



UNIVERSIDAD NACIONAL
de MAR DEL PLATA

*Explotación del litio, producción y
comercialización de baterías de litio en Argentina*

Alejandro Manrique

**Trabajo Final Integrador de la carrera de postgrado
“Especialización en Gestión de la Tecnología y la Innovación”**

Diciembre 2014

Manrique, Alejandro

Explotación del litio, producción y comercialización de baterías de litio en Argentina. -
1a ed. - Mar del Plata : Universidad Nacional de Mar del Plata, 2014.

E-Book.

ISBN 978-987-544-641-0

1. Ingeniería. I. Título

CDD 620

Fecha de catalogación: 22/04/2015

El presente texto corresponde al Trabajo Final Integrador de la carrera de postgrado “Especialización en Gestión de la Tecnología y la Innovación”, dictada en 2012-2013 en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata en el marco del Programa de Formación de Gerentes y Vinculadores Tecnológicos (GTEC) implementado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica.

El trabajo fue supervisado por:

Director: Mg. Ing. Susana B. Jacob

Co-Director: Mg. Ing. Jorge D. Petrillo

El Jurado de la Comisión Evaluadora fue integrado por:

Esp. Lic. Ricardo de Elorza

Mg. Ing. Adolfo E. Onaine

INDICE

Introducción.....	4
-------------------	---

Parte 1

1.1 – Historia del litio.....	7
1.1.1 – El litio en la medicina.....	8
1.1.2 – Usos terapéuticos.....	9
1.1.3 – Intoxicación por litio.....	11
1.1.4 – Otros usos.....	12
1.2 – Características generales y propiedades del litio.....	13
1.2.1 – Usos industriales.....	15
1.2.2 – Efectos y riesgos sobre la salud.....	17
1.2.3 – Riesgos sobre el medioambiente.....	17
1.3 – Valor estratégico del litio.....	18
1.3.1 – Reservas.....	18
1.3.2 – Demanda mundial.....	22
1.3.3 – Uso en baterías.....	25
1.3.4 – Un pionero argentino.....	27
1.3.5 – Proyecto “Del salar a la batería”.....	29

Parte 2

2.0 – Explotación del litio.....	31
2.1 – Proceso de extracción.....	32
2.1.1 – Extracción de litio a partir de minerales.....	32
2.1.2 – Extracción de litio a partir de salmueras naturales.....	33
2.2 – Litio e impacto medioambiental.....	35
2.3 – La minería del litio.....	37
2.4 – Producción de litio en Argentina.....	38
2.5 – Áreas de explotación y distribución geográfica de yacimientos en Argentina.....	39

Parte 3

3.0 – Funcionamiento de las baterías de litio.....	45
3.1 – Conceptos de electroquímica.....	45
3.2 – Introducción de las baterías de litio.....	47
3.3 – Tipos de baterías de litio.....	48
3.4 – Tipos de construcción del empaquetado.....	51
3.5 – Funcionamiento de las celdas de litio.....	52
3.6 – Ciclado de las celdas.....	56
3.7 – Ventajas y desventajas de las baterías de litio.....	57

Parte 4

4.0 – Producción de baterías de litio.....	59
4.1 – Componentes y funcionamiento.....	60

4.2 – Proceso general de fabricación.....	62
4.2.1 – Diseño de la celda.....	62
4.2.2 – Fabricación de las celdas.....	63
4.2.3 – Preparación previa de los electrodos y sus contactos.....	64
4.3 – Fabricación de celdas cilíndricas.....	65
4.4 – Fabricación de celdas prismáticas.....	67
4.5 – Fabricación de celdas de polímero de ión-litio.....	68
4.6 – Proceso de formación.....	70

Parte 5

5.0 – La iniciativa argentina.....	71
5.1 – Estado, estructura productiva e infraestructura científico-tecnológica.....	71
5.2 – Hacia la producción de baterías de litio.....	75
5.3 – Factibilidad de fabricación de celdas de ión-litio.....	77
5.4 – Prototipos de baterías de litio para vehículos.....	79
5.5 – Otros desarrollos.....	81
5.6 – Planta experimental en Córdoba.....	84

Parte 6

6.0 – Cadena de valor y perspectivas.....	86
6.1 – Cadena de valor del sector minero.....	87
6.2 – Incidencia de costos.....	88
6.3 – Costo ambiental.....	95
Conclusiones.....	99
Bibliografía.....	105

Introducción

El agotamiento de los combustibles fósiles obliga a la búsqueda permanente de nuevas fuentes de energía. Las opciones más difundidas de energías renovables, en los casos de la eólica y la solar, no permiten la generación continua y están sujetas a condiciones meteorológicas, lo que demanda el almacenamiento de la energía.

En la actualidad, el sistema más eficiente de acumulación lo constituyen las baterías de litio. Elemento clave en la producción de baterías para el transporte del futuro, el litio adopta un valor estratégico y su industrialización requiere de una tecnología innovadora con una gran inversión para la producción y exportación.

El uso creciente del litio en la industria, ha originado que su valor como insumo haya incrementado su cotización. La Argentina se encuentra en una posición inmejorable, por la abundancia de este metal en las salinas del norte de nuestro país, que representan un 20% de la existencia mundial. La explotación actual lleva a exportarlo como carbonato de litio, sin la generación de mayor valor agregado.

Ante la demanda futura que se prevé de este producto, la producción local de baterías de litio, tanto para el abastecimiento del mercado interno como la exportación, se convierte en una gran oportunidad para el país.

Dado la gran magnitud de la inversión para el comienzo de la producción de baterías de litio en el país, en la etapa inicial se debe contar con la participación del Estado como impulsor de un proyecto efectivo. La eficaz interrelación entre el sector científico, la

comunidad empresarial y el Estado, será clave en alcanzar la producción y comercialización de baterías de litio.

Al desarrollo de plantas piloto para la producción de productos manufacturados a base de litio, deberán seguir las inversiones para una eficiente industrialización. Esto conlleva la introducción de la tecnología innovadora necesaria en las empresas que se vuelcan a la producción de baterías de litio.

En este trabajo, que no pretende ser un estudio exhaustivo, se abordará el tema del litio en su conjunto, desde su descubrimiento e historia, sus antecedentes como uso farmacéutico y en medicina, sus características específicas y el valor estratégico que ha alcanzado en la actualidad.

Se describirá el proceso de explotación y extracción del litio, con las zonas de yacimientos y su ubicación en el país.

Luego se describirá el funcionamiento y el proceso de producción de baterías, las aplicaciones y la tecnología necesaria para la producción de los distintos tipos de baterías. Esto último es de vital importancia en cuanto a la factibilidad técnica y económica, la disponibilidad de materiales en el mercado nacional y la existencia de equipos y maquinarias adecuadas.

En un apartado especial se incluyen algunos proyectos que tienen lugar en centros de investigación científica y tecnológica de nuestro país. Se detallan ciertos pasos que se

han dado en pos de la posible producción de baterías de litio con componentes íntegramente fabricados en forma local.

Por último, se resalta la capacidad de la cadena de producción minera y su potencial en el desarrollo económico regional, al igual que la necesidad de integración con el entramado productivo para generar un círculo virtuoso, que permita establecer una infraestructura de producción y comercialización de las baterías de litio que se podría proponer para el país.

Mar del Plata, Marzo de 2014

Parte 1

1.1 - Historia del litio

El litio fue descubierto en 1817 por Johan August Arfvedson (1792-1841), químico sueco, en el laboratorio privado de su profesor Berzelius, en Estocolmo. Es un metal liviano de color blanco plata que pertenece a los metales alcalinos y se oxida rápidamente en contacto con el aire o el agua.

La palabra litio proviene del griego “lithos” (pétreo), que significa piedra. En principio, se creyó que solamente estaba presente entre los minerales, a diferencia de los metales alcalinos potasio y sodio encontrados en las plantas.

Los compuestos del litio están difundidos en la naturaleza, aunque su proporción es escasa. Algunos de sus minerales más importantes son: la lepidolita o mica de litio, fluorosilicato hidratado; el espodumeno y la amblygonita, cuyo contenido en litio alcanza un 10% aproximadamente. El litio también se encuentra en cenizas de algunas plantas, principalmente en la caña de azúcar, la remolacha y el tabaco. Además, está presente en salmueras naturales.

Originalmente, Arfvedson llamó “nuevo litio” al elemento que halló en un cristal de petalita, mineral del grupo de los silicatos. Pero no tuvo éxito en aislarlo. Se debería esperar hasta 1818 cuando Humphry Davy y William Thomas Brande, en Inglaterra, lograron aislar el elemento por electrólisis del óxido de litio. En 1855, Robert Bunsen y

Augustus Matthiessen en Alemania lograron obtener litio en grandes cantidades por medio de la electrólisis del cloruro de litio.

A fines del siglo XIX en los Estados Unidos y a principios del XX en Alemania, comenzó la producción comercial del litio que tenía como destino la fabricación de lubricantes. La demanda fue baja y estable hasta la segunda Guerra Mundial, cuando se lo empezó a utilizar masivamente como lubricante en los motores de aviones de guerra y en maquinaria industrial.

1.1.1 – El litio en la medicina

Existen referencias de tratamientos con litio en los manuscritos de Sorano de Éfeso que datan del siglo II de nuestra era, en la antigua Grecia. (Montoya, 2013; Pέργola, 2001/2002; Garrabé, 2012)

El conocimiento del litio fue desarrollado en 1818, en una época en la que los médicos pugnaban por el reconocimiento de su profesión y pudieron explicar teorías con gran confiabilidad. Al tratamiento de la gota causada por el ácido úrico, suponiendo la posibilidad de disolución de piedras por parte del litio, se generaron expectativas de su uso para tratar la depresión y otras dolencias. (Moncrieff, 1997)

La historia del uso terapéutico del litio es uno de los temas más polémicos de la historia de la medicina y la psiquiatría. Los documentos que lo abordan se publicaron en Europa en muy diversos idiomas. (Garrabé, 2012)

El uso del litio en patologías maníaco depresivas ha resultado beneficioso y es por ello de gran utilización en psiquiatría. El litio se utilizó como tratamiento para diferentes enfermedades, hasta que se estableció como agente farmacológico para el trastorno bipolar.

1.1.2 – Usos terapéuticos

En 1876 se detectó la presencia de litio en la sangre y el funcionamiento en el organismo. Si bien no se conoce exactamente su función, se sabe que actúa en algunos procesos bioquímicos e interviene en el metabolismo de los hidratos de carbono en diferentes partes del cuerpo humano.

La primera etapa de uso del litio en medicina permitió su experimentación en la psiquiatría. En los siglos XIX y XX, el contexto social en que emergió fue más determinante en la adopción de los tratamientos que la evidencia científica demostrada fehacientemente. Hacia mediados del siglo XIX se introdujo su uso para el tratamiento de la gota y por muchos años se aplicó como método terapéutico para sanar las depresiones recurrentes.

A pesar de conocerse por mucho tiempo, la introducción del litio como herramienta terapéutica se debe al psiquiatra australiano John Cade, quien sugirió en 1948 que la sintomatología maníaca estaba provocada por un compuesto tóxico que se podía detectar en la orina de enfermos. Al realizar distintas pruebas en animales de experimentación, primero con urato de litio y luego con carbonato de litio, publicó en

1949 un ensayo en el “*Journal Medical of Australia*” sobre pacientes maníacos en el que demostró que las sales de litio reducían la agitación y movimiento en estos sujetos.

El descubrimiento de la acción anti-maníaca del litio fue, de esta forma, una combinación de carácter afortunado e inesperado, concepto denominado “serendipia” en la historia de la ciencia, tal vez típico de la psico-farmacología donde los hallazgos de psicofármacos no eran buscados directamente. (López-Muñoz et al, 2012)

Luego se utilizó en dosis pequeñas en tratamientos y en forma de agua mineral, pero la difusión que se hizo del litio como sustituto de la sal en la década de 1940 originó intoxicaciones que llevaron a la suspensión de su uso.

Por mucho tiempo el litio fue muy utilizado para tratar el insomnio, síndromes musculares asociados al estrés, migrañas, ansiedad, angustia, disminución de las facultades intelectuales, agitación, melancolía, fobias y obsesiones.

A partir de 1954, el psiquiatra danés Mogens Shou comenzó a establecer los niveles plasmáticos de litio, reconociendo sus efectos clínicos en la fase aguda del trastorno bipolar en su etapa maníaca y en la reducción de la frecuencia y gravedad de esa enfermedad mental. El trabajo perseverante de Shou, no exento de polémicas con sus colegas, permitió demostrar la efectividad del litio y determinar la manera más apta de utilizarlo. (Medrano, 2006)

Shou no sólo confirmó el descubrimiento de Cade sobre la acción curativa del litio en los ataques de manía, sino que el litio también tiene una acción preventiva en su manifestación. (Garrabé, 2012)

En 1970, Cade logró que se introdujera en la psiquiatría moderna. Rápidamente, su uso se generalizó en Australia, Europa y Estados Unidos, donde la FDA (Administración de Alimentos y Drogas, según su sigla en inglés) aprobó la utilización clínica del litio en los trastornos bipolares.

Actualmente, los psiquiatras prescriben el litio como un tratamiento fundamental tanto en la manía aguda como en la prevención de cuadros clínicos de trastorno bipolar y en casos que no mejoran con antidepresivos convencionales. La forma específica en que actúa el litio en la bioquímica del cerebro aún no se ha establecido con claridad.

1.1.3 – Intoxicación por litio

En el cuerpo humano se encuentra en concentraciones séricas de 10 a 20 nanogramos por litro (ng/l) y la función fisiológica del litio en el organismo no está bien determinada.

Los principales desencadenantes de una intoxicación con litio son la deshidratación (fiebre, diarrea, vómitos), las dietas de bajo contenido sódico y las interacciones con medicamentos. El cuadro clínico puede manifestarse con síntomas neurológicos (convulsiones, pérdida de conciencia, temblores), cardiológicos, gastrointestinales, hematológicos, oftalmológicos y renales.

Estudios de casos de envenenamiento por litio muestran que las intoxicaciones extremas se presentan durante los tres primeros años del tratamiento. (Montagnon, 2002)

1.1.4 – Otros usos

El litio también ha sido utilizado con éxito en casos de tratamientos de la tiroides. El litio actúa como droga adyuvante en el hipertiroidismo y la normalización de la concentración de las hormonas tiroideas, siempre que se use dentro de rangos normales y no se llegue a la toxicidad. (Ilera et al, 2004).

Asimismo, se demostró la efectividad del carbonato de litio en el tratamiento de pacientes con hipertiroidismo y como complemento de los medicamentos anti-tiroideos usados. (Conejos et al, 2006)

Se han encontrado casos de hipotiroidismo asociado al tratamiento de enfermedad maníaco depresiva con litio, dado su influencia en la fisiología tiroidea. Su frecuencia crece con la edad y en mujeres. (Calé y Lutfi, 2009)

Otra de las consecuencias del litio como fármaco son las alteraciones dermatológicas, entre ellas la psoriasis, cuando se aumenta la dosis de los tratamientos terapéuticos. Los pacientes que se tratan con litio deben tener una estricta vigilancia a nivel dermatológico, especialmente en los que presentaron antecedentes de psoriasis, y en casos de lesiones significativas se les debe retirar el tratamiento. (Herrero Ambrosio, 1997)

1.2 – Características generales y propiedades del litio

El litio es un metal alcalino que se halla difundido mayoritariamente en forma de fosfatos y silicatos, debido a su enriquecimiento durante la sedimentación.

Es el tercer elemento de la tabla periódica, luego del hidrógeno y el helio, su símbolo químico es Li y es el elemento sólido más ligero que existe en el mundo.

Se encuentra en minerales como la lepidolita (mica), la espodumena (silicato de aluminio y litio) y la petalita. También se presenta en el agua de mar, en aguas minerales, en tierras arables y en cenizas de plantas. El contenido de litio en los suelos es variable, alcanzando unas 200 partes por millón.

Es el metal más ligero de todos, con una densidad de casi la mitad de la del agua, donde puede flotar y hasta reacciona para formar gas de hidrógeno y vapores de hidróxido de litio.

Es de color plateado, al igual que los metales alcalinos sodio y potasio, en la naturaleza no se produce en forma libre y se lo encuentra en los compuestos de rocas y fuentes manantiales de aguas naturales. La cantidad de este metal en aguas naturales es variable y depende de los terrenos por donde fluye.

Es muy corrosivo y se debe manipular con mucho cuidado. Tiene el calor específico más elevado de todos los elementos sólidos, por lo que es ideal para las transferencias de calor. Su alto potencial electroquímico lo hace especialmente adecuado en las

baterías, la cerámica y el vidrio. A su alta conductividad térmica se agrega su baja viscosidad. No es soluble en los hidrocarburos.

A título ilustrativo e informativo, a continuación se detallan algunas características, propiedades físicas y químicas del litio.

Nombre: Litio

Símbolo: Li

Clasificación: Metal

Estado: Sólido

Número atómico: 3

Masa atómica (uma): 6,941

Período: 2

Grupo: IA (alcalino)

Bloque: s

Valencias: +1

Configuración electrónica: [He] 2s¹

Radio atómico (Å): 1,55

Radio iónico (Å): 0,6 (+1)

Radio covalente (Å): 1,34

Energía de ionización (kJ/mol): 519

Electronegatividad: 1

Afinidad electrónica (kJ/mol): 60

Densidad (g/cm³): 0,53

Color: Blanco-plateado

Punto de fusión (°C): 181

Punto de ebullición (°C): 1340

Volumen atómico (cm³/mol): 13

Isótopos naturales:

Li-6 (Abundancia natural 7,59%, estable)

Li-7 (Abundancia natural 92,41%, estable)

(Tomado de Jefferson Lab, US Department of Energy, www.jlab.org)

1.2.1 – Usos industriales

En la industria se lo usa en componentes de equipos de aire acondicionado y como lubricante para sistemas con altas temperaturas. La principal utilización es en forma de estearato de litio como espesante para grasas lubricantes. Otras aplicaciones de los compuestos de litio se encuentran en la cerámica, como aditivo en los acumuladores alcalinos y en soldadura para latón.

El Li-6 se utiliza en la obtención de tritio, isótopo radiactivo del hidrógeno, usado en aplicaciones nucleares.

El cloruro de litio es muy higroscópico y se usa en los sistemas de aire acondicionado, ya que puede absorber humedad. Tanto el bromuro como el cloruro de litio forman

salmueras concentradas con la propiedad de absorber humedad en un gran rango de temperaturas.

Dado que el litio es uno de los pocos elementos que reaccionan con el nitrógeno, se lo emplea para separar el nitrógeno de las mezclas de gases.

Se utiliza como aditivo para prolongar el rendimiento y vida útil en acumuladores alcalinos.

El litio se combina con otros metales (aluminio, cobre, manganeso) para la fabricación de piezas de aviación.

El estereato de litio se usa como espesante de grasas lubricantes en las aplicaciones de alta temperatura.

El hidróxido de litio se usa en la fabricación de jabones de litio, que a su vez se utilizan en la producción de grasas lubricantes.

El hidruro de litio se aplica en combustibles para los cohetes.

El carbonato de litio, en bajas dosis, se usa –como ya se mencionó anteriormente- en los tratamientos antidepresivos en medicina.

El hidróxido de litio y el peróxido de litio se usan para la purificación del aire en submarinos y naves espaciales.

El litio se usa para fabricar baterías recargables y descartables, tema central de este trabajo.

1.2.2 – Efectos y riesgos sobre la salud

El cuerpo humano no absorbe con facilidad el litio y la mayor parte se excreta. Si bien no es un elemento esencial, influye en el metabolismo. El consumo puede resultar tóxico y con concentraciones de 10 mg/L en sangre comienzan los síntomas de envenenamiento parcial, mientras que con 18 mg/L aparece riesgo de muerte.

Su inhalación torna dificultosa la respiración, con falta de aire, dolor de garganta y tos, llegando al extremo de edema pulmonar. Puede causar ampollas, dolor y quemaduras cutáneas sobre la piel. En los ojos genera enrojecimiento y quemaduras. Su ingestión causa calambres, debilidad, dolor abdominal, náuseas y vómitos. (INSHT, 1994)

1.2.3 – Riesgos sobre el medioambiente

El litio no representa un peligro para la fauna y flora, pero en exceso puede resultar tóxico. Las plantas lo absorben con facilidad, lo que indica su concentración en el suelo.

El calentamiento del litio puede ocasionar combustión violenta o explosión. Al calentarse, se generan gases irritantes y vapores altamente tóxicos. Al dispersarlo en partículas, puede arder espontáneamente en contacto con el aire. Reacciona

intensamente con ácidos, hidrocarburos y oxidantes, con posibles incendios y explosiones.

El hidróxido de litio es sumamente corrosivo, por lo que se advierte sobre su alto riesgo ante su exposición en los lugares de trabajo. (Departamento de Salud de New Jersey, 1999)

En cuanto a los efectos de la extracción y explotación de litio sobre el ambiente, se detallará en el apartado correspondiente.

1.3 – Valor estratégico del litio

1.3.1 – Reservas

De acuerdo con el USGS (*US Geological Survey*, Oficina de Estudios Geológicos de Estados Unidos), en el año 2008/9 las reservas de litio llegaban a 11 millones de toneladas. No están definidas la cantidad de litio disponible para el mercado y la producción, además de los depósitos que momentáneamente no tienen viabilidad económica y que llegarían hasta unas 30 millones de toneladas.

