todavía la desventaja de que las baterías no dan una autonomía superior a 500 km, se demora mucho la carga en las conexiones hogareñas y por lo menos 1 hora en una estación de carga, las cuales todavía son relativamente pocas. Esto sin mencionar el costo, que actualmente es de unos US\$ 500 por kW-h.

Los vehículos eléctricos del futuro dependen de si se puede desarrollar una batería más económica, que tenga suficiente potencia para dar una autonomía superior a 800 km y que se pueda cargar en una hora o menos en el tomacorriente de la casa. Entonces los productores de carros empezarán a fabricarlos.

Una esperanza al respecto surgió en 2012 cuando Envia Systems, una empresa patrocinada por la General Motors y la Advanced Research Projects Agency for Energy (ARPA-E), anunció que había construido baterías que almacenaban el doble de energía que las existentes en los carros [41].

Envia Systems modificó la batería de ion de litio e introdujo dos materiales experimentales para los electrodos. para un electrodo fue un material desarrollado por el Argonne National Laboratory; para el otro electrodo se usó silicio, mezclado con carbono, como soporte. En los ensayos preliminares la batería funcionó, pero cuando la General Motors quiso utilizarla en grande escala el fallo fue estrepitoso.

Un mejor resultado se ha obtenido con la relación entre Panasonic y Tesla Motors. Desde 2008 el costo de las baterías de Tesla se ha reducido a la mitad y la capacidad de almacenamiento ha aumentado en un 60%. En este caso no se intentó cambiar radicalmente la composición química de las baterías de ion de litio; en vez de ello se mejoró el diseño y los procesos de manufactura. Tesla y Panasonic trabajaron juntas para retocar los materiales de la batería de acuerdo con las necesidades precisas de los carros.

Sin duda –como ya se anotó– hay todavía mucho que mejorar en las baterías de ion de litio, pero las mejoras con pequeños cambios no pueden continuar indefinidamente. En algún momento, se tendrán que hacer cambios radicales, como los propuestos por Envia Systems,

pero ya se sabe que tales cambios deben estar estrechamente integrados con la experiencia de la ingeniería y la manufactura [42].

Pero la búsqueda sigue; prueba de ello es que el millonario chino Jia Yueting ha montado su propia empresa de carros eléctricos, Faraday Future, que en abril de 2016 lanzó el LeSEE, un carro eléctrico autónomo [43] y Apple está planeando uno también para 2019. Y a través de su empresa Alphabet, Google desarrolla un carro autónomo (Figura 12). Es decir, todos están tratando de capturar el mercado de los vehículos eléctricos y los mejores ingenieros, pero están llegando al núcleo del asunto acá, que es el litio, el elemento clave que hará posible estas cosas, pues de todas maneras, por ahora las baterías de ion de litio son las que están siguiendo esos caminos de mejora y, por tanto, la demanda de litio sería mayor que la que se ha predicho Esto sin olvidar las crecientes aplicaciones en celulares, computadores, videograbadoras, herramientas y todos los usos de las baterías recargables.



**Figura 12.** a) El LeSEE de Faraday Future presentado en Beijing en abril de 2016 b) El prototipo de Google [44,45].

#### 4. CONCLUSIÓN

Parece que entramos a la era del litio y es posible que Colombia no tenga reservas suficientes; pero, como se ha indicado, hay una serie de líneas de trabajo que se podrían explorar con éxito en el inmediato futuro.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] Valencia, A., “Las aleaciones aluminio- litio”, *Revista Colombiana de Materiales*, no. 8, p. 1, 2016.
- [2] Chambers, C., Holliday, A., *Modern Inorganic Chemistry*, Butterworths, London, 1975.
- [3] QUÉ ES EL LITIO, [Online], Available: <http://www.pregunton.net/2013/05/que-es-el-litio.html>, [Accessed: 01-Sep-2016].
- [4] SALAR DE SALTA, [Online], Available: <http://www.globenotes.com/travel-photo/Argentina/Salta/62337/El-Salar/>, [Accessed: 01-Sep-2016].
- [5] SALAR DE ATACAMA, [Online], Available: <http://chile.travel/donde-ir/desierto-de-atacama/san-pedro-de-atacama/salar-de-atacama/>, [Accessed: 01-Sep-2016].
- [6] SALAR DE UYUNI, [Online], Available: <http://mefuialagoma.com/por-el-salar-de-uyuni/>, [Accessed: 01-Sep-2016].
- [7] Railsback, L., “An earth scientist’s periodic table of the elements and their ions”, *Geology*, vol. 31, no. 9, p. 737, 2003.
- [8] Emsley, J., *Nature’s Building Blocks: An A-Z Guide to the Elements*, Oxford University

Press, USA, 2001.