La distribución mundial (Fig.1) de las reservas (proveniente de minerales y salinas) de litio es la siguiente: (Fuente: Ministerio de Minería, Gobierno de Chile, 2012)

Argentina, Bolivia y Chile	64%
Australia	4%
Estados Unidos	7%
China	19%
Otros países	6%

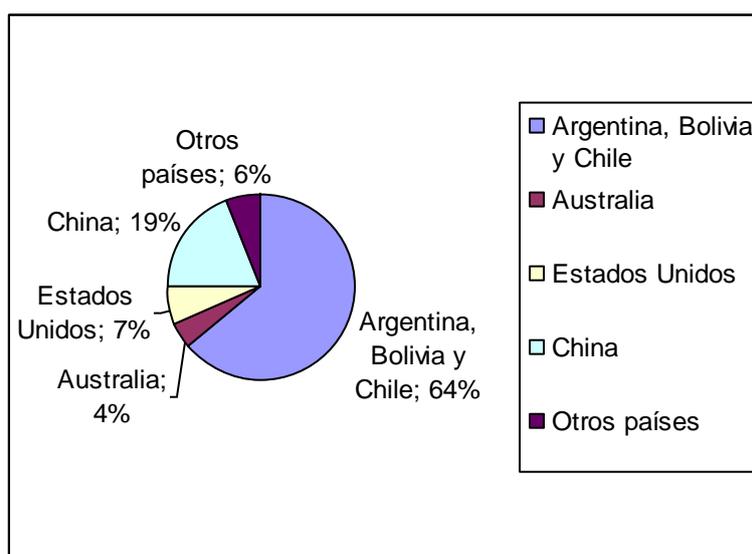


Fig. 1 – Distribución mundial de las reservas de litio (Elaboración propia en base a datos de Ministerio de Minería, Gobierno de Chile, 2012)

La producción mundial de litio se incrementó en 2011 y el volumen de ventas de los dos mayores productores de Australia y Chile creció un 20% en ese año. La producción de litio en China se estima que creció un 30% desde 2010. Muchos productores de litio, tanto de minerales como de salmueras, incrementaron sus potencialidades en 2011 y muchas compañías continuaron o iniciaron proyectos vinculados al litio en todo el mundo. La producción de litio proveniente de salmueras se convirtió en la más difundida para la obtención de carbonato de litio dado su bajo costo de producción, comparado con los costos de procesamiento y minería en yacimientos de rocas. El mercado mundial está liderado por Chile. La creciente demanda en China, por parte de

sus compañías químicas, llevó a duplicar la capacidad de producción de las mineras australianas. (USGS Mineral Commodity Summaries, 2012)

Se eligen principalmente las salmueras como forma de explotación porque existen diferencias significativas en los costos: llegan a los 2.300 dólares por tonelada, mientras que la extracción de minerales trepa hasta los 4.500 dólares por tonelada. (Bustamante et al, 2012)

Los recursos de litio identificados en los Estados Unidos alcanzan las 4 millones de toneladas. Aproximadamente unos 30 millones de toneladas estarían en otros países: Bolivia con 9 millones de toneladas; Chile con 7,5 millones de toneladas; Argentina con 2,6 millones de toneladas; Australia con 1,8 millones de toneladas y China con 5,4 millones de toneladas. Brasil, Congo y Serbia tendrían 1 millón de toneladas cada uno. (USGS Mineral Commodity Summaries, 2012)

Argentina es el segundo productor mundial de litio y comparte con Bolivia y Chile el 75% de las reservas de litio en salmueras y más de 50% de las reservas totales a nivel mundial, en un área de la zona andina que se ha dado en llamar “el triángulo del litio”, compuesto por el salar de Uyuni en Bolivia, el de Atacama en Chile y los de la Puna argentina en parte de las provincias de Jujuy, Salta y el norte de Catamarca. Además de la gran oportunidad comercial que se genera para esta región latinoamericana (Fig. 2), se debe considerar el valor agregado que se aportaría por sobre la materia prima.

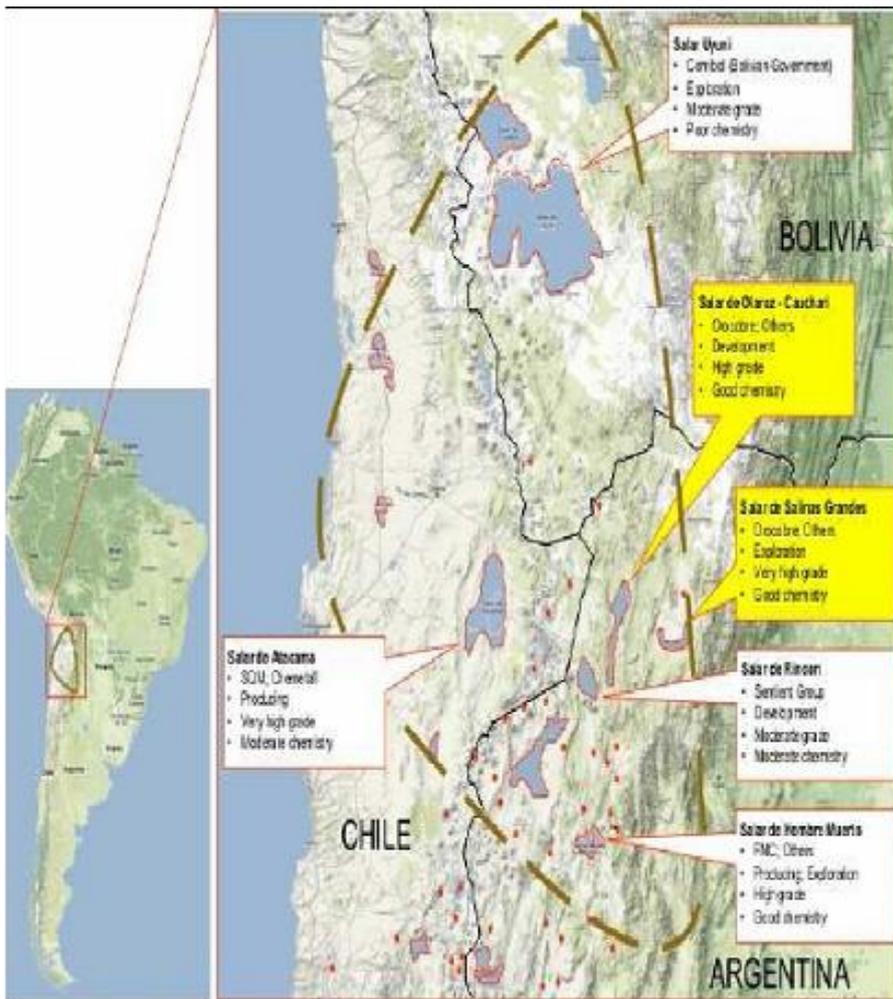


Fig. 2 – El triángulo del litio (Fuente: Orocobre, tomado de MECON, 2011)

De los tres países, Bolivia tiene el 50% de las reservas mundiales de litio pero es un caso paradigmático: el proceso de extracción y exportación no ha comenzado en forma plena por carecer de los recursos industriales apropiados, entre otros factores, además de los mayores costos de extracción que hacen la producción más cara. (Orellana Rocha, 1995; Hollender, 2010; Ströbele-Gregor, 2013)

A pesar de tener al mayor salar del mundo, Bolivia debe iniciar un camino para alcanzar una industria que le permita convertirse en el principal productor de litio en el mundo. El gobierno boliviano anunció que tomará bajo su control el proceso que llevará a los

productos industrializados, para no convertirse solamente en exportador de la materia prima. (Bustamante et al, 2012; Nacif, 2012; Ströbele-Gregor, 2012)

El primer exportador del mundo de litio es Chile, país netamente minero, que vende unas 12.000 toneladas (44%), le siguen Australia con 25%, China con 13% y Argentina con 11% de participación. (Bustamante et al, 2012)

Según un informe de la consultora Deloitte, en 2012 la Argentina era el país con la mayor inversión mundial en la búsqueda de litio y el segundo productor del mundo luego de Chile, con unas 7.000 toneladas anuales. (Clarín, 2012)

Si bien el precio se determina por la demanda y oferta, existen otros factores que afectan la producción del litio: la disponibilidad, el cambio tecnológico, costos de mano de obra y producción. La tonelada de litio, en el año 1998, cotizaba unos 1.760 dólares. Su valor no superaba los 2.500 dólares por tonelada en el año 2004. Actualmente es superior a los 6.000 dólares por tonelada y mantiene una tendencia firme. (Bustamante et al, 2012)

1.3.2 – Demanda mundial

Aunque el mercado de litio depende de los países, las aplicaciones finales de acuerdo con su uso son: 29% cerámica y vidrio, 27% baterías, 12% grasa industrial para lubricantes, 5% colada continua, 4% tratamiento de aire, 3% polímeros, 2% producción primaria de aluminio, 2% industria farmacéutica. (USGS Mineral Commodity Summaries, 2012)

El mineral concentrado de litio tiene como principal aplicación industrial el vidrio, las cerámicas y su transformación en carbonato de litio y otros componentes. En nuestro país, el litio se comercializa únicamente como carbonato de litio y, en menores cantidades, como cloruro de litio.

El desarrollo de las industrias de comunicaciones, electrónica e informática, con la creciente demanda de baterías de litio recargables, crea un gran mercado potencial para su exportación. Pero el mayor interés estará puesto en la poderosa industria automotriz, que, mediante la producción de autos híbridos –que combinan combustibles con propulsión eléctrica-, plantea un desafío mayor que Argentina puede aprovechar.

El litio tiene uno de los usos más valiosos como componente de las baterías recargables de ión-litio. Dado el incremento del costo de los combustibles fósiles, el litio en las baterías para vehículos adquiere una vital importancia. Se estima que unos 3 kilos de litio alcanzarían para impulsar un vehículo en un trayecto de 65 kilómetros antes de efectuar una recarga. (Goonan, 2012)

Los fabricantes de vehículos están en una transición hacia los automóviles eléctricos. Nuestro país se posiciona de la mejor forma para albergarlos, teniendo en cuenta que comparte la reserva de litio más grande del planeta. La futura industria de vehículos eléctricos tendrá como elemento clave al posicionamiento del producto en el ámbito geográfico más competitivo. (Piccardo y Prieto, 2012)

Según estimaciones de la consultora *Roskill*, del Reino Unido, en la próxima década la demanda de litio se duplicará y concentrará en la industria automotriz con dos posibles escenarios. (Fig. 3)

El primero supone un crecimiento con un índice de 6,4% por año para llegar a las 225.000 toneladas LCE (Carbonato de litio equivalente, 1 tonelada de litio equivale a 5,3 LCE) en 2020, con unas 60.000 pertenecientes a baterías para automóviles. En tanto, el segundo escenario prevé un crecimiento del 9,5% anual con unas 305.000 toneladas LCE en 2020, de las cuales 120.000 pertenecerían a baterías. (Roskill, 2009)

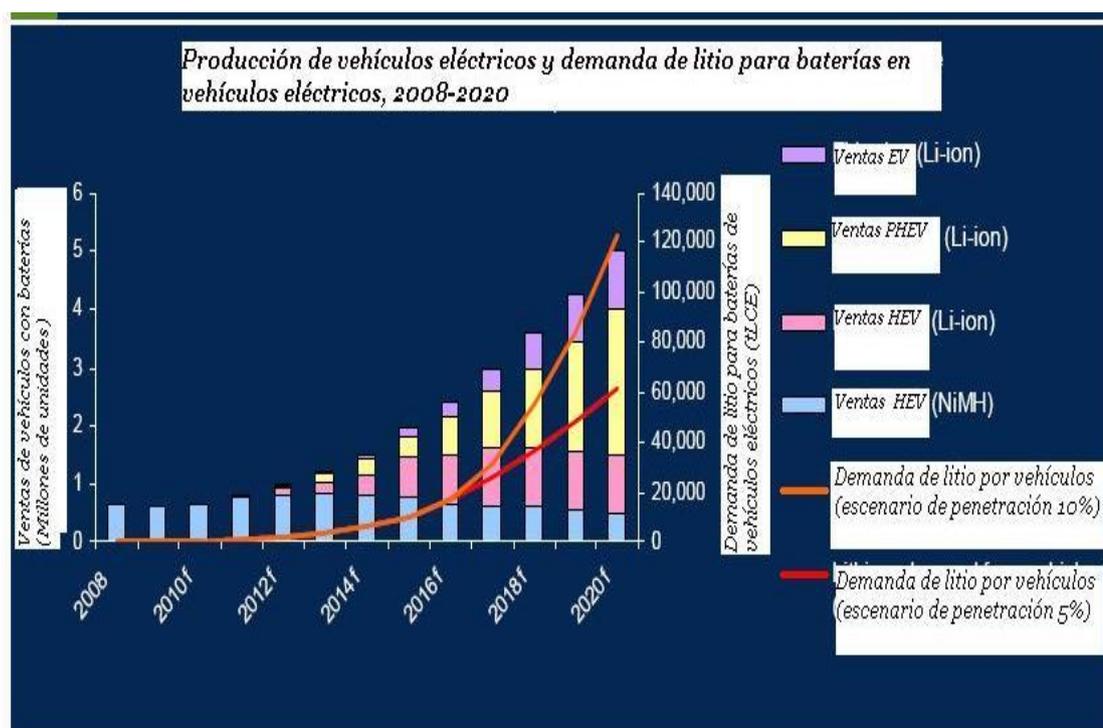


Fig. 3 – Producción de vehículos eléctricos y demanda de litio para baterías en vehículos eléctricos (Adaptado de Roskill, 2009)

Al igual que muchos productos mineros, la gran demanda proviene de los países desarrollados mientras que la oferta se genera en países en desarrollo. En el año 2009,

China, Corea y Japón sumaron más del 40% de las importaciones de carbonato de litio en el mundo. Los Estados Unidos alcanzaron un 20% y la Unión Europea completó el resto. (MECON, 2011)

1.3.3 – Uso en baterías

A principios del siglo XX se intentó el armado de baterías de litio, sin éxito, ya que los modelos de esa época eran inestables y peligrosos. Las primeras baterías compuestas por litio surgen en la década de 1970 con el uso del litio metálico como ánodo. En la década de 1980 comenzó la producción de pilas de litio recargables, que hoy están ampliamente difundidas en el mercado.

Las baterías, especialmente las recargables, son el destino para los compuestos de litio que tienen el mayor potencial. La demanda de baterías de litio recargables continúa creciendo en detrimento de las baterías convencionales recargables, para su uso en computadoras, dispositivos electrónicos y teléfonos celulares. Las baterías de ión-litio se adaptan a los aparatos portátiles que se pueden recargar fácilmente.

El suministro seguro de litio se ha convertido en una prioridad para las compañías asiáticas de tecnología. Las alianzas estratégicas y asociaciones con compañías que extraen litio en el mundo han proliferado para asegurarse un suministro confiable y diversificado para los fabricantes de baterías y vehículos. Si se tiene en cuenta que el carbonato de litio es uno de los componentes de más bajo costo de una batería de ión-litio, la prioridad no pasa por la diferencia de costos o la eficiencia en la producción

sino en asegurar el suministro al adquirir el litio de diversas fuentes. (USGS Mineral Commodity Summaries, 2012)

En el año 2010, las baterías producidas para autos eléctricos que usan litio fueron 141.000 y en el año 2015 se estima que llegarán a 1.732.000, lo que representa un incremento de 12 veces. (Ministerio de Minería, Gobierno de Chile, 2012)

La consultora Roskill pronosticó para el año 2020 una participación del 5% de vehículos eléctricos. Una previsión optimista entre 2011 y 2020 les permite predecir una producción cercana a las 10 millones de unidades, mientras que otra más cautelosa la reduce a unas 3 millones de unidades. (Roskill, 2012)

El consumo de litio ya ha superado los niveles del año 2008, con unas 150.000 toneladas LCE (Carbonato de litio equivalente, 1 tonelada de litio equivale a 5,3 LCE) en 2012 (Fig.4). La demanda continúa creciendo alrededor de un 8% anual en el mundo, con el mercado de vehículos eléctricos como importante protagonista. (Roskill, 2013)

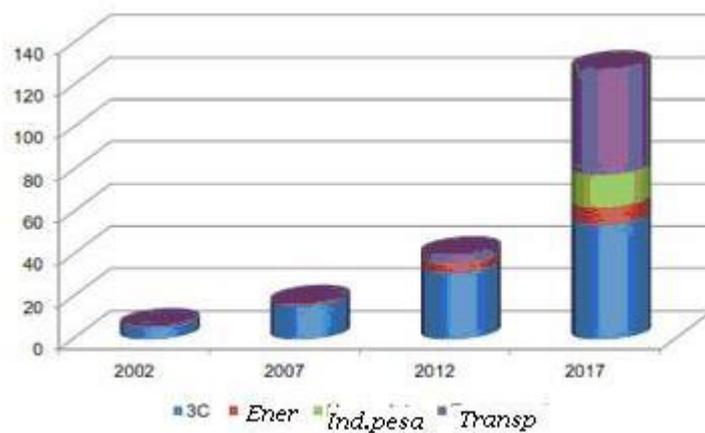


Fig. 4 – Consumo mundial de litio en baterías recargables (Adaptado de Roskill, 2013)

1.3.4 – Un pionero argentino

Encontramos pertinente dedicar aquí unas líneas a la figura de Luciano Roque Catalano (1890-1970), doctorado en química en 1917 y luego especializado en geología y mineralogía, quien se abocó a la geología económica y la planificación industrial de los yacimientos mineros existentes en Argentina.

Fue un verdadero pionero en la exploración y prospección de las riquezas minerales de nuestro país. Sus estudios e investigaciones se concentraron en los boratos ubicados en los salares de la Puna, región que recorrió incansablemente en forma intensiva y a la que le intentó dar una planificación económica mediante la explotación minera. En la década de 1920 fue el primero en descubrir la presencia de litio en los salares.

Catalano ocupó diversos cargos públicos, ofreció conferencias en pos del aprovechamiento de los recursos naturales y publicó innumerables trabajos sobre su especialidad. Rescatamos “El litio: una nueva fuente natural de energía” y “Estudio geológico-económico del Salar del Hombre Muerto”, en los que anticipaba el potencial del litio y sus posibles usos, al igual que establecía los mapas con los yacimientos de litio en el noroeste argentino.

“...El problema principal ahora, además de explorar las posibilidades de yacimientos de minerales de litio, se deben estudiar sus aspectos económicos ley, tipo de mineral, procesos de extracción, concentración y comercialización...” “Podemos afirmar, que la República Argentina figura entre las naciones con existencia ponderable y económica en la posesión de esos minerales de litio...” (Catalano, 1964)

Sobre la progresiva utilización de litio en ese entonces, expresaba: “...El creciente uso industrial para la paz y para la guerra, hace que este mineral se explote con mayor importancia, y se lo acopie de países productores que los exportan sin cuidado como materia prima...” (Catalano, 1964)

Vislumbraba la imperiosa necesidad de generar un valor agregado a los recursos naturales: “...Nuestro país concurre a la provisión de minerales de litio al consumo general, sin que hasta la fecha se haya intentado transformarlos en productos nobles finales...” y ya consideraba al litio como elemento de vital importancia: “...Después de 1956 sigue en aumento la explotación y exportación de carácter alarmante, puesto que las nuevas aplicaciones en la física nuclear e industria, lo ha transformado, al litio, en un metal crítico y agotable de gran valor...” (Catalano, 1964)

Sobre la explotación de los principales yacimientos, establecía que se deben “... estudiar sus aplicaciones conocidas y buscar las nuevas, para estar al nivel de los países civilizados y progresistas. Así crearemos riqueza social, capacidad técnica y no exportaremos materias primas, porque ello significa exportar trabajo, que origina pobreza y atraso...” (Catalano, 1964)

1.3.5 – Proyecto “Del salar a la batería”

En Argentina, está en marcha el proyecto “Del salar a la batería”, cuya meta es la explotación del litio con la incorporación del mayor valor agregado posible, sin afectar las condiciones de vida de los pueblos que residen en las zonas de explotación de yacimientos.

El objetivo final es que el país comience a fabricar baterías de litio para diferentes aplicaciones y deje de ser solamente exportador de carbonato de litio. Se están llevando a cabo los pasos intermedios para comenzar la fabricación de baterías. Si bien el precio de las baterías es alto, los más relevantes centros de investigación mundiales desarrollan nuevas tecnologías en pos de la sustitución de baterías de litio por otros medios, lo que implica cierta premura en la explotación y desarrollo local.

El coordinador del proyecto es el físico teórico Daniel Barraco, de la Universidad Nacional de Córdoba, quien ha destacado algunos datos: “...La salmuera que se extrae del salar cuesta 300 dólares la tonelada. Se la concentra y se obtiene carbonato de litio al 99 por ciento, es decir de la calidad que necesitamos; eso cuesta 6.000 dólares la tonelada. Si llegáramos a tener litio metálico (litio puro), su valor sería de 6.000 dólares

el kilogramo. Y más: las baterías para autos híbridos y eléctricos, con 10 kilos de carbonato de litio, cuestan entre 10.000 y 20.000 dólares. No hay nada que impida que produzcamos baterías para autos...” (La Nación, 2012)

De acuerdo con las conclusiones de la Reunión del Grupo de Expertos Senior sobre el Desarrollo Sostenible del Litio en América Latina, organizada por el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas (ONU-DAES) y la Comisión Económica de las Naciones Unidas para América Latina y el Caribe (ONU-CEPAL) a fines de 2010 en Chile, la demanda y los precios del litio tendrán un notable incremento con perspectivas de duplicarse en la próxima década. Los expertos anticiparon la creación de nuevas oportunidades de inversión y la expansión de las capacidades de producción de litio. Y también puntualizaron que las inmensas reservas de litio en América Latina permiten especular que no habría limitaciones a la veloz expansión de las baterías de litio en aplicaciones de movilidad o el continuo uso en productos electrónicos. (ONU-CEPAL, 2010)

Si se repara que en los próximos años existirán millones de vehículos eléctricos que harán uso de las baterías de litio, se está ante la presencia de un negocio con un inmenso potencial de cara al futuro.

Parte 2

2.0 – Explotación del litio

En la naturaleza, el litio se halla en unos 150 minerales, pero únicamente en unos pocos se considera en cantidades comerciales, y también está presente en salmueras y en aguas de mar y termales. Se lo encuentra en varias formas, asociado a minerales, en sedimentos con arcilla, en salinas o salmueras, en yacimientos de boro o berilio, en suelos de ambientes desérticos y rocas sedimentarias.

El litio se obtiene esencialmente de dos fuentes naturales (Fig. 5). La principal proviene del mineral espodumeno, que es un silicato doble de aluminio y litio asociado con el cuarzo, mica y feldespato. La otra es a partir de salmueras naturales de los salares, fundamentalmente en forma de sales de litio, sulfato doble de litio y potasio.

La explotación del litio proviene, como mencionamos, básicamente de dos fuentes: de minerales, que es la más tradicional y que representa un 34%; y de las salmueras de los salares, que es más moderna y con procesos y tecnologías de extracción menos costosas, con un 59%. De ambas fuentes, la primera transformación permite obtener carbonato de litio. (Fig. 5)

Existiría una tercera fuente potencial de algunos tipos de arcillas con grandes contenidos de litio, si bien más costosa pero económicamente factible. (Bustamante et al, 2012)

2.1 – Proceso de extracción

2.1.1 – Extracción de litio a partir de minerales

La fuente principal para obtener carbonato de litio de minerales fue el espodumeno, que se concentra por flotación hasta que se logra un concentrado con un contenido de hasta 3% de litio. Dado los altos costos de la técnica, actualmente los productores de minerales de litio optan solamente por la producción de concentrados que resultan competitivos únicamente para la industria de cerámicas y vidrios. (Bustamante et al, 2012)

Para producir litio del espodumeno natural, el concentrado debe calcinarse previamente con caliza y luego, dependiendo del proceso (lixiviado, molienda o precipitación) y del agente tratante, se obtiene un porcentaje de litio para llegar al carbonato de litio, cloruro de litio e hidróxido de litio. (Fig. 5)

Los procesos químicos son cuatro: tratamiento con ácido sulfúrico; lixiviación; purificación y concentración; y precipitación del carbonato del litio. (Bustamante et al, 2012)

Según estudios, existiría la posibilidad de extraer litio del espodumeno mediante la pirometalurgia de cloración y carbono-cloración con gas cloro. (Barbosa et al, 2010)

El carbonato de litio es el compuesto básico más relevante de las sales de litio. Su demanda constituye el 60% de los productos de litio. Es fácil de purificar y tiene

utilidad en la conversión de otras sales de litio, como el cloruro de litio, bromuro de litio e hidróxido de litio. (Garcés Millas, s/a)

2.1.2 – Extracción de litio a partir de salmueras naturales

Las salmueras naturales se convirtieron, desde la década de 1960, en la principal fuente de litio dado el bajo costo de producción del carbonato de litio si se compara al costo de obtención a partir de minerales. (COCHILCO, 2009)

El nivel de contenido de litio depende de la composición de las salmueras y varía la presencia de otros elementos, como boro, bromo, calcio, carbonatos, cloruros, nitratos, potasio y sodio. Esto hace que el tratamiento de cada salmuera sea específico y de acuerdo con su composición.

En el salar se presentan costos bajos de producción y minerales más puros, además las condiciones climáticas de las salmueras al encontrarse en desiertos o lugares áridos contribuye a la evaporación natural aminorando costos de producción.

La extracción del litio de las salinas se realiza por perforación, se llega hasta donde está la salmuera y por bombeo se extrae el líquido. Se efectúa el bombeo de la salmuera mediante perforaciones, con una profundidad que alcanza hasta 200 metros. La salmuera luego se envía a piletas cavadas en las salinas, donde se evapora el líquido y se concentran las sales.

La salmuera que se extrae del salar tiene un contenido de litio de 0,22% y luego de la evaporación llega hasta un 6%, aunque depende de las impurezas remanentes de boro y magnesio. (COCHILCO, 2009; MECON, 2011)

Luego, en plantas de procesamiento, mediante precipitación y agregado de ciertos reactivos químicos, se separa el litio de los compuestos diluidos en la salmuera, entre ellos: calcio, magnesio, potasio y sodio.

El litio se obtiene como carbonato de litio (con una pureza mínima exigida de 99,1% para que resulte comercial), con el agregado de carbonato de sodio. En el transcurso de la separación, se efectúa un lavado para arrastrar la solución que contiene litio y que se encuentra entre las partículas sólidas. El lavado se realiza generalmente con agua, cuyo consumo alcanza hasta un 40 % del agua total que se evapora.

El carbonato de litio es la materia prima para producir hidróxido de litio o cloruro de litio de alta pureza, que se emplea en la obtención de litio metálico por electrólisis de sales fundidas. (Fig. 5)

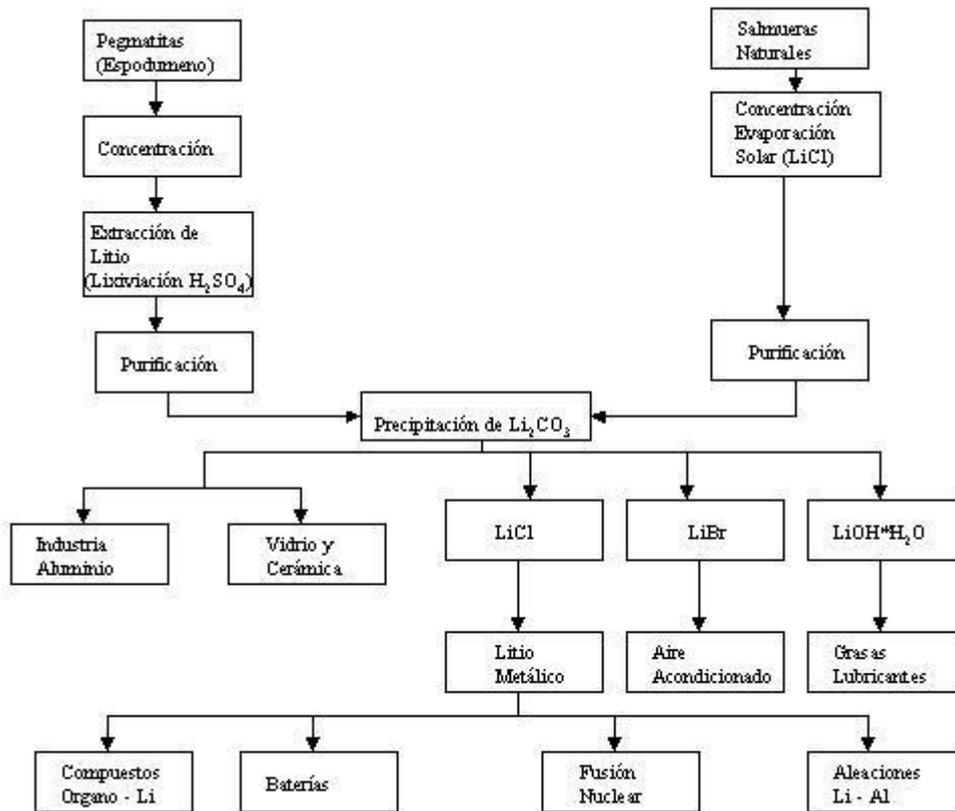


Fig. 5 - Diagrama de la obtención de litio a partir de minerales y salmueras, con las aplicaciones y compuestos obtenidos (Extraído de Garcés Millas, s/a)

Con una extensión de salinas de más de 8.000 kilómetros cuadrados, Argentina actualmente no cuenta con plantas de tecnología nacional para purificar la salmuera y obtener carbonato de litio con la pureza que se exige a nivel internacional para la fabricación de baterías.

2.2 – Litio e impacto medioambiental

El impacto de la extracción de litio en las salinas puede afectar la provisión de agua y el ecosistema, por lo que los expertos han recomendado estudios de impacto ambiental y

monitoreo permanente de la fauna y flora. Justamente, el consumo de agua involucrada es crítico en el proceso de extracción.

En el transcurso de miles de años, los salares cambian su fisonomía por la concentración de elementos químicos y minerales arrastrados por las lluvias. El agua se almacena en la cuenca del salar y tiene asociado un lecho subterráneo de salmuera que lo nutre. Las diversas sales existentes son carbonatos, cloruro de sodio y sulfatos.

En los extremos de los salares, la salmuera está en contacto con el agua y, al ser más densa, ocupa la posición inferior. El agua, en la parte superior, descarga hacia la superficie, lo que forma lagunas próximas a los salares. La concentración de litio en las salmueras es relativamente baja y, según expertos, por cada tonelada de litio que se extrae, se evaporan cerca de dos millones de litros de agua. (Gallardo, 2011)

La extracción de la salmuera ocasiona un descenso del agua subterránea, lo que, a su vez, hace descender al nivel de agua de las lagunas cercanas a las salinas. Esto trae como consecuencia la desaparición de los recursos hídricos de la zona, además de afectar el ecosistema, la fauna, las migraciones de aves y las poblaciones locales asentadas en la región. (Gallardo, 2011)

En Bolivia, el uso desigual de los recursos naturales por parte de la industria minera y la población cercana a los salares tiene costos y efectos diversos sobre los sectores económicos y sociales. La posibilidad de contaminación y escasez de agua, con el consiguiente deterioro del ambiente, impacta sobre las comunidades que se dedican a la agricultura y la ganadería, al igual que sobre el turismo. El intenso consumo de agua por

parte de la industria del litio y la contaminación de las napas subterráneas por la utilización de químicos, representa un gran problema a resolver. (Ströbele-Gregor, 2012, 2013)

Otros autores predicen una crisis del agua y describen al proyecto boliviano del litio como una “calamidad social y ambiental” por el impacto que podría producir sobre el ecosistema y los residentes. (Hollender y Shultz, 2010)

En Chile sucede otro tanto. El impacto ambiental de la extracción del litio afecta el consumo y la contaminación de agua, los niveles salinos, el paisaje y la flora y fauna de la zona. Estos factores son un riesgo para el delicado ecosistema y las comunidades que allí residen. (Bustamante et al, 2012)

2.3 – La minería del litio

La legislación del litio en Argentina otorga la decisión sobre el uso del subsuelo a las provincias, con regalías mínimas para el país. Los actores que intervienen en el proceso de explotación del litio, desde el gobierno nacional y el provincial, empresas extranjeras y locales, centros de investigación de universidades y las comunidades residentes, hacen que el tema no sea de fácil estudio y seguimiento estructural.

La Secretaría de Minería de la Nación promovió la creación de Organización Federal de Estados Mineros (OFEMI), cuya normativa establece la necesidad que las provincias no solamente sean las propietarias de los recursos sino que también tomen participación activa en el negocio. Esto ha llevado a que cada estado provincial deba crear su propia

empresa pública para asociarse a los diferentes proyectos mineros que tengan lugar en sus respectivos territorios.

A los problemas ambientales mencionados, cabe agregar la necesidad de coordinar marcos legales comunes –tanto a nivel nacional como provincial, además de regional si se tiene en cuenta a Bolivia y Chile- y el rol de los participantes. No menos importante es la promoción de estrategias comerciales y legales tendientes a la industrialización del litio en todas sus etapas, así como las tensiones originadas por la explotación del litio en terrenos que son propiedad de las comunidades originarias y se ven afectadas. (Fornillo, 2012)

La inquietud de un grupo de comunidades que residen en Jujuy y Salta, llevó a la presentación de medidas cautelares en la Justicia con el fin de que se les consulte y solicite consentimiento a la hora de explorar y explotar. El conflicto ha escalado y ya hubo casos en que la zona, donde el agua es un bien escaso, presentaría contaminación de un acuífero de acuerdo con el informe geológico “Consideraciones ambientales en relación con la construcción de pozos de prospección minera y/o hidrogeológica en las Salinas Grandes”. (Página12, 2011)

2.4 – Producción de litio en Argentina

La zona de reservas de litio más significativa en Argentina (Fig. 6) está concentrada en el noroeste del país, como ya se mencionó, en los salares de Catamarca, Jujuy y Salta.

El volumen de carbonato de litio (en Catamarca) que se exportó desde Argentina aumentó a un índice de 23% anual en forma sostenida hasta 2010, mientras que el cloruro de litio (en Salta) lo hizo a un 6% anual. En 2010 se exportaron unas 11.400 toneladas de carbonato de litio y unas 7.200 toneladas de cloruro de litio. (MECON, 2011)

De acuerdo con la Secretaría de Minería, en 2010 el litio representó el 1,5% del valor de la producción minera del país. En ese año, unos 71 millones de dólares fue el valor de las exportaciones argentinas de litio, con un 67% correspondiente al carbonato y los Estados Unidos como principal destinatario. Las ventas de derivados del litio se incrementaron un 25%. (MECON, 2011)

2.5 – Áreas de explotación y distribución geográfica de yacimientos en Argentina

Proyecto Fénix: Salar del Hombre Muerto

El salar del Hombre Muerto se localiza en Antofagasta de la Sierra, en el norte de la Provincia de Catamarca, es el único en producción comercial.

El yacimiento, uno de los más grandes, está a unos 4.000 metros sobre el nivel del mar, con una concentración promedio de litio de 700 partes por millón. Las reservas llegan a las 850.000 toneladas de litio, a una profundidad de 70 metros.

La explotación está a cargo de la empresa norteamericana *Food Mineral Corporation* (FMC), que inició la exploración en 1991 y la producción en 1998. Desarrolla sus actividades productivas a través de Minera del Altiplano SA, división de *FMC Lithium*.

Opera en el país tres unidades industriales (planta de absorción selectiva, de carbonato de litio y de servicios) en Catamarca y dos unidades (planta de cloruro de litio y la estación de cargas de Salar de Pocitos) en la provincia de Salta. Desde 2012 se fusionó con la australiana Galaxi, asociada a un consorcio de empresas coreanas.

La empresa usa un proceso de extracción desarrollado por técnicos argentinos, con tecnología patentada por FMC, que aplica absorción selectiva, en donde la salmuera proveniente del salar es impulsada a través de columnas que retienen selectivamente el litio.

Tiene capacidad para producir anualmente unas 12.000 toneladas de carbonato de litio y unas 6.000 toneladas de cloruro de litio. Gracias al Tratado de Integración Minero Argentino-Chileno, la producción cuenta con una salida directa al Pacífico a través del puerto chileno de Antofagasta. A la tasa actual de extracción, su vida útil se calcula en los 70 años. (COCHILCO, 2009)

Salar del Rincón

El salar del Rincón está ubicado en Salta y es el segundo en importancia de Argentina, con una concentración promedio de litio de 400 partes por millón y reservas estimadas en 1.400.000 toneladas de litio. (COCHILCO, 2009)

La explotación de la segunda salmuera en importancia en el país está a cargo de *Ady Resources*, de Australia, por medio de *Rincon Lithium Ltd.* La productividad es menor

que en el salar del Hombre Muerto, posee una planta piloto de carbonato de litio en el mismo salar.

Salar de Olaroz

La firma Orocobre Ltd. (de Australia y Estados Unidos) administra diferentes proyectos en unos quince salares, entre los más destacados relacionados con litio están: Cangrejillo/Salinas Grandes, Caucharí y Olaroz.

El salar de Olaroz está situado en Susques, Provincia de Jujuy, a 4.500 metros sobre el nivel del mar. Orocobre se asoció a la Empresa Provincial Jujuy Energía y Minería Sociedad del Estado (JEMSE), y a la automotriz japonesa *Toyota Tsusho*.

En 2013 dio inicio la construcción de la planta industrial y en 2014 daría comienzo la producción de carbonato de litio con una calidad del 99,5%, apto para la fabricación de baterías, con una producción anual estimada de 16.000 toneladas.

Es un salar de alta concentración de litio, alrededor de las 900 partes por millón y se han estimado reservas de hasta 325.000 toneladas.

La exploración en Cangrejillo-Salinas Grandes se realiza con *South American Salars*. Situado a 60 kilómetros de Olaroz, la integración de los yacimientos es factible.

Salar de Caucharí-Olaroz

A través de Minera *Exar*, vinculada con *Mitsubishi*, la empresa *Lithium Americas Corp* (LAC) opera en cinco salares de Jujuy y Salta. El principal es el salar Caucharí-Olaroz, con reservas estimadas de 5 millones de toneladas de carbonato de litio para unos 40 años. Dado la baja cantidad de magnesio, las tasas de evaporación son altas y por lo tanto es una explotación de gran productividad. (MECON, 2011)

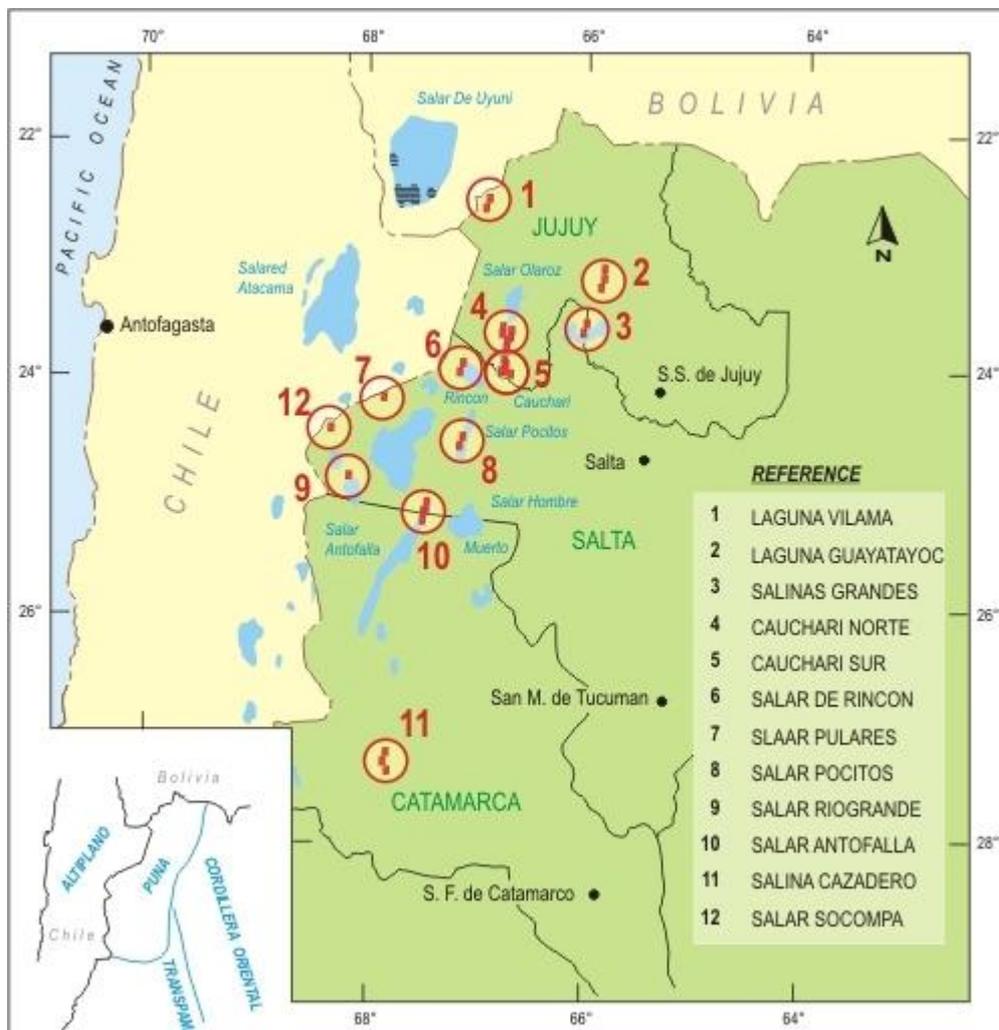


Fig. 6 – Áreas de localización los salares en Noroeste Argentino (Fuente: <http://bolivia-litio.blogspot.com.ar/2011/03/mas-de-diez-mineras-con-las-garras-en.html>)

Otras empresas y consorcios que tienen proyectos son los siguientes: (tomado de MECON, 2011)

La Argentina Minera Santa Rita, en 2010, firmó un acuerdo con el consorcio Bolloré-Eramet para el inicio de la exploración de litio en los salares del Hombre Muerto (Catamarca), Centenario (Salta) y Caucharí (Jujuy).

Ekeko SA, subsidiaria de la australiana *Lithia Inc*, instaló una planta piloto en la ciudad de Salta como parte de la exploración del Salar de Pozuelos.

Lithium One, de Canadá, en 2010 acordó con un consorcio coreano formado por Kores, LG y GS Caltex, con el objeto de evaluar la factibilidad del Proyecto Sal de Vida, en el Salar del Hombre Muerto.

Dajin Resources Corp.: Proyecto Salinas Grandes/Guayatayoc. La empresa es británica.

Rodhinia Lithium: Salar de Diablillos, en Salta. La empresa es canadiense.

Exar y Mitsubishi: Salares Incahuasi, Pocitos y Arizano. *Exar* es subsidiaria de *Lithium Americas Corporation*

Minera Solitario Argentina: Salar de Llullaillaco, en Salta. Propiedad de la empresa canadiense *TNR Gold*.

Existen innumerables salares de los cuales se desconocen la magnitud de las reservas:
Antofalla, Centenario, Pastos Grandes, Pazuelos, Rotonoes, entre otros. (COCHILCO,
2009)

Parte 3

3.0 – Funcionamiento de las baterías de litio

3.1 – Conceptos de electroquímica

En las baterías se logra el almacenamiento de energía eléctrica en forma de energía química, que se recupera mediante electricidad cuando lo necesitamos.

Los conceptos tradicionales de electroquímica, introducidos por Volta, son la base de funcionamiento de los elementos que almacenan energía. Se controlan reacciones químicas de tipo reducción-oxidación con el potencial eléctrico de los electrodos metálicos, denominados ánodo y cátodo, que están inmersos en una disolución conductora denominada electrolito.

La polaridad de los electrodos depende de si el dispositivo consume o suministra energía eléctrica. En el primer caso, en el consumo de energía, el cátodo es negativo y el ánodo positivo, mientras que en el segundo, un dispositivo que suministra energía, el cátodo es positivo y el ánodo negativo. Así, en el caso de pilas o baterías el ánodo es el electrodo negativo y el cátodo es el electrodo positivo.