[9] Ebensperger, A., Maxwell, P., Moscoso, C., “The lithium industry: Its recent evolution and future prospects”, *Resource Policy*, vol. 30, no. 3, p. 218, 2005.

[10] McNulty, J. P., Khaykin, A., *Extracting the Details on the Lithium Market*, Credit Suisse-Equity Research, USA, 2009.

[11] Sankey, P., Clark, D. T., Micheloto, S., *The End of the Oil Age 2011 and Beyond: A Reality Check*, Deutsche Bank-Industrials Integrated Oil, USA, 2010.

[12] USO DEL LITIO EN 2015, [Online], Available: <http://epsteinresearch.com/2016/01/19/interview-of-mr-lithium-joe-lowry-is-the-lithium-sector-as-hot-as-the-hype/>, [Accessed: 01-Aug-2016].

[13] Jansen, W., Walter, J., “The battery of the parthians and the gilding of the bagdad goldsmiths”, *Chemie Für Labor Und Betrieb*, p. 528, 1987.

[14] Bockris, J. O. 'M., Reddy, A. K. N., “Some electrochemical systems of technological interest”, *Modern Electrochemistry*, vol. 2, p. 1265, 1970.

[15] Danila, E., Lucache, D. D., “Story of the first energy storage systems,” In: *3rd Intel. Sympos. Histor. Electr. Eng. And Tert. – Lev Eng. Ed*, Iasi, Romania, 27–29 Oct. 2010.

[16] Cámara, O. R., “Baterías,” In: *Energías Alternativas de Córdoba. Actualidad y Potencial*, CIECS- CONYCET-UNC, Córdoba, Facultad Ciencias Químicas-Universidad Nacional de Córdoba 2013.

[17] Whittingham, M. S., “Electrical energy storage and intercalation chemistry”, *Science*, vol. 192, no. 4244, p. 1126, 1976.

[18] Fletcher, S., *Bottled Lightning: Superbatteries, Electric Cars, and the New Lithium Economy*, Macmillan, USA, 2011.

[19] Besenhard, J. O., Fritz, H. P., “Cathodic reduction of graphite in organic solutions of alkali and  $\text{Nr}^{4+}$  salts”, *Electroanal. Chem.*, vol. 53, no. 2, p. 329, 1974.

[20] Besenhard, J. O., “The electrochemical preparation and properties of ionic alkali metal-and  $\text{Nr}^{4+}$ -graphite intercalation compounds in organic electrolytes”, *Carbon*, vol. 14, no. 2, p. 111, 1976.

[21] GRAFITO, [Online], Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Graphite\\_intercalation\\_compound](https://en.wikipedia.org/wiki/Graphite_intercalation_compound), [Accessed: 01-Sep-2016].

[22] Basu, S., “Chemistry and electrochemistry of lithium intercalated carbon,” In: *High Temperature Materials Symposium*, N. J. Pennington, , Electrochemical Society, 2002.

[23] Zanini, M., Basu, S., Fischer, J. E., “Alternate synthesis and reflectivity spectrum of stage 1 lithium—graphite intercalation compound”, *Carbon*, vol. 16, no. 3, p. 211, 1978.

[24] Basu, S., Al, E., “Synthesis and properties of lithium-graphite intercalation compounds”, *Materials Science and Engineering*, vol. 38, no. 3, p. 275, 1979.

[25] Basu, S., *Rechargeable Battery*, Bell Telephone Laboratories, USA, 1981.

[26] Godshall, N. A., “Lithium transport in ternary lithium-copper-oxygen cathode materials for reversible lithium batteries,” In: *Proceedings of the 5th International Conference on Solid State Ionics*, Part II, North Holland, Holland, 21 Aug. 1985.