Entre los tipos de acumuladores recargables que evolucionaron tecnológicamente, tenemos a los de plomo-ácido, níquel-hierro, níquel-cadmio y níquel - hidruro metálico. Factores como la baja eficiencia, la alta contaminación, la reducida vida útil, el peso, etc. han llevado a progresivas sustituciones con el correr de los años. La tendencia es alcanzar mayores densidades de energía con dispositivos cada vez más pequeños.(Fig.7)

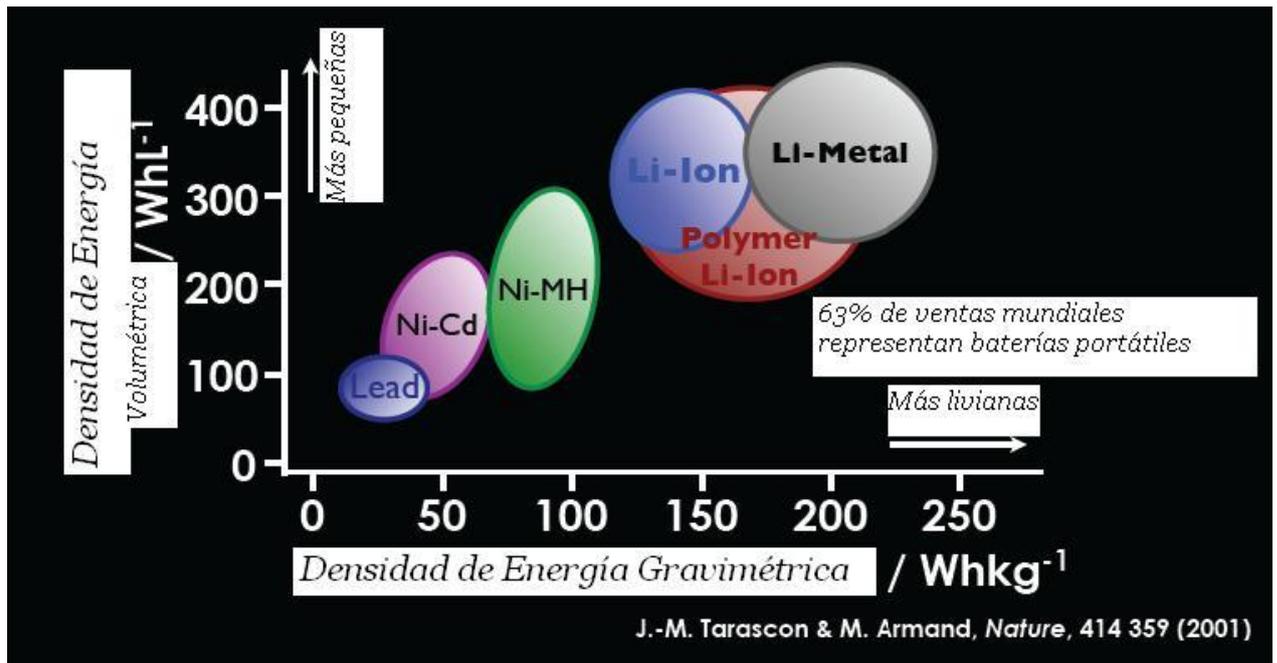


Fig. 7 – Evolución del tipo de baterías (Adaptado de revista *Nature*)

Las posibilidades de los dispositivos electroquímicos actuales se han ampliado al usar capas de materiales activos dispuestas sobre el contacto metálico, como por ejemplo polímeros conductores. La batería de ión-litio funciona de acuerdo con este diseño, una tecnología de almacenamiento de energía que se ha difundido ampliamente. (Bisquert, 2005)

Debemos recordar que el litio no es una fuente de energía, sino un vector energético que permite almacenar y transportar la energía. El agotamiento de las reservas de combustibles fósiles obliga al desarrollo de fuentes de energías renovables y limpias (principalmente eólica y fotovoltaica) y la búsqueda de almacenar esas energías mediante baterías con alta energía específica y de larga vida, como las baterías de ión-litio que cumplimentan con esos requisitos y que permitan acceder a la energía según la demanda.

3.2 – Introducción de las baterías de litio

Las baterías de litio están reemplazando a las de níquel-cadmio por su alta toxicidad y bajo rendimiento, mientras que las de plomo comienzan a desaparecer paulatinamente.

El litio tiene un alto potencial electroquímico y puede dar lugar a una capacidad energética elevada. Esto lo hace inestable en medios acuosos o en ambientes con aire húmedo, donde reacciona fácilmente, lo que limita la construcción y uso de baterías de litio en electrolitos no acuosos.

Los esfuerzos para el desarrollo de baterías de litio recargables han determinado que la capacidad de recargas reduce la estabilidad térmica y causa reacciones internas, especialmente durante la carga. Esto llevó a que la investigación se concentrara en las baterías de ión-litio, que, a pesar de tener densidad de energía menor que la del metal, ofrecen mayor capacidad de recarga y son más seguras. (Hamel Fonseca, 2011)

La firma Sony introdujo la batería de ión-litio en 1991 y desde entonces se ha duplicado su capacidad, como consecuencia de la alta demanda para dispositivos electrónicos portátiles con una diversidad de prestaciones. Los nuevos materiales que continuamente surgen para el ánodo y el cátodo harán posible mayores capacidades en los próximos años.

El mercado de baterías de ión-litio quizás adopte dos tendencias: una con altas prestaciones y alto costo, con una densidad de energía en aumento, y otra con materiales

de menor costo pero con grandes prestaciones y rapidez de respuesta para los vehículos eléctricos híbridos. (Bisquert, 2005)

3.3 – Tipos de baterías de litio

Las baterías de litio contienen litio metálico y no son recargables. Ejemplos de ellas son las de tipo botón que se utilizan en calculadoras manuales, relojes y pequeños dispositivos médicos. Se las denomina baterías de litio **primarias** y brindan mayor energía útil por unidad de peso que las baterías de ión-litio, que se denominan **secundarias**. Las baterías de ión-litio usan compuestos de litio, que resultan más estables, no se oxidan espontáneamente y son recargables eléctricamente. (Goonan, 2012)

Existen varias configuraciones y tipos de baterías de ión-litio, que no tienen un diseño y tamaño común sino que se fabrican específicamente para un determinado dispositivo electrónico. Se podría clasificar a las baterías de ión-litio de acuerdo con la composición química y el empaquetado de la batería.

Una o más de las posibles composiciones químicas que llevan las baterías de ión-litio, podría convertirse en la base para el suministro de energía del vehículo eléctrico del futuro. (Goonan, 2012)

La mayor diferencia entre baterías para uso en electrónica y las baterías para vehículos eléctricos será el tamaño. Un tamaño mayor puede obtenerse al ensamblar pequeñas celdas o al desarrollar celdas grandes individuales. (Goonan, 2012)

Las baterías de ión-litio recargables se pueden clasificar por el empaquetado en las siguientes categorías: (Goonan, 2012)

Cilíndricas, las más difundidas y usadas para comunicaciones inalámbricas, computadoras portátiles, instrumentos médicos y herramientas manuales. (Fig. 8)

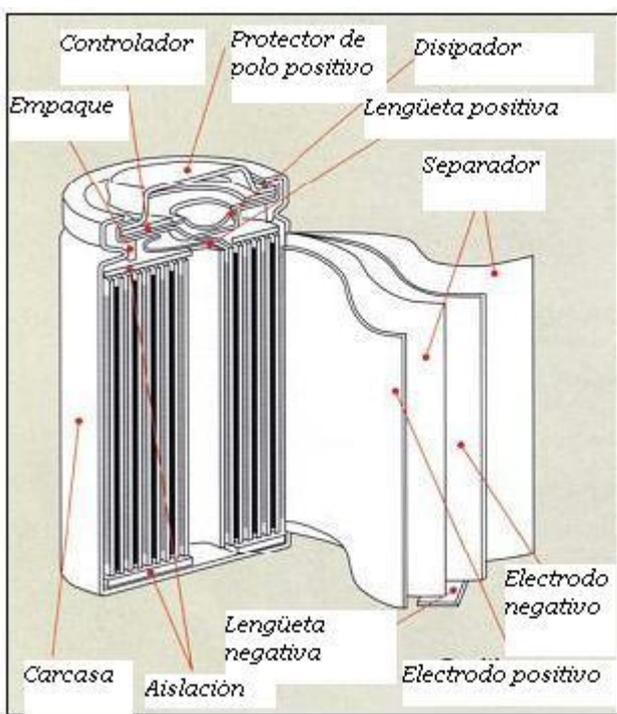


Fig. 8 – Batería de ión-

litio recargable “cilíndrica” (Adaptado de www.batteryuniversity.com)

Prismáticas, desarrolladas a principios de la década de 1990, fabricadas en varios tamaños y capacidades, adaptadas a dispositivos electrónicos tales como teléfonos celulares. (Fig. 9)



Fig. 9 – Batería de ión-

litio recargable “prismática” (Adaptado de www.batteryuniversity.com)

Formatos pequeños, introducidas en 1995, que permiten adaptarse a las dimensiones exactas establecidas por el fabricante del dispositivo electrónico y que se ensamblan fácilmente en baterías de acuerdo con las necesidades. (Fig. 10)

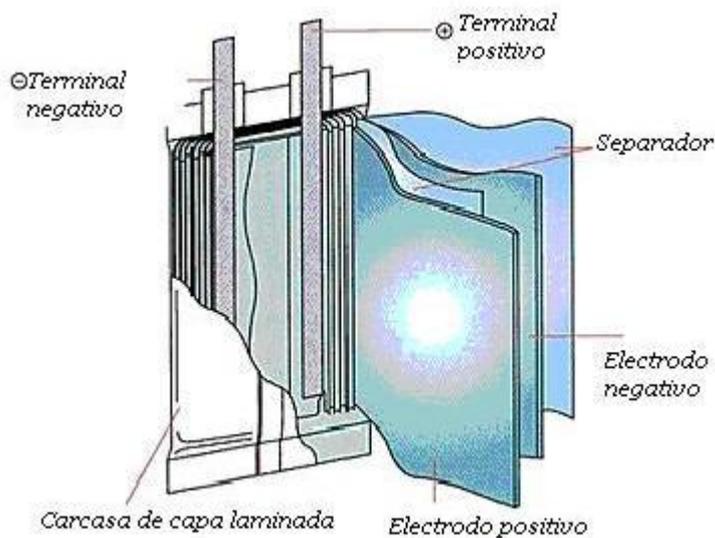


Fig. 10 – Batería de ión-litio recargable de “formato pequeño” (Adaptado de www.mpoweruk.com)

3.4 – Tipos de construcción del empaquetado

A continuación se especifican las características según el empaquetado: (Axeon, 2010)

Las cilíndricas se fabrican de acero en muy grandes volúmenes, con bajos precios para formas comunes. La más típica y difundida es la que se utiliza en las computadoras portátiles. Tienen alta densidad de energía, pero su tamaño las convierte en ineficientes en cuanto al uso de espacio. La capacidad puede llegar a los 200 Ah.

Las prismáticas son de aluminio o acero, con alta densidad de energía, robustas y permiten una buena disipación del calor. Pueden empaquetarse con más eficiencia que las celdas cilíndricas debido a su factor de forma y por lo tanto la densidad de empaque es mayor. La capacidad típica puede llegar a los 100 Ah.

Las de formato pequeño son las que hacen más eficiente el espacio disponible y alcanzan una eficiencia de empaquetado de 95%. Al carecer de una carcasa de metal, el empaquetado tiene menos peso y por lo tanto la densidad de energía es alta. Se producen en diferentes formatos, dependiendo de las aplicaciones, los fabricantes no están sujetos a ningún formato típico y resultan económicamente factibles.

Las celdas de litio de formato pequeño se consideran una alternativa a las prismáticas para aplicaciones en la industria automovilística, dado su flexibilidad que les permite un empaquetamiento eficaz y una alta densidad de energía. La construcción de la celda usa polímero para el electrolito, lo que la hace menos volátil y con menos posibilidades de pérdidas. Por su gran superficie y forma, tienen buena disipación del calor. Como desventaja, poseen una baja estabilidad mecánica y necesitan un empaque más robusto.

3.5 – Funcionamiento de las celdas de litio

Cada celda electroquímica dispone de un electrodo negativo y uno positivo, conectados en forma interna por un electrolito que lleva los iones entre ambos y la corriente eléctrica generada se transporta externamente.

Al descargarse, en el electrodo negativo (ánodo) se produce una reacción de oxidación y se liberan electrones, que a su vez se consumen en la reacción de reducción que ocurre en el electrodo positivo (cátodo). Si la batería es recargable, los procesos se invierten durante la carga al aplicar un potencial eléctrico externo (Fig. 11). Las reacciones de oxidación y reducción, conocidas como “redox”, poseen un potencial electroquímico asociado, denominado “potencial redox”. Los potenciales del polo negativo y del positivo tienen, respectivamente, valores cercanos a los potenciales del ánodo y cátodo. La tensión eléctrica de la batería es igual a la diferencia de potencial de ambos polos.

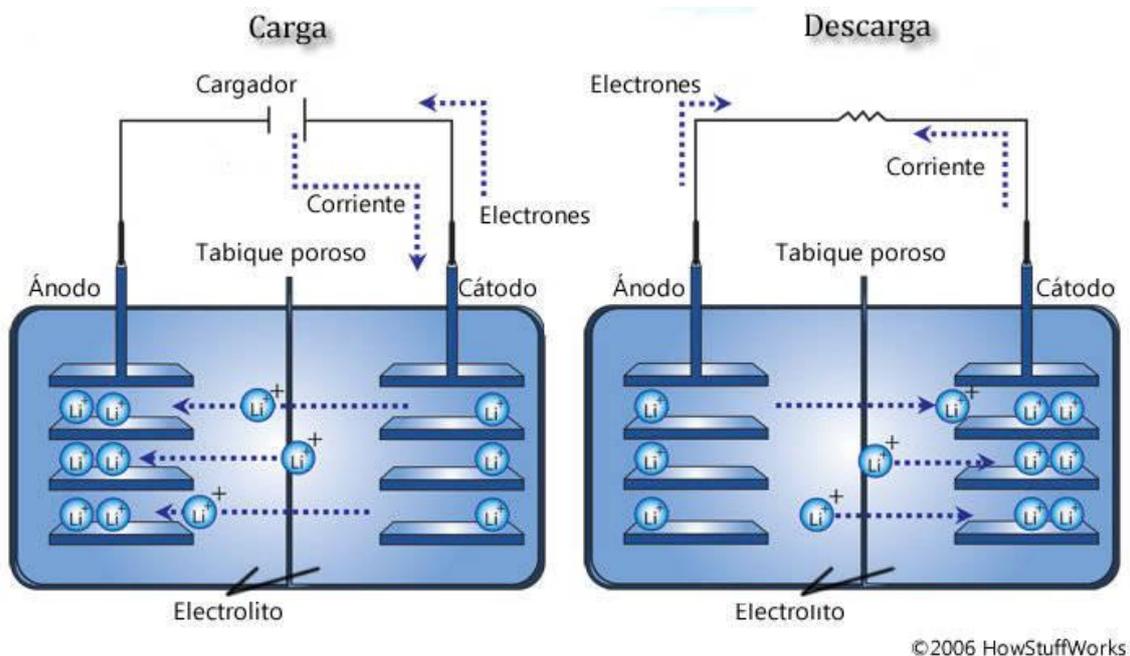


Fig. 11 – Carga y descarga en celda de litio

Celdas de litio típicas proporcionan tensiones eléctricas de aproximadamente 4 voltios. Las celdas se conectan en serie o paralelo para lograr las tensiones de baterías que se requieren.

Las baterías de litio primarias, basadas en ánodos de litio-metal, no son recargables. Esto se debe a la gran propiedad reactiva del litio metálico puro y la posibilidad, en los ciclos de carga-descarga (Fig.12), de desencadenar reacciones de descomposición del electrolito con elevada temperatura y peligro de explosión. (Puga, 2012)

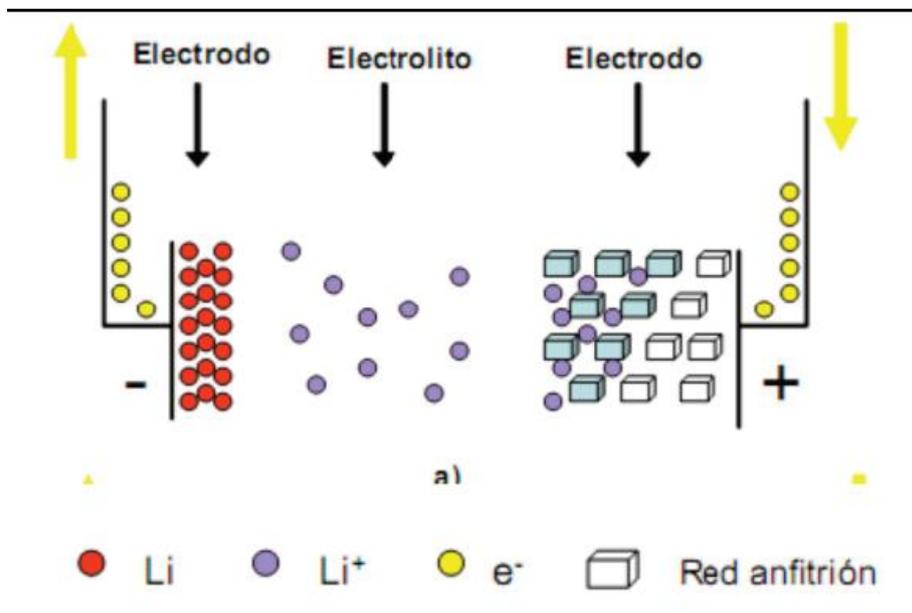


Fig. 12 – Esquema de funcionamiento de batería de litio (Fuente: Hamel Fonseca, 2011)

El funcionamiento básico de las baterías de ión-litio secundarias o recargables se basa en procesos llamados inserción-desinserción de iones de litio. Las reacciones son de estado sólido entre dos compuestos de inserción como electrodos. Son estables al aire húmedo y por ello no se necesitan condiciones de ensamblado estrictas como en las que se usa litio metálico como electrodo.

En el desarrollo de las baterías de ión-litio que usan compuestos de intercalación como electrodos, uno de los electrodos contiene litio ionizado para que se inserte en el electrodo opuesto durante los procesos de carga y descarga. Se basan en ánodos en los que los iones de litio se intercalan con un material, generalmente grafito o material carbonoso, al igual que aleaciones o metales.

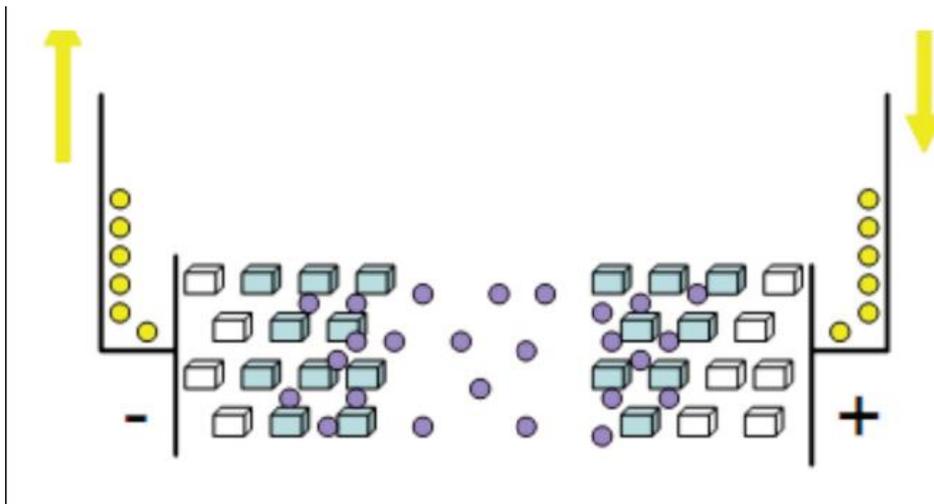


Fig.13 – Esquema de funcionamiento de batería ión-litio (Fuente: Hamel Fonseca,2011)

En la descarga, el ánodo libera iones (positivos) de litio y electrones al circuito externo y se oxida durante la reacción. El cátodo acepta los iones y los electrones provenientes del circuito externo y se reduce durante la reacción (Fig.13). Los cátodos están formados por una gama diversa de materiales diferentes, usualmente un fosfato o metal de transición de litio. La denominación de las baterías generalmente lleva el nombre del material usado en el cátodo.

El electrolito no participa de la reacción química, es un aislante para las cargas eléctricas pero un conductor para los iones, que separa los electrodos y provee el medio para la transferencia de carga dentro de la celda entre ánodo y cátodo. Para las baterías

de ión-litio, el electrolito típico es un solvente acuoso inorgánico que contiene una sal de litio.

Dentro de los sistemas electrolitos líquidos, se dispone de un separador poroso para evitar un cortocircuito entre los electrodos. Los electrolitos de polímeros sólidos son menos volátiles y existen menos posibilidades de pérdidas que en los de líquidos o en gel, pero las celdas tienen una mayor impedancia.

Los carbonatos pueden descomponerse en el transcurso de la vida útil de la batería. Son inflamables y volátiles, lo que puede llevar a un posible calentamiento y cortocircuito. La tecnología de las baterías de ión-litio se ve afectada por la frágil estabilidad de los electrolitos que se utilizan. (Puga, 2012)

El funcionamiento de los nuevos tipos de dispositivos no es por reacciones de transferencia de carga en la superficie del electrodo. Los iones entran en el electrodo y cambian su composición, ya que ocurren reacciones químicas y procesos de intercalación y transporte en estado sólido, sumado a la clásica transferencia de carga. (Bisquert, 2005)

No se ahondará aquí en los fundamentos de la electroquímica física de los sistemas de acumulación de energía, ni las propiedades de transferencia de iones entre electrodos a través del electrolito.

La utilización de materiales activos como electrodos aumenta y optimiza sus funciones de reacciones químicas, reorganización molecular y transferencia de carga. El desarrollo de materiales a escala de la nano-tecnología, del orden de la milmillonésima parte del

metro, al igual que su caracterización, ensamble y manipulación, creó un contexto innovador en el desarrollo de tecnologías aplicadas a la energía. La miniaturización de la tecnología ha permitido mejorar la vida útil, los tiempos entre recargas, los tamaños y los pesos de las baterías. (Bisquert, 2005)

3.6 – Ciclado de las celdas

El estudio del ciclado es el procedimiento que se utiliza para analizar la capacidad y el envejecimiento de las celdas de ión-litio. Consiste en efectuar sucesivas cargas y descargas de la celda, que se encuentran ensambladas como batería, de acuerdo con el consumo previsto. (Acosta et al, 2011)

Las propiedades características de los materiales que se usan como electrodos, se determinan a través de observaciones del comportamiento que exhiben en varios ciclos de carga y descarga. El ciclado se describe con los parámetros de factor de carga, eficacia del ciclo y la vida media de las celdas. La obtención de esos parámetros necesita de equipos de medición de alto costo, gran calidad y muy sensibles, entre ellos una cámara de guantes (también denominada caja de guantes, dispositivo en el cual se hace vacío y se llena de un gas inerte para poder manipular el litio, que es altamente reactivo y no puede estar en contacto con la humedad y el oxígeno), celdas especiales de medición y potencióstato-galvanostato controlado por computadora. (Hamel Fonseca, 2011)

Junto a las celdas conectadas entre sí, se debe añadir un controlador electrónico que verifica en cada instante la carga, corriente, temperatura y tensión de cada celda. De esta

forma, se conoce permanentemente el funcionamiento de la batería, la cantidad de carga y ciclos de vida que le quedan. Todo un rango de parámetros que hacen al buen funcionamiento y optimización de su uso. Otra razón es la seguridad: si se supera la tensión de trabajo de la celda por alguna causa y la batería se encuentra en peligro de calentarse o explotar, el controlador desconecta automáticamente la batería de la carga o bien del cargador de la batería.

3.7 – Ventajas y desventajas de las baterías de litio

El uso de litio metálico, con un 99,9 de pureza, en ánodos de baterías primarias ha logrado un gran crecimiento en los últimos años. También existiría una serie de baterías con ánodo común que solamente difieren en el tipo de cátodo y el electrolito.

Las baterías de litio presentan características ventajosas por sobre las baterías tradicionales, entre ellas: (Mayol Suárez, 2012; Peña Ordoñez, 2011)

- Bajo efecto de auto-descarga (mantienen su carga por largos períodos de tiempo)
- Funcionamiento a alta capacidad y en bajas temperaturas
- Gran durabilidad y no necesitan mantenimiento
- Mayor densidad de energía por peso y volumen
- Mayor seguridad y tiempo de almacenamiento
- Mayor vida útil, con tensión eléctrica constante (se cargan y descargan muchas veces y mantienen su carga)
- Menor peso que las baterías tradicionales
- No tienen efecto memoria (no tienen que cargarse o descargarse totalmente para mantener su capacidad de carga completa)

Como desventajas, podemos encontrar que:

- Son sensibles a las temperaturas elevadas, el almacenamiento o su operación en altas temperaturas ocasiona una gran degradación.
- Pueden sufrir daños graves por descargas intensivas si se llega a valores por debajo de la tensión de trabajo establecida por el fabricante.
- Su vida útil disminuye con el paso del tiempo, lo que hace bajar su capacidad en forma gradual, debido al incremento en su resistencia interna. En aplicaciones de alta corriente representa un inconveniente.
- Necesitan un circuito de seguridad para mantener los valores de tensión máxima y mínima por celda.
- Tienen limitaciones en el transporte aéreo. Existen regulaciones internacionales sobre el envío aéreo internacional, cuyo cumplimiento es obligatorio desde el año 2013 por la Administración de Seguridad de Materiales Peligrosos del Departamento de Transporte de Estados Unidos. (UPS, 2012-2013)

Parte 4

4.0 – Producción de baterías de litio

La mayor parte de la producción de baterías de ión-litio de uso general se produce en China, Corea del Sur y Japón. Los Estados Unidos participan de la producción de baterías recargables de litio en un mercado de pequeña escala y con un alto margen de ganancia, con aplicaciones en el espacio, en la medicina o en el sector militar. (Goonan, 2012)

Existen más de 100 fabricantes solamente en China, con producción para el mercado internacional. Las baterías se certifican y controlan por las marcas más importantes, que las usan como componentes en sus dispositivos electrónicos. Mientras que Corea del Sur y Japón fueron pioneros en el desarrollo y producción para la industria electrónica, China se dedica al sector de baterías de menor costo y calidad. (MECON, 2011)

Japón es uno de los mayores productores de baterías de litio. En el año 2009, representaron un 43% del volumen total de baterías fabricadas en ese país. Un 47% fueron baterías primarias de litio y un 53% fueron baterías de ión-litio. (Goonan, 2012)

Las baterías de litio entraron al mercado en 1993 y desde entonces unas 45.000 toneladas se incorporaron a estas baterías en todo el mundo. Hasta el año 2008, el mercado de las baterías de litio fundamentalmente consistía en baterías primarias y secundarias para dispositivos electrónicos, con solamente un 0,2% de litio aplicado a las baterías para automóviles. (Goonan, 2012)

4.1 – Componentes y funcionamiento

Recordamos rápidamente las partes principales y el principio de funcionamiento de las baterías de ión-litio para luego pasar a los detalles del proceso de fabricación.

La celda es la unidad básica de una batería y se agrupan en módulos. La celda de la batería de ión-litio posee cuatro componentes: ánodo, cátodo, electrolito y separador.

El ánodo y el cátodo se disponen para que se inserten y remuevan iones, de modo que se produzca la carga y descarga de la batería (Fig.14). Los iones se mueven entre los electrodos a través del electrolito, mientras que el separador habilita el paso de iones pero impide el cortocircuito entre los electrodos. Los iones de litio se liberan desde el ánodo hasta el electrolito, atraviesan el separador y se adhieren al cátodo, generando una corriente eléctrica. Al recargarse la batería, se produce el proceso inverso.

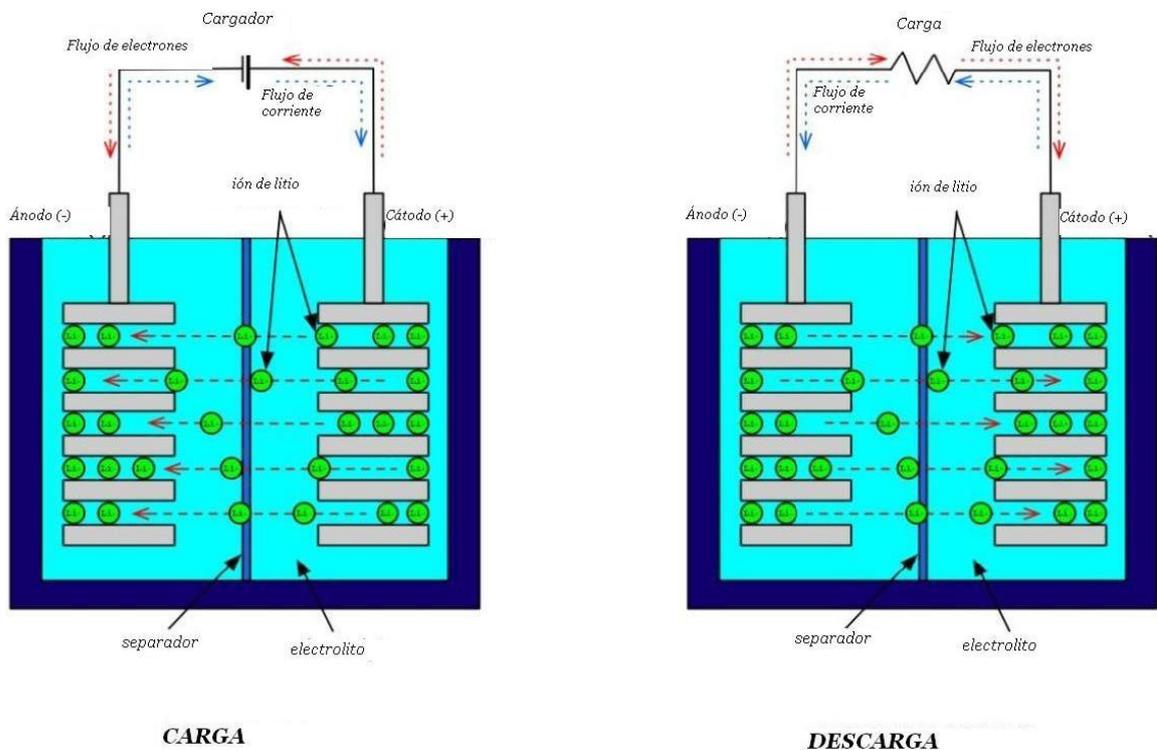


Fig. 14 – Almacenamiento electroquímico (Adaptado de Anderson, 2009)

Seguidamente se describen los materiales constituyentes de cada una de las partes.

El ánodo puede estar formado por una lámina de cobre, de unos 20 micrómetros de espesor, sobre el que se deposita una pasta de grafito embebido en litio, carbón y un solvente.

El cátodo se construye con pastas de material activo que recubre una lámina de aluminio de similar espesor. La pasta del material se compone de un óxido de litio-metal, carbón y solvente. En el proceso de fabricación, se recubre la lámina de aluminio con la pasta y luego se seca. De acuerdo con el material activo del cátodo, se puede tener: óxido de litio níquel cobalto aluminio, óxido de litio manganeso, óxido de litio níquel manganeso cobalto y óxido de fosfato de litio-hierro. (Mayol Suárez, 2012)

Continuos estudios se llevan a cabo en pos de mejorar las propiedades de los electrodos o hallar nuevos materiales activos y reacciones de inserción que optimicen las funciones de los óxidos y la electroquímica de los electrodos. (Longoria Rodríguez et al, 2011; Cuentas Gallegos et al, 2002; García Alvarado et al, 2000)

El electrolito es una mezcla de una sal de litio y un solvente orgánico. La mayoría de los electrolitos usados en las celdas de baterías de ión-litio son de hexafluoruro de litio disuelto en solventes de carbonatos. De acuerdo con el electrolito usado, las baterías recargables se dividen en tres tipos: **líquido**, en **gel** (mezcla de líquido y polímeros) y **sólido** (polímeros).

Los electrodos negativo y positivo de cada celda y las adyacentes se aíslan eléctricamente con separadores o tabiques porosos, películas extremadamente finas de hasta unos 30 micrómetros de espesor que son de polietileno o polipropileno. En caso que la temperatura de la celda se incremente accidentalmente, el separador se funde y evita la conducción entre electrodos.

4.2 – Proceso general de fabricación

Si bien cada fabricante establece detalles de diseño y equipos específicos, el proceso de fabricación de celdas de baterías de ión-litio puede resumirse en partes básicas. (Mayol Suárez, 2012)

Una descripción general del proceso de fabricación de baterías de litio, se encuentra en: Carrasco, Ismael Simón. Fabricación de baterías de litio. Disponible en <http://es.scribd.com/doc/22631266/BATERIAS-DE-LITIO>

En el texto “*Lithium-Ion Batteries*” (Yoshio, Masaki; Brodd, Ralph y Kozawa, Akiya – Springer, 2009), se especifican los pasos esenciales de todo el proceso de fabricación con detalles. A continuación se siguen los lineamientos generales de dicho trabajo para describirlos.

4.2.1 – Diseño de la celda

El desarrollo de celdas comerciales requiere diseños que permitan llegar a una celda prototipo, cuyas pruebas resulten de una gran seguridad. Los modelos necesarios

requieren de principios de diseño y supuestos que puedan reproducir el comportamiento de la celda real.

Entre las características principales de las celdas a tener en cuenta en el modelo, se mencionan: la distribución de la corriente eléctrica en el interior de los electrodos, el intercambio de corriente eléctrica en los materiales activos, el espesor y porosidad de los electrodos y la conductividad del electrolito. Se debe tener en cuenta también los dispositivos de seguridad e interrupción de corriente. Luego se ajusta y prueba el programa, mediante los parámetros reales.

4.2.2 – Fabricación de las celdas

Para el proceso de una celda de una batería de ión-litio, ya sea cilíndrica o prismática, se procede de la siguiente manera: se recubren las láminas con sus materiales activos, se enrollan los electrodos con el separador entre ellos, se insertan los electrodos enrollados en un receptáculo, el que se llena con el electrolito y se sella. Por último, se somete a las celdas a un proceso de formación, envejecimiento y selección.

Tanto las celdas cilíndricas como las prismáticas usan un núcleo bobinado, en el cual un receptáculo mantiene la presión sobre los electrodos y el separador. En cambio, las celdas de baterías de ión-litio de polímeros aprovechan la propiedad de adhesión del electrolito de polímero para la unión de los electrodos. De esta forma, no es necesaria una estructura externa para mantener presionado los electrodos entre sí, ya que su receptáculo puede ser hecho de aluminio y polímero laminado.

4.2.3 – Preparación previa de los electrodos y sus contactos

Una vez que las láminas metálicas de los electrodos se recubren con sus materiales activos, se someten a presión con rodillos. (Fig. 15)

La mezcla de los materiales activos debe tener una viscosidad adecuada, para luego revestir uniformemente las láminas de aluminio (cátodo) y cobre (ánodo). Se requiere un control estricto del espesor de los electrodos recubiertos, a fin de que todos los elementos quepan en el receptáculo. Una vez secos, las láminas se comprimen con una prensa de rodillos y luego se cortan con el ancho de los electrodos y se disponen para su bobinado.

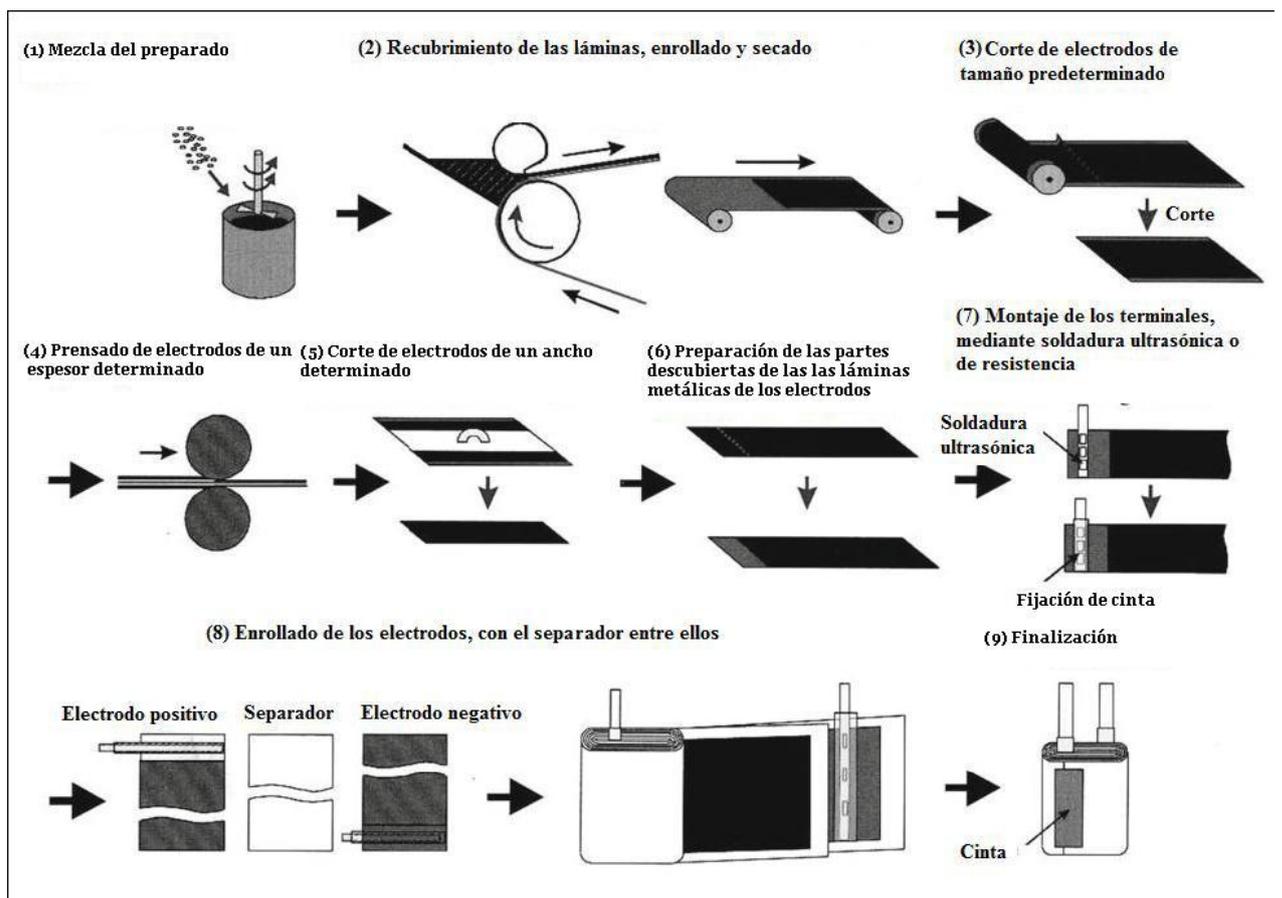


Fig. 15 – Proceso general de fabricación de los electrodos (Adaptado de Yoshio et al, *Lithium-Ion Batteries*, Springer, 2009)

4.3 – Fabricación de celdas cilíndricas

Para la fabricación de celdas cilíndricas, el proceso sigue con la construcción de su núcleo. Se disponen los rollos con los electrodos y el separador en una bobinadora, ajustando sus longitudes, anchos y espesores al diseño de la celda. (Fig. 16)

Antes del bobinado, se fija una tira de aluminio en la parte descubierta del electrodo positivo. Igualmente, se fija otra tira de níquel a la lámina de cobre del ánodo.

Se enrollan los dos electrodos, con el separador entre ellos, alrededor de un cilindro, formando el núcleo de la celda. Se deben evitar el desprendimiento de materiales activos e irregularidades durante el arrollamiento de la bobina para lograr la distribución uniforme de la corriente, que puede ocasionar defectos de la celda o reducir su vida útil. Antes de insertar el núcleo en el receptáculo de la celda, se comprueba la existencia de cortocircuitos. A través del cilindro, se inserta un electrodo de soldadura con el que se suelda la tira del ánodo al receptáculo de la celda.

Las operaciones se realizan en un ambiente seco o bien se coloca la celda en un horno durante un día para quitar el agua residual.

En el próximo paso, se llena la celda con el electrolito con un inyector al vacío, asegurando que se llenen por completo las porosidades de los electrodos y el separador. Este proceso debe ser efectuado con suma precisión en cuanto a la cantidad de electrolito.

Una vez llena, se tapa y se sella con un sello de compresión de polímero y se procede a la limpieza del electrolito adherido y a verificar que no existan fugas en el sellado.

Una inspección final y la identificación de la celda para futuras referencias, los materiales usados en su construcción y el procesamiento en la línea de montaje, son los últimos pasos. Finalmente, se somete a las celdas a un proceso de “envejecimiento” para clasificarlas según su capacidad y el futuro montaje en los bancos de baterías.

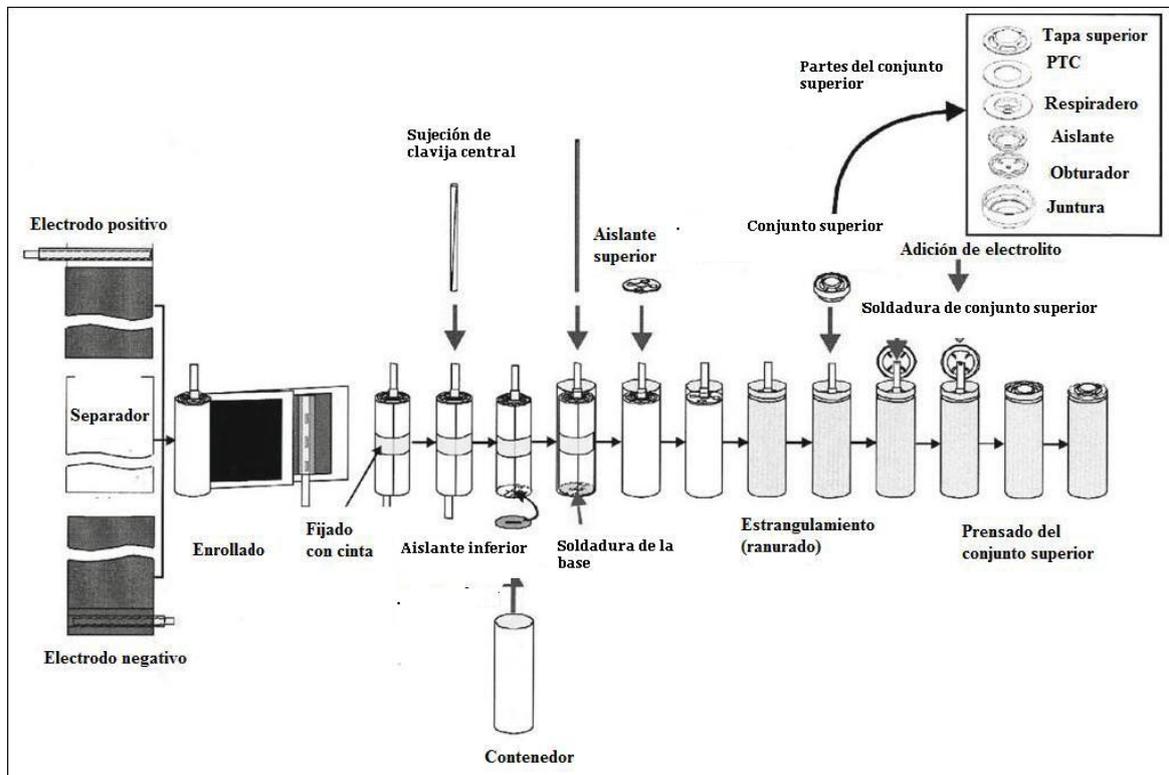


Fig. 16 – Esquema general de ensamblaje de celdas cilíndricas (Adaptado de Yoshio et al, *Lithium-Ion Batteries*, Springer, 2009)

4.4 – Fabricación de celdas prismáticas

Hasta la aplicación de la tapa, se sigue un proceso similar a las cilíndricas. Las prismáticas usan un receptáculo de aluminio para reducir su masa y de aluminio laminado para tener menos espesor. El electrodo positivo se suelda al receptáculo, luego se sueldan las conexiones y la tapa. Finalmente, se ubica la tapa y se sueldan sus contornos a la celda y el tubo que se utilizó para llenar de electrolito a la celda. (Fig.17)

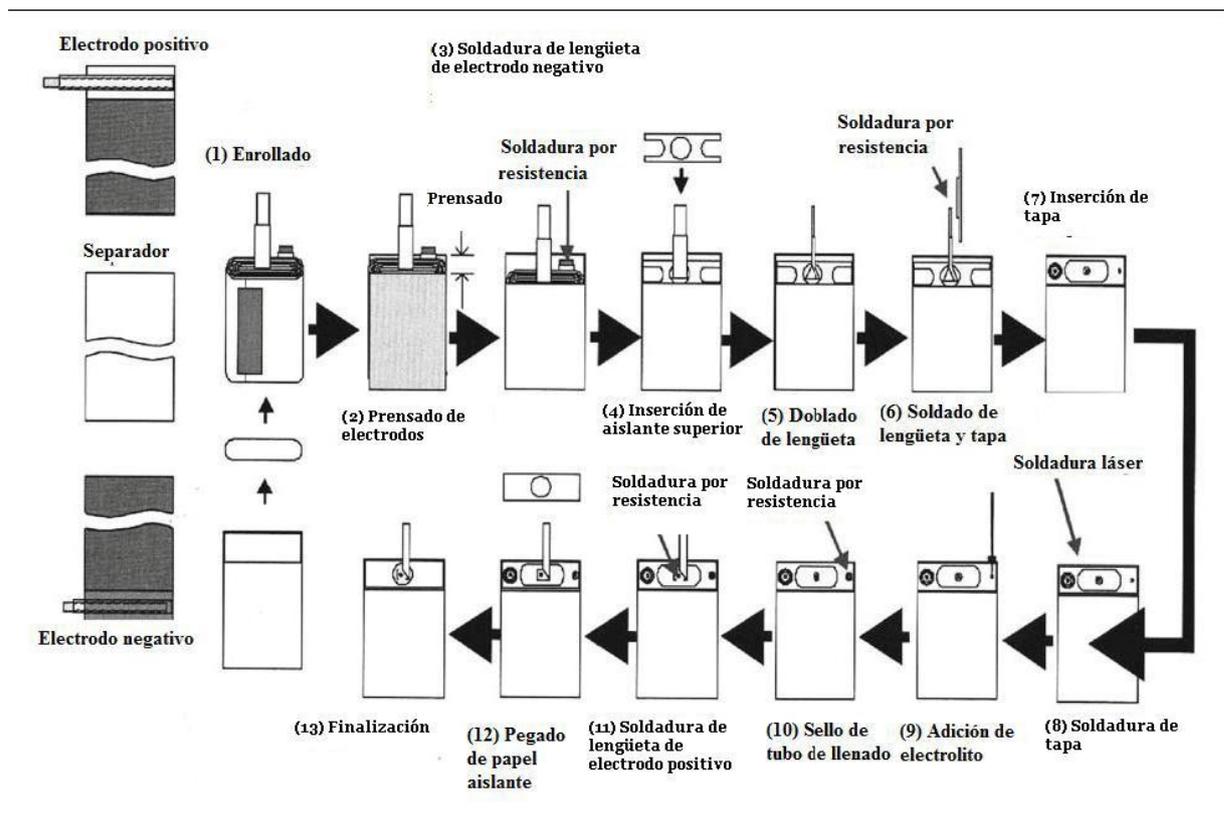


Fig. 17 – Esquema general de ensamblaje de celdas prismáticas (Adaptado de Yoshio et al, *Lithium-Ion Batteries*, Springer, 2009)

4.5 – Fabricación de celdas de polímero de ión-litio

Las celdas de polímero de ión-litio disponen de un polímero como adhesivo para mantener el electrolito y funciona como barrera entre los electrodos para evitar el cortocircuito. Su construcción es de placas prismáticas y laminares, con un proceso similar al descrito anteriormente.