[27] Mizushima, K., Jones, P. C., Wiseman, P. J., *et al.*, “ $\text{Li}_x\text{CoO}_2$  (0-x-1): A new cathode material for batteries of high energy density”, *Materials Research Bulletin*, vol. 15, no. 6, p. 783, 1980.

[28] Yazami, R., Touzain, P., “A reversible graphite-lithium negative electrode for electrochemical generators”, *Journal of Power Sources*, vol. 9, no. 3, p. 365, 1983.

[29] Yoshino, A., *Secondary Battery*, Ashahi Kasei, Priority Data, USA, 1986.

[30] Manthiram, A., Goodenough, J. B., “Lithium insertion into  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  frameworks”, *Journal of Power Sources*, vol. 26, no. 3, p. 403, 1989.

- [31] BATERÍA DE ION-LITIO, [Online], Available: <https://engineering.purdue.edu/ViPER/research.html>, [Accessed: 01-Aug-2016].
- [32] Scrosati, B., Jürgen, G., “Lithium batteries: Status, prospects and future”, *Journal of Power Sources*, vol. 195, p. 2419, 2010.
- [33] Scrosati, B., Hassounab, J., Yang-Kook, S., “Lithium-ion batteries. A look into the future”, *Energy and Environmental Science*, vol. 4, p. 3287, 2011.
- [34] Väyrynen, A., Justin, S., “Lithium ion battery production”, *J. Chem. Thermodynamics*, vol. 46, p. 80, 2012.
- [35] AC PROPULSION, [Online], Available: <http://www.acpropulsion.com/about.html>, [Accessed: 10-Oct-2016].
- [36] Clavero, D., TESLA MODEL 3: ASÍ ES EL ELÉCTRICO QUE LO CAMBIA TODO, [Online], Available: <http://motor.atresmedia.com/novedades/noticias/tesla-model-3-informacion/>, [Accessed: 01-Apr-2016].
- [37] T-ZERO, [Online], Available: <http://www.gohobby.com/miniaturas/miniaturas-de-coches/el-tzero-de-ac-propulsion-un-electrico-de-otra-epoca>, [Accessed: 01-Aug-2016].
- [38] TESLA ROADSTER, [Online], Available: [http://www.km77.com/00/tesla/roadster/2010/deportivo\\_electrico.asp](http://www.km77.com/00/tesla/roadster/2010/deportivo_electrico.asp), [Accessed: 01-Jul-2016].
- [39] MODEL S, [Online], Available: <http://jalopnik.com/tesla-model-s-refresh-this-is-it-1770482029>, [Accessed: 08-Aug-2016].
- [40] MODEL X, [Online], Available: <https://www.teslamotors.com/modelx>, [Accessed: 01-Aug-2016].
- [41] Bullis, K., A BIG JUMP IN BATTERY CAPACITY, [Online], Available: <https://www.technologyreview.com/s/427117/a-big-jump-in-battery-capacity/>, [Accessed: 01-Mar-2012].
- [42] Bullis, K., WHY WE DON'T HAVE BATTERY BREAKTHROUGHS, [Online], Available: <https://www.technologyreview.com/s/534866/why-we-dont-have-battery-breakthroughs/>, [Accessed: 10-Feb-2015].
- [43] Wang, Y., LEECO'S "SMART CAR" WANTS YOUR EYES OFF THE ROAD AND ON ITS VIDEOS, [Online], Available: <http://www.forbes.com/sites/ywang/2016/04/27/leecos-smart-car-wants-your-eyes-off-the-road-and-on-its-videos/#4d2f92fb3918>, [Accessed: 27-Apr-2016].
- [44] LESEE, [Online], Available: <http://www.forbes.com/sites/ywang/2016/04/27/leecos-smart-car-wants-your-eyes-off-the-road-and-on-its-videos/#4d2f92fb3918>, [Accessed: 15-Aug-2016].
- [45] PROTOTIPO DE GOOGLE, [Online], Available: <http://insideevs.com/google-reveals-electric-self-driving-car-video/>, [Accessed: 15-Aug-2016].