Los rollos del ánodo, cátodo y electrolito de polímero se cortan de determinadas dimensiones, y después se apilan con capas de polímero, que se unen uniformemente con ultrasonido o calor. (Fig. 18)

Este tipo de baterías usa un ánodo de litio metálico, un polímero de polietileno, óxido de metal y una sal de litio. Una característica particular de las baterías de polímero de litio es el electrolito, que, fabricado por varios compuestos a partir de una membrana, se usa como separador. Con el fin de evitar la degradación de la batería, se agregan capas intermedias para que el ánodo no quede aislado eléctricamente.

Los métodos de recubrimiento de electrodos son los mismos. La construcción del núcleo de electrodos de la celda puede realizarse en un receptáculo, que puede fabricarse con un film estratificado de aluminio y polímero. El film se dobla por la mitad y se corta en piezas. Se adhiere y se inserta la pila de electrodos, para unir luego el receptáculo exterior. Se elimina la humedad, se inyecta electrolito de polímero y la celda se sella al vacío. Por último, se procede con la limpieza y revisiones mencionadas anteriormente.

Resumiendo, en el proceso de fabricación de baterías de polímeros de litio se procede a la aleación del ánodo y cátodo, con la extrusión, control y laminación del enrollado. Se controla la calidad en cada uno de los procesos, por la precisión requerida. El electrolito puede crearse en lámina o pulverizarse como una capa sobre el ánodo. Luego viene el devanado de la lámina con la geometría deseada, para pasar a la soldadura de los electrodos, realización de la carcasa y los recubrimientos aislantes y de protección.

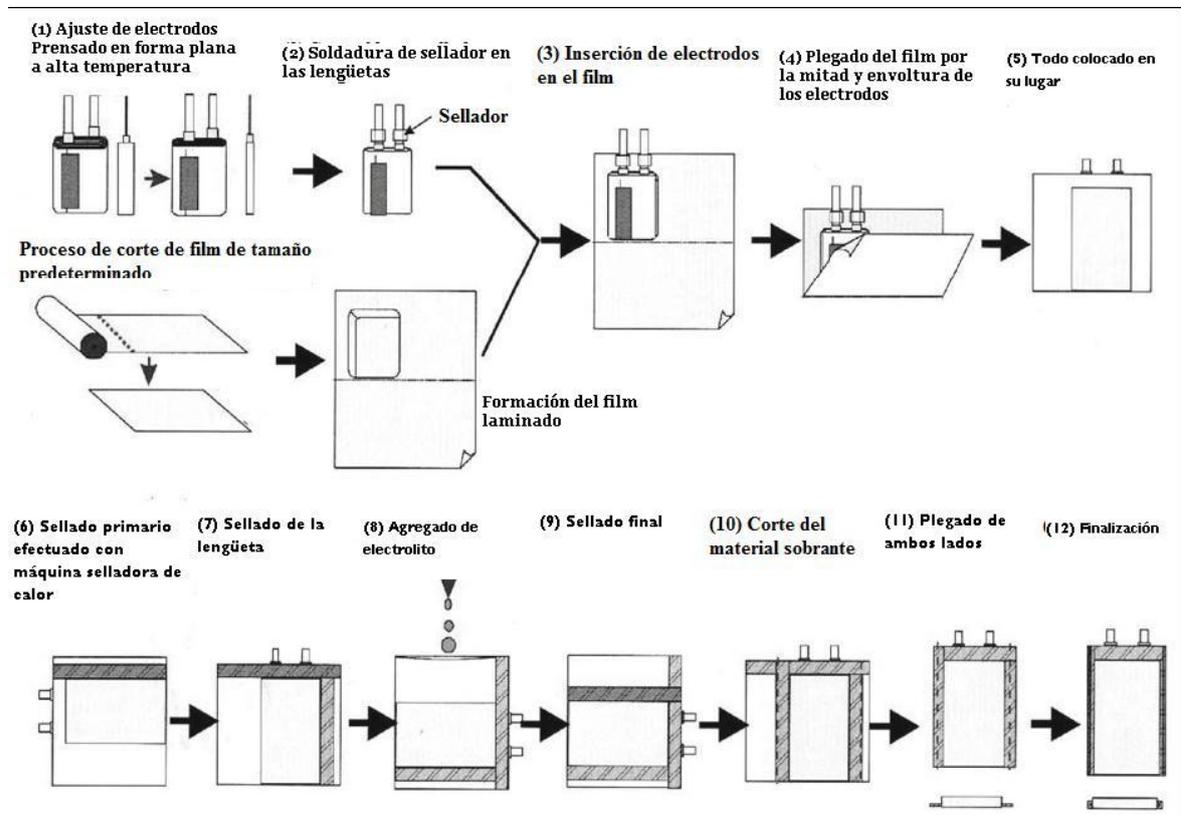


Fig. 18 – Esquema general de ensamblaje de celdas de ión-litio polímero (Adaptado de Yoshio et al, *Lithium-Ion Batteries*, Springer, 2009)

Un aspecto a tener en cuenta es la generación de una atmósfera controlada de protección, por cuanto se deben preparar los gases del entorno de trabajo. La línea de fabricación hasta el encapsulado debe protegerse de gases reactivos, de la humedad y de

la suciedad. Esto se logra con una sala acondicionada o líneas de producción aisladas. En el primer caso se controla la entrada y salida de aire de la habitación con sensores de condensación que regulan la humedad, para lograr que la atmósfera sea la correcta. La segunda opción consiste en aislar con una cámara cerrada, en la que se dispone la línea de producción de las baterías, del ambiente exterior. Son de difícil mantenimiento, vienen usualmente automatizadas con cajas de guantes para la manipulación de las piezas interiores sin afectar el litio. (Peña Ordóñez, 2011)

4.6 – Proceso de formación

Una vez que el montaje de la celda se completa, se da lugar al proceso de formación, que se aplica en todos los procesos de producción anteriormente especificados. Dado que las celdas de las baterías de ión-litio se fabrican totalmente descargadas, se necesita efectuar una primera carga para activarlas. Mediante el proceso de formación, se activan los materiales activos en los electrodos y se determina su funcionamiento.

Se mide la tensión en la celda luego de la formación y se almacena por un determinado tiempo, proceso denominado envejecimiento. Se registran valores de parámetros para control y posterior selección de las celdas por problemas de cortocircuitos y cambios en la capacidad o disminución de la tensión eléctrica.

Parte 5

5.0 – La iniciativa argentina

Como ya se mencionó en este trabajo, Argentina posee grandes reservas de litio con un excelente potencial para su explotación y desarrollo.

El objetivo general que se busca es la explotación del litio con incorporación del mayor valor agregado posible y que el país deje de ser solamente exportador de carbonato de litio. Con la utilización integral del litio, el objetivo final es que el país comience a fabricar baterías de litio para diferentes aplicaciones.

La incorporación del máximo valor agregado requiere que el litio se extraiga en el país y luego se implementen todos los pasos intermedios hasta alcanzar la fabricación de baterías, abastecer el mercado interno y también exportarlas. Algunos de esos pasos intermedios se han dado tendientes al inicio de la fabricación de baterías de litio.

5.1 – Estado, estructura productiva e infraestructura científico-tecnológica

Quizás uno de los precedentes iniciales fue el seminario “Utilización Integral del Litio en Argentina. Ciencia, Tecnología e Innovación al Servicio del Desarrollo”, llevado a cabo en abril de 2011 en San Salvador de Jujuy, organizado por el Ministerio de Ciencia, el de Industria y el Gobierno de Jujuy. Allí se anunciaron los planes para la promoción y el aprovechamiento integral del litio en nuestro país.

Seguido a la conformación de un grupo de trabajo multidisciplinario, integrado por investigadores de la CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica), la Universidad Nacional de La Plata a través del INIFTA (Instituto de Investigaciones Fisicoquímicas Teóricas y Aplicadas) y la Universidad Nacional de Córdoba con la Facultad de Ciencias Químicas y la Facultad de Matemática, Astronomía y Física.

Se intentó establecer un orden progresivo para el desarrollo de los materiales para la fabricación de las baterías, para luego poder pasar a la producción. El coordinador del proyecto “Del salar a la batería” lo explicaba así: “...En mayo de 2011 nos juntamos en Córdoba para ver qué sabíamos hacer respecto de las baterías de litio (iones de litio o polímeros de litio). Ahí nos dimos cuenta de que sabíamos mucho. Entonces armamos un programa nacional de lo que queríamos hacer. Lo primero que nos planteamos fue si podíamos hacer las pastas, es decir, los cátodos, los ánodos y los electrolitos. Y la respuesta fue que creíamos que sí. Otra pregunta fue: ¿podemos purificar litio? Y la respuesta fue que también que creíamos que sí, teníamos los investigadores trabajando en eso. ¿Tenemos empresarios? Sí, tenemos un grupo de empresarios cordobeses con conexiones en el NOA. Si conseguíamos el apoyo del gobierno nacional, entonces teníamos todas las piezas del triángulo de Sábato...” (La Nación, 2012)

Precisamente en el artículo “La ciencia y la tecnología en el desarrollo futuro de América Latina” de fines de la década de 1960, presentado en Italia, Sábato y Botana ponían de manifiesto las complejas interrelaciones entre el sector gubernamental, la industria y la investigación científica, fundamentales en la nueva economía del conocimiento y la innovación del mundo moderno. Dichas interacciones resultan clave para el eficaz desarrollo económico y social de una región.

Vale la pena rescatar un párrafo de dicho trabajo, conocido como el “documento del triángulo”, para ilustrar la necesidad que los autores vislumbraban en cuanto a la inserción de la ciencia y la tecnología en la estructura productiva del desarrollo latinoamericano, y las relaciones entre los protagonistas en el modelo de interacciones propuesto.

“...Enfocada como un proceso político consciente, la acción de insertar la ciencia y la tecnología en la trama misma del desarrollo significa saber dónde y cómo innovar. La experiencia histórica demuestra que este proceso político constituye el resultado de la acción múltiple y coordinada de tres elementos fundamentales en el desarrollo de las sociedades contemporáneas; el gobierno, la estructura productiva y la infraestructura científico-tecnológica. Podemos imaginar que entre estos tres elementos se establece un sistema de relaciones que se representaría por la figura geométrica de un triángulo, en donde cada uno de ellos ocuparía sus vértices respectivos...” (Sábato y Botana, 1968)

Quizás uno de los primeros trabajos internacionales que hizo uso de una figura geométrica para la ilustración de un modelo, establecía algunos fundamentos para delinear una política científica latinoamericana que diera respuesta a las demandas sociales y resaltar el poder transformador de la investigación científico-tecnológica en el desarrollo de la sociedad. Tomamos los argumentos esgrimidos por los autores en el texto para justificar la realización de investigación científico-tecnológica de manera duradera.

“.....

- a) La absorción de las tecnologías que todo país debe necesariamente importar, es más eficiente si el país receptor dispone de una sólida infraestructura, científico-tecnológica. Esta infraestructura –que más adelante será definida con más precisión- sólo, puede crearse, mantenerse y progresar a través de la acción propia de la investigación.
- b) El uso inteligente de los recursos naturales, de las materias primas, de la mano de obra y del capital, así como los problemas de las economías de escala, requieren investigaciones específicas para cada país.
- c) La transformación de nuestras economías para satisfacer la necesidad imperiosa de industrializarnos y exportar productos manufacturados, será tanto más cuanto más elevado sea nuestro potencial científico-tecnológico.
- d) La ciencia y la tecnología son promotores catalíticos del cambio social.

.....” (Sábato y Botana, 1968)

Esta descripción, aplicada a la posibilidad de fabricación de baterías de litio íntegramente nacionales, adquiere una dimensión actual y oportuna. Para ello, el rol que le cabe al Estado es fundamental en el estímulo, fomento y promoción de la explotación e industrialización del litio, acoplado a la efectiva participación del sistema científico-tecnológico argentino y la industria local.

Un trabajo interdisciplinario que obliga a una política de largo plazo para el desarrollo de productos manufacturados a base de litio. Nuestro país tiene que aprovecharlo de la mejor forma posible, lo que implica un eficiente mecanismo de relaciones entre la comunidad científica, las empresas y el Estado, a través de una política de vinculación tecnológica que lleve al desarrollo económico y social.

5.2 – Hacia la producción de baterías de litio

El proyecto de fabricación de baterías de litio en Argentina abarca otros dos objetivos previos, entre ellos la purificación del litio extraído del salar y la fabricación de pastas inorgánicas y polímeros a partir del carbonato de litio purificado al 99,6% para construir ánodos, cátodos y electrolitos, de modo de integrar toda la cadena de valor productiva con el desarrollo de la industria local y darle así un alto valor agregado.

Como primer paso, se determinó la factibilidad de hacer una batería de litio en laboratorio. Ello se logró mediante un experimento en República Checa, debido a la falta de un instrumental específico en el país, en el que se utilizó un electrolito de hexafluoruro de litio, con electrodos de grafito con litio y de fosfato hierro litio. A través de un proyecto de investigación y desarrollo, se trata de crear los laboratorios que permitan el desarrollo de las pastas usadas. (La Nación, 2012)

Ante la necesidad de llegar a la escala industrial, se determinó pasar directamente a la etapa de fabricar baterías de ión litio para celulares y computadoras personales, aunque con los materiales importados. Los insumos que se importan constituyen solamente el 20% del valor de la batería. "...Compramos los polvos afuera y el resto se hace en la fábrica. Así que salteamos dos etapas y pasamos a la parte más avanzada, la de la fabricación. Ya sabemos cómo se hace cada celda, lo que tenemos que hacer es la fábrica con las máquinas para fabricar las celdas. Y sabemos dónde comprar las máquinas para hacer esto. Hay polvos que se pueden comprar en el país y otros que no. Posiblemente el aluminio y el cobre se puedan conseguir acá, así que no habría necesidad de importarlos. La electrónica la armamos nosotros, importando los

componentes que no se hacen acá, como el microcontrolador. Pero la placa y la inserción se hacen en Córdoba. Lo que tiene litio se hace en las provincias productoras de litio: Salta, Catamarca y Jujuy. Hay que reactivar esa región. Ese es el acuerdo al que llegamos, para reflotar estas economías regionales. Que las baterías se fabriquen en las provincias productoras de litio...” (La Nación, 2012)

La fabricación de baterías de litio con celdas producidas en el país, supone una inversión de unos 30 millones de dólares. Este proyecto representa una demanda de laboratorios y profesionales. La construcción de una planta para la purificación del carbonato de litio, para la producción a escala industrial, necesitaría de una inversión de 200-300 millones de dólares. (Ministerio de Industria, 2012)

Durante el proceso de fabricación de los electrodos de las celdas, se puede cambiar las pastas que van en los polos de las baterías y, al cambiar las sustancias, se logra cambiar las propiedades y la obtención de baterías de diferente tipo. Las puede haber que resistan temperaturas muy bajas, otras que trabajen a altas temperaturas o bien para aplicaciones en satélites en el espacio. (Acosta et al, 2011; Collet Lacoste y Lamagna, 2011)

A fines de 2012 comenzó el montaje de la planta industrial en El Pantanillo, Catamarca, cercana al Salar del Hombre Muerto, para la fabricación de baterías con celdas importadas. En una primera etapa prevé producir 400.000 baterías de litio, con planes de ampliación en el futuro. El proyecto incluye a la Universidad Nacional de Catamarca, en cuanto a la formación de recursos humanos y la prospección de salares. (El Ancasti, 2012)

Al plan de ensamblar componentes importados de la primera etapa, vendría la incorporación de las celdas de diseño propio. Para esto, se debe homologar el sistema de fabricación y la integración con la planta de purificación del carbonato de litio que resulte apto para las baterías. (América Economía, 2012)

5.3 – Factibilidad de fabricación de celdas de ión-litio

En nuestro país, diversos institutos y organismos científicos están abocados a las investigaciones que permitan el desarrollo y la construcción de celdas de ión-litio, tendiente a la producción de baterías de litio.

La investigación de las baterías de litio implica un trabajo multidisciplinario de la ciencia y la tecnología, que supone participación de la física (procesos de inserción-desinserción, estudio de sólidos), la química (electroquímica, películas, polímeros), la ciencia de los materiales (estudio de electrodos, electrolitos, óxidos) y la ingeniería (diseño, electrónica, nano-tecnología) en su conjunto. (Calvo, 2011)

Varios grupos de investigación de la CNEA, sumados a institutos y universidades, vienen trabajando en el desarrollo de celdas ión-litio, que incluye los componentes principales (electrodos y electrolitos), procesos y materiales, la caracterización y el desarrollo de prototipos. (Collet Lacoste y Lamagna, 2011)

Dichos desarrollos se enmarcan en la investigación básica y aplicada, de modo de materializar la labor en un producto que se pueda transferir a la industria. En el caso de

la producción de baterías de litio, se deberían ejecutar estudios de factibilidad técnico-económica para la producción a escala de planta piloto.

Esto implicaría el análisis de las baterías, caracterización, materiales, el estudio de disponibilidad de los materiales en el mercado, la existencia de los equipos y sus costos, al igual que la gestión de los recursos humanos y económicos.

De acuerdo con los expertos, se estaría en condiciones de desarrollar productos en los próximos años (Fig. 19). Para ello se debería realizar el estudio de factibilidad técnico-económica para las baterías de litio y desarrollar un primer prototipo competitivo para la transferencia de tecnología a una industria local. (Collet Lacoste y Lamagna, 2011)

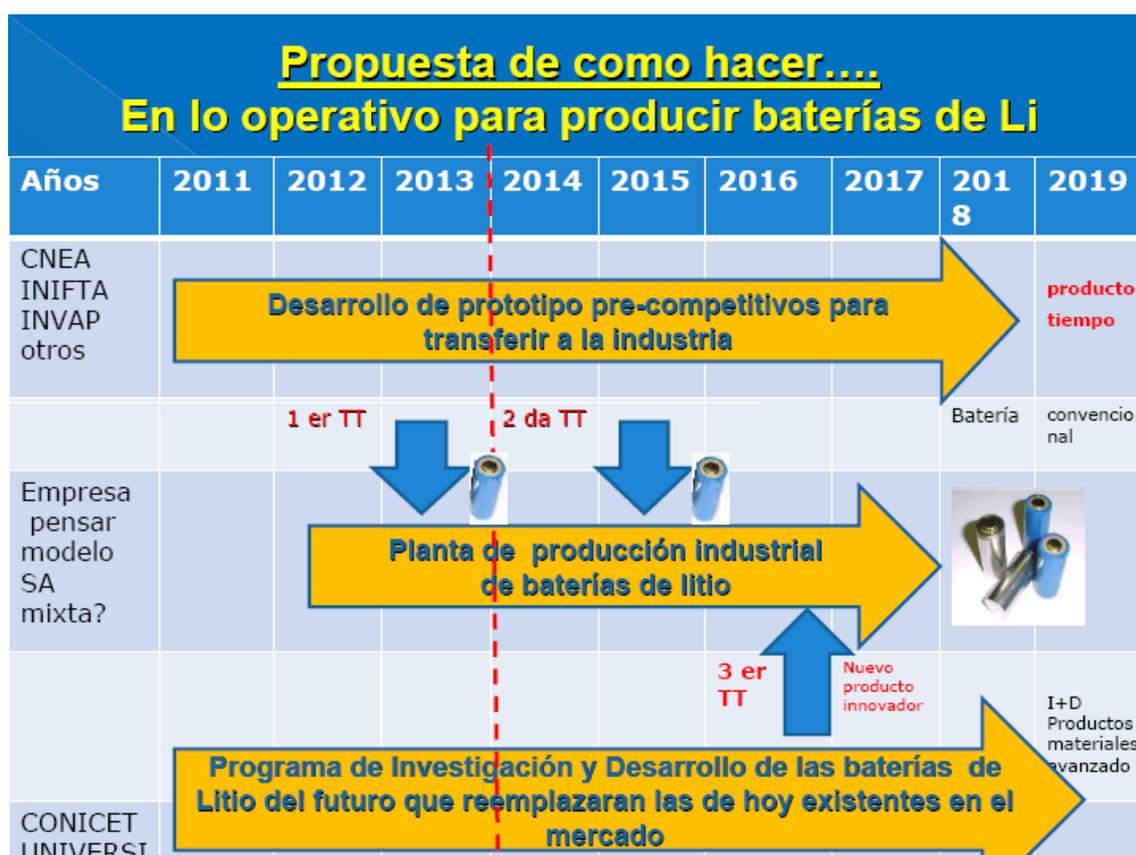


Fig. 19 – Propuesta de producción de baterías de litio y transferencia tecnológica

(Fuente: Collet Lacoste y Lamagna, 2011)

Posteriormente se desarrollaría la etapa final consistente en la fabricación comercial de diferentes modelos de baterías de litio.

5.4 – Prototipos de baterías de litio para vehículos

Uno de los objetivos primordiales continúa puesto en el desarrollo de baterías de litio orientado a la industria automotriz.

Un proyecto a mencionar es el del INIFTA-CONICET de la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de La Plata, junto a otros institutos de investigación de esa casa de estudios, en el que se intenta el desarrollo de un prototipo de batería de litio para vehículos eléctricos. El mismo incluye el diseño del prototipo de la batería recargable de litio, como asimismo el diseño de los materiales propuestos para los electrodos que puedan almacenar energía electroquímica y el modelado de carga/descarga de la batería. (Visintin et al, 2011)

Los investigadores de La Plata lograron, a fines de 2011, hacer rodar la primera motocicleta eléctrica del país usando una batería de litio. La batería constaba de 60 celdas de litio y las primeras pruebas se efectuaron en una motocicleta eléctrica de origen chino, que pudo llegar a una velocidad máxima de 60 km/h y una autonomía de 60 km diarios con un tiempo de recarga entre 4 horas (carga rápida) y 8 horas (carga lenta) proveniente de un tomacorriente convencional de la red eléctrica. El dispositivo pesa solamente 12 kilos, unas cuatro veces menos que una batería tradicional de plomo-ácido para automóviles. (UNLP, 2012)

Otro de los proyectos destacables es el “Proto-Litio” (Fig. 20), vehículo experimental propulsado con baterías de litio desarrollado por la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) dependiente del Ministerio de la Producción, Ciencia y Tecnología de la Provincia de Buenos Aires, la Universidad Nacional de La Plata, el Instituto de Investigaciones Físico-Químicas, Teóricas y Aplicada (INIFTA) del CONICET y el Grupo de Ensayos Mecánicos Aplicado (GEMA).

El vehículo, en forma de triciclo, el primero en Latinoamérica impulsado por baterías de litio, a fines de 2012 unió las ciudades de La Plata y Mar del Plata con una velocidad promedio de 35 km/h y una potencia de 7.500 kilovatios para cubrir los 400 kilómetros de distancia.



Fig. 20 – Vehículo experimental “Proto-Litio”

(Fuente: Comisión de Investigaciones Científicas, Provincia de Buenos Aires)

Estos proyectos de vehículos propulsados usando sistemas de almacenamiento de energía a base de celdas de litio, sobre los que no existe experiencia previa a nivel nacional, son de una gran innovación y originalidad. Si se tiene en cuenta la alta

densidad de energía de estos sistemas de almacenamiento, al igual que el desarrollo de prototipos de celdas de ión-litio a partir de los elementos constituyentes, las propuestas son un impulso al uso de vehículos ecológicos y un estímulo para la producción comercial de baterías de litio recargables con fuentes de energía alternativas, ya sea hidráulica, eólica o solar.

5.5 – Otros desarrollos

El almacenamiento y transporte de energía resulta crítico en el uso de las energías renovables, en la alimentación de dispositivos electrónicos y en los vehículos eléctricos, tanto los que son totalmente eléctricos como los híbridos.

Las baterías de ión-litio no resultan las más apropiadas para los vehículos, ya que ante una sobrecarga pueden explotar e incendiarse. Otro problema es que no son competitivas frente a la nafta en cuanto a la alta densidad de energía que se requiere. La única que puede equipararse es la batería de litio-oxígeno, pero es una batería primaria que no puede recargarse. Desde hace años se le dedica una fuerte investigación para hacerla recargable y su desarrollo no está exento de varias dificultades. (Calvo, 2011; Gallardo, 2011)

Esto ha llevado a profundizar en la investigación de las baterías de litio-oxígeno que sean recargables para vehículos. Una batería de este tipo está constituida por una delgada película de litio metálico como ánodo, una delgada película porosa de carbono y oxígeno del aire como cátodo, y un polímero conductor de ión de litio como

electrolito. Estos dispositivos alcanzan una densidad de energía de unos 40 MJoul/kg, cercanos a los 44 MJoul/kg de la gasolina. (Calvo, 2011)

Como parte de ese reto, se desarrolló en septiembre de 2012 en la Ciudad de Buenos Aires el Simposio Internacional “Desafíos en las baterías recargables de litio-oxígeno”, organizado por el INQUIMAE (Instituto de Química de los Materiales, Medio Ambiente y Energía de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA), con el auspicio del CONICET, la Fundación Argentina de Nanotecnología, la *International Society of Electrochemistry* y el Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Nación.

El evento científico, que contó con importantes expertos y disertantes del extranjero, tuvo como meta la discusión de las más recientes investigaciones y las tecnologías de vanguardia de las nuevas baterías recargables de litio-aire en el mundo. Uno de los aspectos importantes está dado por la cuestión referente a los cátodos de aire litio, que impactarán directamente en las tecnologías de baterías recargables que proporcionen alta capacidad y densidad de energía para el uso en vehículos eléctricos. (INQUIMAE, 2012)

La fabricación de litio metálico, usado en las baterías, es una tecnología que nuestro país estaría en condiciones de disponer. La empresa Laring de Buenos Aires, dedicada principalmente a procesos para tratamientos de superficies y con cuatro décadas de trayectoria en el mercado, fue la primera en obtener litio metálico en pequeña escala a mediados de 2012 en un proyecto conjunto con la firma Clorar Ingeniería de Santa Fe, *spin-off* de la Universidad Nacional del Litoral. (Bronstein, 2012)

Desde principios de 2012 cuando se inició el proyecto de asociación, en sólo un par de meses se llegó al litio metálico, lo que da cuenta de la capacidad tecnológica y la posibilidad de alcanzar la producción industrial en el país para la utilización del litio en las baterías de alta densidad. El inicio de la etapa del desarrollo comercial dependería del apoyo que se logre, de modo de poder alcanzar el mercado.

La empresa ya integra un cluster tecnológico para el diseño, caracterización y fabricación de nano-materiales y superficies nano-estructuradas (Fig.21). Esta plataforma tecnológica incluye al litio como tema estratégico a desarrollar y la posibilidad de uso de nano-partículas de carbono en los electrodos de grafito utilizados en las baterías de litio, con el objetivo de aumentar su rendimiento. El objetivo de la firma es la industrialización del litio desde su extracción y la obtención de sales de litio destinadas al armado de las baterías. (Bronstein, 2013)

**CLUSTER NANOTECNOLOGICO PARA EL DISEÑO,
CARACTERIZACION Y FABRICACION DE NANOMATERIALES
Y SUPERFICIES NANOESTRUCTURADAS**

INQUIMAE INQUIMAE - CONICET - DQIAQF FCEN UBA RheinChemie RHEIN CHEMIE

CNEA GRUPO DE QUIMICA DE NANOMATERIALES CNEA Laring LARING

**TRANSFERENCIA TECNOLOGICA
DE LA CIENCIA ARGENTINA A LA INDUSTRIA ARGENTINA**

Proyecto FONARSEC-FS nano - ANPCyT - Mincyt - Presidencia de la Nación.

AGENCIA NACIONAL DE PROMOCION CERTIFICADA Y TECNOLOGICA PRESIDENCIA DE LA NACION ARGENTINA

Fig. 21 – Cluster nanotecnológico empresa Laring (Fuente: Bronstein, 2012)

Otra empresa que viene trabajando en el tema es EnerLitio, perteneciente al grupo Temet, en Salta, que a principios de 2012 comenzó con la producción industrial de baterías de ión-litio para uso aeronáutico. Son de tipo prismático y alimentan arrancadores portátiles de aviones y helicópteros.

Con más de 30 años de experiencia en el sector industrial de maquinaria electromecánica y una fuerte inversión en investigación y desarrollo, la empresa enfoca su gestión en la fabricación de productos de alta innovación tecnológica. La producción de baterías de ión-litio se lleva a cabo con componentes importados y alcanza a unas 250 unidades cada 90 días. Actualmente investigan la posibilidad de fabricación de baterías de litio para aplicaciones vehiculares e industriales, al igual que la producción de sus componentes de modo de sustituir importaciones. (Galloni, 2013)

5.6 – Planta experimental en Córdoba

El proyecto “Del salar a la batería” reúne un presupuesto de 3.600.000 pesos proveniente de un subsidio del Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Nación y el apoyo de empresas participantes. (La Voz del Interior, 2013)

El proyecto concluyó a mediados del año 2013 su etapa investigativa –que estaba estimada originalmente en cuatro años- en un año y medio, y se propone pasar al plano productivo. Para ello, en los próximos meses el grupo de investigación pondrá en funcionamiento una planta experimental en la ciudad de Córdoba que permita comenzar

la experiencia de la fabricación de baterías de ión-litio en serie. (La Voz del Interior, 2013)

Se lograría la celda de ión-litio de la batería, que requeriría de la importación de los óxidos, electrolitos y separadores. El monto máximo de inversión para la implantación de la planta experimental sería de unos 10 millones de pesos y, una vez montada, el objetivo es llegar a producir unas 20 baterías de litio diariamente con el fin de evaluar las características que debería tener la planta industrial, la inversión que requerirá y el volumen de producción al que se llegaría con el desarrollo de la tecnología propia. (La Voz del Interior, 2013)

De esta forma, se consolidaría así otro paso tendiente a la producción de las baterías de litio en el país y el montaje de la planta final de fabricación, previsto en una de las provincias productoras de ese mineral, se convertiría en un acontecimiento de gran relevancia.

Las baterías de litio para automóviles que se producirán en el futuro, de acuerdo con las previsiones del mercado, tendrían un valor de hasta 15.000 dólares por unidad. Si bien el mercado al que se orientará este proyecto es el de los autos eléctricos, las baterías de litio que se podrán fabricar estarían en condiciones de adaptarse a cualquier aplicación que requiera baterías de alta duración y otras pequeñas como las que usan las computadoras portátiles y los teléfonos celulares. Otro mercado con gran potencial es la fabricación de baterías para molinos eólicos y paneles solares.

Parte 6

6.0 – Cadena de valor y perspectivas

El litio, como se ha manifestado en este trabajo, tendrá mayor protagonismo en los años venideros y la producción de baterías de litio irá en aumento para satisfacer el mercado de consumo electrónico y la industria automotriz de vehículos eléctricos o híbridos.

En Argentina ya se han dado pasos importantes para la producción de baterías de litio, aunque no están integradas con componentes fabricados localmente. La puesta en marcha de la planta piloto, en Córdoba, permitirá establecer las características de la planta industrial y el volumen de producción en serie que se alcanzaría con tecnología desarrollada en el país.

Para evaluar las necesidades de logística y transporte que satisfagan el proceso de producción en forma eficiente, se requieren datos y resultados reales de los cuales no se dispone. Es de suponer que la mejor estrategia sería localizar la planta productora de baterías de litio cercana a la zona del salar y la planta de producción de carbonato de litio, de modo de disponer del insumo en forma inmediata y con los menores costos de transporte. (Fig. 22)



Fig. 22 – Flujo de proceso para la fabricación de baterías de ión-litio

(Fuente: INTI - Procesos Superficiales, tomado de MECON, 2011)

También se deberá analizar los costos de traslado de las materias primas desde sus orígenes hasta la planta de producción.

En el aspecto industrial, se necesita una planta para el armado de las baterías y la fabricación de todas las partes que la integran. Eso requiere coordinar la producción de distintas unidades productivas para la fabricación de las celdas; el material activo del ánodo y del cátodo; el electrolito; los separadores; las planchas de aluminio y cobre; los controladores electrónicos.

6.1 – Cadena de valor del sector minero

El sector minero en Argentina posee una cadena de valor productiva que muestra múltiples actividades relacionadas y que ofrecen una gran contribución al desarrollo económico en varias facetas. (CAEM, 2012)

En los entornos a los establecimientos mineros se generan dos posibilidades: una relación con proveedores locales de bienes y servicios, y otra directamente con los clientes de productos finales. Esas relaciones tienen eslabonamientos que forman parte de la cadena productiva o cadena de valor de la actividad minera. Los eslabonamientos “hacia atrás” se refieren al primer caso y los eslabonamientos “hacia adelante” al segundo caso. (CAEM, 2012)

Esos vínculos hacen al entramado productivo y si resulta de alta o baja integración nacional, es decir, el grado de participación que tienen en la economía en términos de tracción de la demanda y un efecto preponderante en el valor agregado. En la baja

integración nacional están los que llevan actividades críticas, su producción se exporta totalmente en forma de concentrados o después de procesos primarios que generalmente se efectúan en los mismos establecimientos mineros de las empresas operadoras. La explotación del litio en Argentina cae bajo esta última denominación.

Las empresas multinacionales operan con procesos productivos de gran tecnología, lo que puede trasladarse a sus proveedores y así generar estímulo en que alcancen productos y procesos de calidad e incrementen tanto la productividad como la competitividad. Además del desarrollo de un entramado de proveedores locales, que genera un mayor valor agregado en la economía nacional, otro de los factores que pueden aportar las grandes empresas internacionales son los efectos de derrame sobre la tecnología. Estos son beneficios para los eslabonamientos, como las economías de aglomeración surgidas de clusters tecnológicos y economías de escala dinámicas.

Estas estimaciones se realizan sin datos y teniendo en cuenta que muchos proyectos del litio están en etapas de entrada de producción o bien se encuentran en fase de factibilidad o construcción. Esto es inherente a la minería, dado que resulta una actividad cuyos tiempos de ejecución son a largo plazo y que requiere grandes inversiones de capital. Así, los proyectos quedan expuestos a cambios en las condiciones iniciales que se planificaron y evaluaron las inversiones.

6.2 – Incidencia de costos

La industria de las baterías de ión-litio para automóviles está en aumento permanente, con los desafíos de afrontar los costos de energía y suministros que conviertan en

comercialmente viables a los vehículos eléctricos. El análisis de la tecnología actual de las baterías de ión-litio implica la identificación de todos los materiales y componentes que hacen al proceso de fabricación y los costos asociados.

Se especificará a continuación el desarrollo de un modelo de costos, tomado del trabajo “*An Evaluation of Current and Future Costs for Lithium-Ion Batteries for Use in Electrified Vehicle Powertrains*”, de David Anderson, de la *Duke University* en los Estados Unidos. Dicho modelo a su vez está basado en otras investigaciones académicas con líneas de trabajo específicas en el tema.

En el mismo se consideran los costos de materiales, de fabricación, y otros debidos a los costos fijos de la organización así como la investigación y desarrollo, que es fundamental en los costos de baterías de ión-litio. (Anderson, 2009)

Se debería desarrollar el cálculo de los costos de las baterías de litio con destino a los vehículos. Esto incluye los requerimientos de materiales por año, entre ellos la energía, capacidad, número de celdas y sus parámetros. Además, los costos de bienes de capital, detalles de la planta y los laborales para cada paso del proceso de manufactura. (Nelson et al, 2009)

Una vez que se determine el proceso de fabricación de la batería y se identifiquen los costos, en el nivel de integración se pueden considerar tres categorías: los materiales, la fabricación, y otros generales (entre los que se incluyen costos fijos de la planta, investigación y desarrollo, estudios de mercado, transporte y ganancias). Cada una de estas categorías se puede desagregar en niveles: el de la celda, el módulo y el paquete de

componentes. A su vez, los materiales a nivel celda se pueden dividir en materias primas para el cátodo, el ánodo, el separador y el electrolito. (Anderson, 2009)

Todos esos pasos permitirían el cálculo de un paquete completo de baterías de ión-litio de alta densidad de energía para vehículos. Los insumos en materiales (Fig. 23) representan un 75% del costo de producción de las baterías de ión-litio. Y en el caso de la celda, un 85% de los materiales influyen en su costo. (Anderson, 2009)

Si se tiene en cuenta la incidencia que representan los materiales en el costo de fabricación de la celda de ión-litio, se observa la importancia de la necesidad de producción local de los insumos básicos para evitar su importación. Eso permitiría aumentar la rentabilidad en la producción de las baterías de litio.

El factor de más incidencia en el costo de materiales en el nivel celda es el ajuste o regulación del rendimiento de las celdas, que representa el costo extra debido a las celdas de las baterías que no cumplen con los altos requisitos de control de calidad exigidos por la industria automotriz. (Anderson, 2009)

El segundo factor más significativo en el nivel de celda es el material activo del cátodo. Otros ítems que influyen en el costo están dados por la sal de litio usada en el electrolito y el grafito usado en el ánodo. (Fig. 23)

El factor más dominante en el costo de los materiales a nivel módulo es el costo de las mismas celdas, seguidas del costo del módulo y los terminales. En el nivel paquete de baterías, el principal factor se puede atribuir al costo del ensamblaje. (Anderson, 2009)

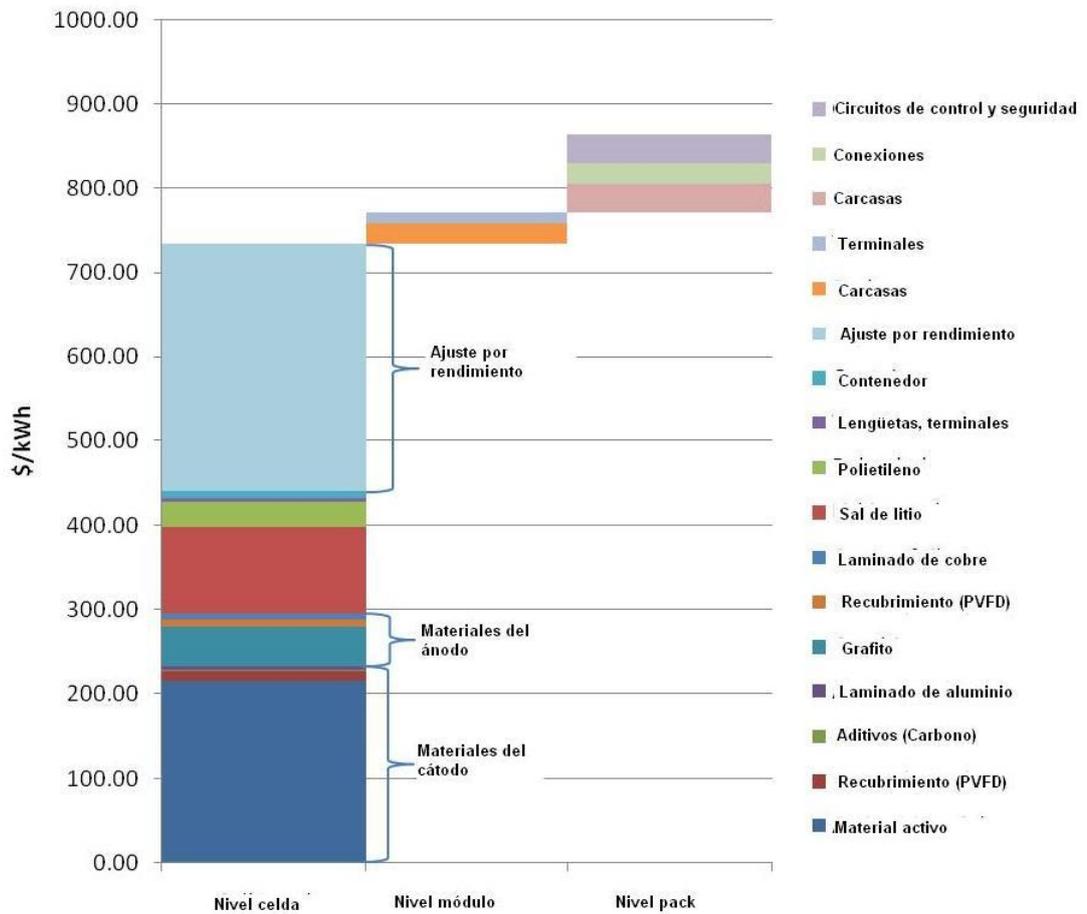


Fig. 23 - Distribución de costos de materiales para baterías de ión-litio (Adaptado de Anderson, 2009)

Al igual que el desglose de costos en materiales, el factor de más incidencia en el costo de fabricación (Fig. 24) a nivel celda es el ajuste o regulación del rendimiento de las celdas. Los costos de fabricación en los niveles de módulo y pack se componen del ensamblado en cada etapa de integración. (Anderson, 2009)

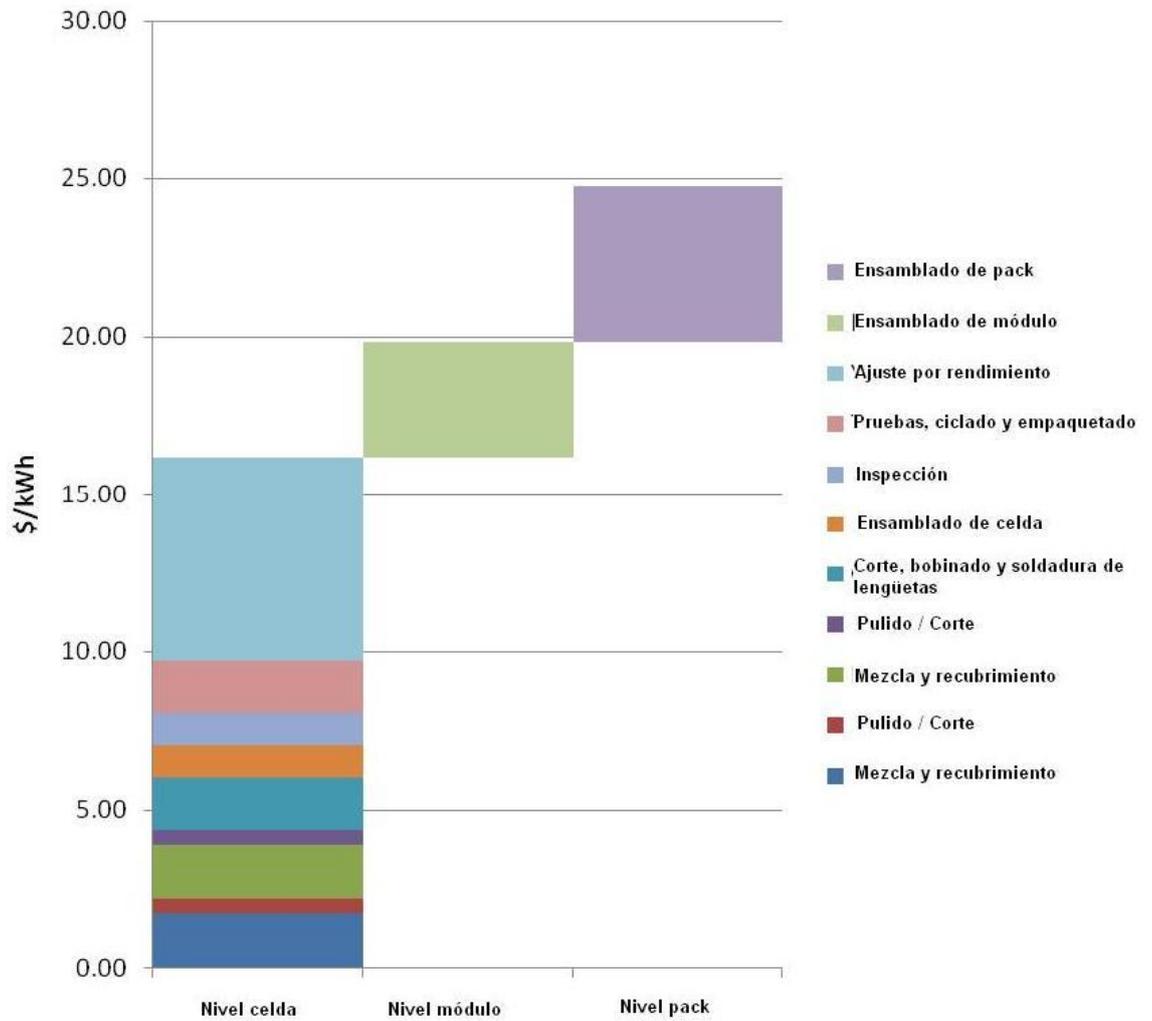


Fig. 24 – Distribución de costos de fabricación para baterías de ión-litio (Adaptado de Anderson, 2009)

En la categoría “otros generales” (Fig. 25) no se atribuyen costos en el nivel módulo porque se asume que la producción de módulos se lleva a cabo por el fabricante de celdas o de packs. El grueso de los costos a nivel celda en esta categoría se debe a investigación y desarrollo, mientras que a nivel pack los costos de garantías y ganancias del fabricante de baterías son los de mayor incidencia. (Anderson, 2009)

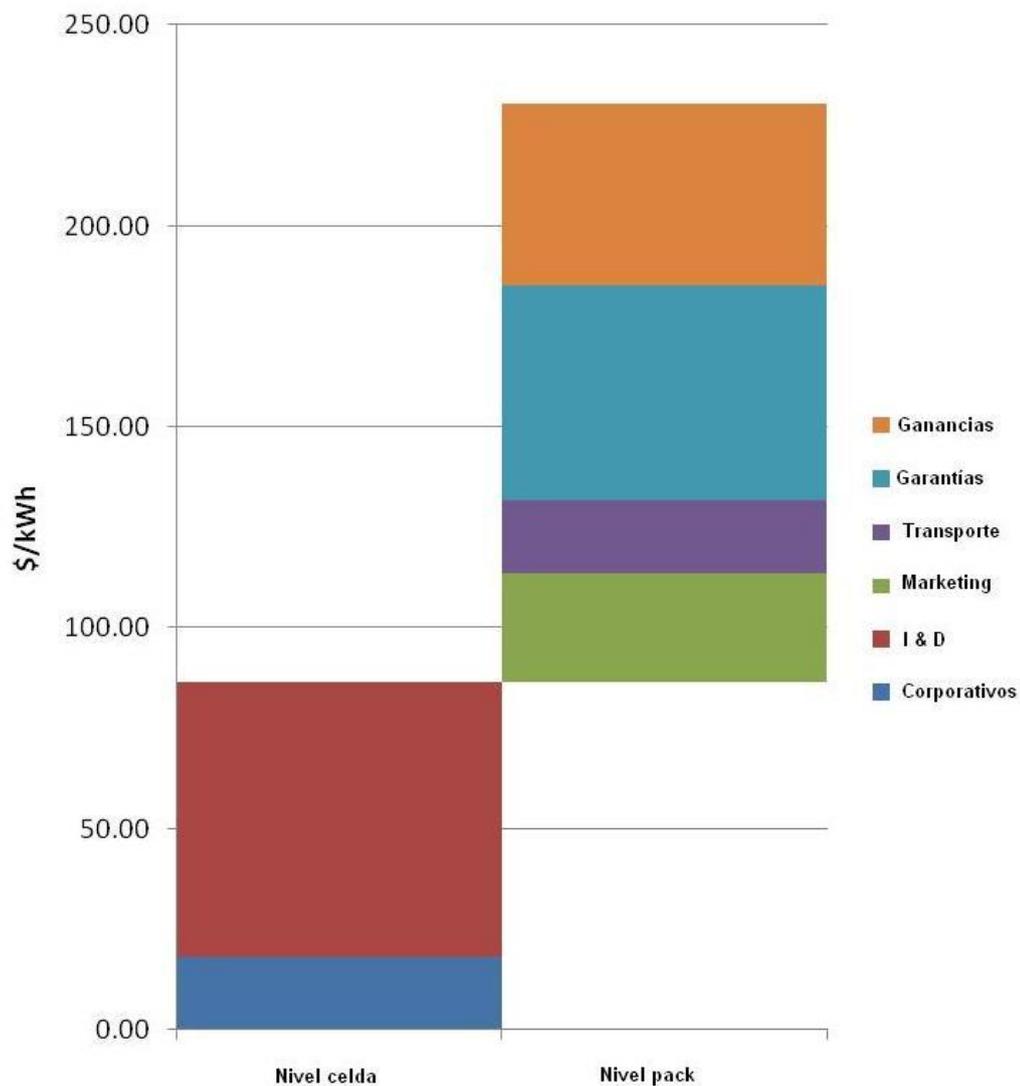


Fig. 25 - Distribución de costos “otros generales” para baterías de ión-litio (Adaptado de Anderson, 2009)

En una evaluación de la estructura de costos de las baterías de ión-litio en el modelo de costos analizado, es de suma importancia comprender el efecto de los cambios de costos de cada componente sobre el costo global de la batería. De acuerdo con el impacto de costos pormenorizado, los elementos que tienen más influencia en el costo total de la batería son la regulación del rendimiento de las celdas, la investigación y desarrollo de las celdas, el material activo del cátodo, la sal de litio utilizada en el electrolito y el grafito para el ánodo.

Si bien una reducción en el costo del componente que tiene mayor incidencia tendrá el mayor impacto en el costo global de la batería, se debe hacer notar que la reducción en costos de solamente uno de los componentes de más influencia no se traducirá en reducciones significativas en el costo total de la batería. (Anderson, 2009)

Según estudios realizados, para un valor determinado de almacenamiento de energía en un pack, un número pequeño de celdas de alta capacidad es mucho más barato de fabricar que una gran cantidad de celdas de baja capacidad. Otro factor de costo importante es el estado de carga o disponibilidad de energía que ofrece la celda. La elección de la composición de la celda dependerá más de la confiabilidad, la seguridad y la vida útil que del costo inicial. (Nelson et al, 2009)

Si se desea lograr una reducción importante de costos, debe implementarse a través de una mejora de productividad sumada a reducciones en los costos de varios materiales, procesos y costos asociados.

Las reducciones de costos de las baterías de litio pueden deberse fundamentalmente a dos motivos: economías de escala asociadas con gran volumen de producción o cambios tecnológicos. (Anderson, 2009)

En los cambios tecnológicos prima fundamentalmente la intensa investigación en los materiales activos y los diversos desarrollos en nano-tecnología, que permiten suponer avances novedosos para los próximos años.

Una dificultad del análisis estriba en que el procesamiento de los materiales es difícil de separar del costo de los materiales y, por lo tanto, se incluye en éstos. Además, el costo de procesamiento de los materiales cambia en forma muy pronunciada con los diferentes materiales por lo que se lo considera específico. Las nuevas técnicas de procesamiento podrían disminuir los costos de los insumos. (Daniel, 2008)

Como ejemplo, para un proceso completo de producción de una celda cilíndrica típica que abarca todas las etapas correspondientes, en el caso de producir 100.000 unidades anuales, requiere unas 100 personas trabajando en dos turnos. El costo total llegaría a casi dos dólares por celda y escalado a las baterías para vehículos híbridos, resultaría en unos 1.700 dólares. Un cálculo estimativo para las baterías eléctricas arrojaría 17.000 dólares por batería. Estos valores muestran el gran esfuerzo necesario para reducir costos de procesamiento y de materiales. (Daniel, 2008)

6.3 – Costo ambiental

Un costo que tal vez se deja de lado en el análisis es el asociado al impacto medioambiental, que debería también incluirse. El impacto medioambiental del transporte de las materias primas y baterías trae aparejado la emisión de gases de efecto invernadero. Así, se deberían computar las emisiones por distancias recorridas desde sus orígenes hasta los lugares de ensamblaje o fabricación.

Las etapas del proceso de fabricación suponen diversos impactos medioambientales, que se pueden considerar en forma fija o variable. Los fijos se originan por las propias

actividades que intervienen y los variables están dados por el número de productos fabricados y su transporte entre etapas. (Mayol Suárez, 2012)

El proceso de fabricación implica que los productos puedan transportarse entre las actividades, por lo que se debe tener en cuenta el transporte con gastos e impacto medioambiental asociado a cada producto trasladado y que puede ser de diferente valor de acuerdo con el producto. Las distancias que recorren los productos entre actividades, al igual que los medios de transporte que se usan, son de gran importancia ya que de esos factores surge el costo e impacto medioambiental generado. (Mayol Suárez, 2012)

Con el objetivo de llevar a cabo una evaluación de impacto ambiental, se debe analizar diferentes ítems relacionados: los residuos generados, la emisión de ruidos y el efecto del transporte de los materiales. Un indicador útil es la emisión de dióxido de carbono de cada etapa, por cuanto ofrece una comparación imparcial del impacto medioambiental de todo el proceso productivo. (Mayol Suárez, 2012)

Por último, otro aspecto a considerar en el futuro es el reciclado de baterías y la reutilización del litio que se encuentra en ellas. Esta posibilidad ya ha sido anticipada por los especialistas e influirá en el mercado del litio en los próximos años.

Una vez finalizado el ciclo de vida de una batería, cuando alcanzó el 80% de su capacidad original o aproximadamente mil ciclos de carga/descarga, se puede reacondicionar para otros usos. El volumen del litio reciclado es aún muy pequeño. Si bien se considera que las celdas de ión-litio no son peligrosas, poseen metales como aluminio, cobalto, cobre, hierro, manganeso, al igual que plásticos. (Axeon, 2010)

La falta de una legislación adecuada para el reciclaje de las baterías de litio y su disposición final aumentan el riesgo de daño ambiental ocasionado por las baterías de uso en automóviles. Este riesgo no sólo es consecuencia de una disposición final inapropiada de las baterías, sino del incremento de la producción de sus componentes principales. (Lowe et al, 2010)

Algunos estados de los Estados Unidos, entre ellos California y Nueva York, ya han introducido regulaciones sobre la disposición final de baterías de litio. Hasta 2010 no existía legislación en ese país que fije regulaciones para el reciclaje de las baterías de ión-litio, solamente las baterías de ácido-plomo y las de níquel-cadmio tienen especificaciones sobre su disposición final. (Lowe et al, 2010)

De igual forma, en los países latinoamericanos no existe legislación al respecto. Se han llevado a cabo reuniones conjuntas para el manejo ambiental de pilas y baterías que tenga en cuenta los aspectos generales, tecnológicos, jurídicos, de capacitación, económicos y de participación social. (CEPIS, 2002)

El desecho de baterías usadas en telefonía celular creció muy rápidamente. Por ejemplo, en Venezuela el contenido de metales altamente tóxicos en baterías, que en su mayoría se depositan en vertederos municipales, produce un severo impacto ambiental al contaminar aire, agua y suelos. (Correia de Soto y Martín de Armando, 2004)

Diversas compañías privadas han suministrado información sobre el almacenamiento, la peligrosidad, el transporte y el desecho de las baterías de litio. (Rockwell Automation, 2004)

Como ya se mencionó anteriormente en este trabajo, a principios de 2013 la Administración de Seguridad de Materiales Peligrosos del Departamento de Transporte de Estados Unidos introdujo regulaciones internacionales sobre el transporte aéreo internacional de baterías de litio. (UPS, 2012-2013)

La adopción de medidas gubernamentales que tengan en cuenta el riesgo de las baterías de litio, serán cada vez más relevantes. Se trata de mejorar la capacidad de reciclaje de metales de litio e instrumentar reglas de comercio claras en cuanto al suministro estable de materias primas.

Conclusiones

La alta densidad de energía que ofrece el litio le ha conferido ventajas comparativas y, así, su precio aumentó en las últimas décadas con una gran demanda. Su proyección como un mineral que será aplicado en nuevas tecnologías lo posiciona como un recurso estratégico y valioso.

En el futuro no muy lejano, cuando las reservas de combustibles fósiles se agoten, la economía mundial necesitará de una nueva revolución energética que sustente su funcionamiento. La tendencia parece indicar que el protagonista en el sector del transporte será el litio.

La intensidad de uso dependerá del desarrollo tecnológico en relación con su aplicación en baterías recargables, de las condiciones de abastecimiento (oferta y precio) del petróleo en el mundo y otros factores que influyan en la oferta de las reservas de litio.

La variedad de actores, empresas nacionales y extranjeras, e instituciones de todo nivel que participan en el proceso de explotación del litio en Argentina, causan dificultad en el estudio y seguimiento del tema. A lo largo de este trabajo se presentó una gran dificultad para el acceso a datos e información específica en el país. Por obvias razones estratégicas, las empresas y organizaciones involucradas mostraron reticencia a proporcionar detalles de los programas en curso. Además, se carece de la información detallada de costos de los materiales y los pasos de fabricación previo al proceso de producción de baterías.

Los emprendimientos mineros que explotan el litio en Argentina no generan valor agregado. El Estado comenzó emprendimientos mixtos que intentan desarrollar toda la cadena productiva asociada a este mineral, es decir, desde la extracción en la salina hasta la producción de baterías.

El aporte de la actividad minera en el desarrollo económico regional del país se relaciona con el entramado productivo local y el suministro de bienes. En el caso del litio, la posibilidad que la actividad de explotación produzca derrames favorables para la economía de una región resulta escasa si se tiene en cuenta que las empresas participantes llevan los productos primarios directamente a sus centros matrices, donde tiene lugar el procesamiento industrial.

La inversión que las empresas realizan para extraer y procesar el mineral se amortiza en unos pocos años. La ganancia posterior con derivados es la clave del negocio. Si bien se trata de revertir esta situación, la estrategia dependerá del accionar de las empresas que puedan interesarse en los productos derivados del litio, la disponibilidad de proveedores, la infraestructura industrial y las tecnologías que puedan implementarse. Las condiciones y políticas que impulse el Estado también serán fundamentales, por cuanto el marco regulador y económico impuesto afectará o beneficiará a la actividad. Tal vez se debería introducir una ley especial para la minería del litio y declararlo recurso estratégico (como en Chile), tal como fue solicitado oportunamente en la década de 1960.

Algunos proponen una política conjunta de Argentina, Bolivia y Chile, que ponga este recurso estratégico, no renovable, al servicio del desarrollo y la integración. Las

perspectivas de aumento previsto del precio del litio y del volumen producido y exportado, sugerirían dejar de lado el modelo de extracción, desintegrado de la economía regional. Además, dicho enfoque circunscribe la discusión al monto de regalías que perciben las provincias con recursos de litio: los estados provinciales perciben regalías del orden del 3% y participan como socios menores de los consorcios transnacionales. El valor agregado que representaría para una región con bajo grado de desarrollo y que no está integrada a los principales circuitos productivos de la estructura económica argentina, sería más que significativo.

Otro elemento de conflicto está dado por los impactos sociales y ambientales. La extracción de litio no es contaminante como otros minerales, pero insume grandes cantidades de agua. Este punto afecta a las comunidades que habitan en la Puna y el medioambiente circundante.

Se espera que las baterías de ión-litio mejoren sustancialmente sus prestaciones, impulsadas por la evolución de la nano-tecnología y los nuevos materiales. Las mejoras estarán en la capacidad de almacenamiento, tiempo de recargas y vida útil. Se estima que los elevados costos asociados a la producción de baterías puedan reducirse en los próximos años.

Los grupos de investigación argentinos han demostrado la factibilidad de fabricar baterías de litio, dentro de un marco de explotación que impulse el desarrollo del país y el mayor cuidado ambiental. Los pasos iniciales necesarios para evaluar la factibilidad de la fabricación y posterior comercialización de las baterías se han realizado. Diversas empresas han iniciado o planifican proyectos para la industrialización del litio,

mostrando capacidad tecnológica acorde. Es de esperar la aparición de nuevas demandas en sectores proveedores de insumos claves en la industria del litio donde pueden adquirir cierto dinamismo.

La posibilidad de producción local de baterías de litio para automóviles no sólo permitiría el valor agregado en la industria del litio, sino que fortalecería otros sectores vinculados, como los proveedores de auto-partes a la industria automotriz a partir de un innovador producto.

En cuanto a las empresas proveedoras de tecnología, hasta el momento las empresas multinacionales han desarrollado una explotación por medio de concesión o licitación de los salares y no se ha generado avance alguno en la cadena productiva del litio. La concesión de los salares con el único fin de estar en el mercado mundial puede albergar un alto costo. Si esta situación es inevitable, tal vez podría implementarse el cobro de una alícuota sobre la cantidad de mineral de litio que se exporte para así financiar programas o proyectos de formación de recursos humanos o el establecimiento de centros de investigación y transferencia de tecnología.

Un análisis somero de la situación mundial del litio y su panorama actual en Argentina, con las limitaciones de información ya mencionadas, nos permite concluir lo siguiente.

Fortalezas

- Gran cantidad de reservas de litio en el país.
- Capacidad tecnológica y empresas interesadas en el desarrollo de la industria del litio y sus derivados.

- Infraestructura científica y tecnológica apta para la investigación y el potencial desarrollo de la fabricación de baterías de litio íntegramente nacionales.

Oportunidades

- Creciente precio del litio y sus productos derivados por parte de los países desarrollados.
- Crecimiento sostenido de la demanda mundial de litio con dinamismo en segmentos que son insumos claves en industrias estratégicas e importantes, como es la fabricación de baterías de litio para la industria automotriz y electrónica.
- Fuerte posicionamiento estratégico del país, con posibilidades de asociaciones en la región latinoamericana en marcos comunes de exploración y explotación del litio.

Debilidades

- Desconocimiento de los beneficios y potenciales riesgos de la exploración y explotación del litio, con falta de consenso en el impulso de la actividad minera.
- Necesidad de estudios ambientales en zonas donde pueden afectarse el medioambiente, flora, fauna y poblaciones locales.
- Oposición en algunas provincias a la actividad de explotación minera por parte de sectores de la población.

Amenazas

- Falta de incentivos a la minería e incremento de gravámenes fiscales y tributarios.

- Restricciones a la importación de insumos y maquinaria necesaria para el desarrollo normal de la actividad.

La innovación es impulsada principalmente por los investigadores y emprendedores. La economía actual impactará en las decisiones energéticas del futuro y los actores deberán adaptarse a las nuevas soluciones que irrumpen en el mercado global.

La generación de conocimiento, como conjunción entre investigación básica y aplicada, implica el trabajo de recursos humanos altamente calificados. La inversión del país para dominar la tecnología del litio que lleve a la producción de baterías de litio y el conocimiento pleno de los materiales y procesos involucrados, con la participación de las universidades e institutos de investigación científica, será de suma importancia en los próximos años. Alcanzar el máximo valor agregado en la industria del litio, desde el salar hasta las baterías, es una oportunidad que el país no puede dejar pasar.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta, J. J.; Favilla, P. C.; Schvezov, C. E.; Collet Lacoste, J. R. 2011. Caracterización eléctrica de celdas de litio-ión. Cuarto Congreso Nacional, Tercer Congreso Iberoamericano, Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía, HYFUSEN 2011, Mar del Plata, 6-9 de junio de 2011

América Economía, 2012. El negocio del litio busca un mayor protagonismo en Argentina. Por Juan Pablo Dalmasso, publicado en Edición Internacional de Septiembre 2012. Disponible en <http://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/el-negocio-del-litio-busca-un-mayor-protagonismo-en-argentina> - (Accedida el 16 de octubre de 2013)

Anderson, David L., 2009. An Evaluation of Current and Future Costs for Lithium-Ion Batteries for Use in Electrified Vehicle Powertrains. Nicholas School of the Environment of Duke University, May 2009

Axeon, 2010. Our Guide to Batteries.

Barbosa, L.; Valente, G.; Ruiz, M. del C.; González, J. 2010. Estudio preliminar de la extracción de litio de espodumeno mediante cloración. X Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales. Salta, Argentina, octubre de 2010

Bisquert, Juan. 2005. Sistemas electroquímicos y nano-tecnología para el almacenamiento de energía limpia. Universidad de Física Aplicada, Departamento de Ciencias Experimentales, Universidad Jaume I, España.

Bronstein, Ricardo. 2012. Laring, 40 años. Presentación en Jornada de Industria e Innovación Tecnológica, V Congreso de Políticas de Ingeniería 2012, Centro Argentino de Ingenieros, Ciudad de Buenos Aires, 15 de noviembre de 2012

Bronstein, Leandro. 2013. Entrevista personal con el autor. 22 de octubre de 2013

Bustamante, Sebastián; Campusano, Sebastián; Muñoz, Francisca; Ortega, Vicente; Santoro, Estefani. 2012. Litio. Producción, Demanda y Precio. Universidad de Chile, Unidad de Formación General, Primavera 2012

CAEM, 2012. Dimensionamiento del Aporte Económico de la Minería en Argentina. Cámara Argentina de Empresarios Mineros (CAEM), Documento de Trabajo, Julio 2012

Calé, J. y Lutfi, R.J. 2009. El litio y su influencia en la función tiroidea. *Revista Argentina de Endocrinología y Metabolismo*, Vol. 46, N° 3

Calvo, Ernesto J., 2011. Baterías de litio: problemas tecnológicos y oportunidades para la ciencia. Seminario "Utilización Integral del Litio en Argentina. Ciencia, Tecnología e Innovación al Servicio del Desarrollo", San Salvador de Jujuy, 28 y 29 de abril de 2011

Carrasco, Ismael Simón, S/fecha. Fabricación de baterías de litio. Disponible en

<http://es.scribd.com/doc/22631266/BATERIAS-DE-LITIO> - (Accedida el 10 de octubre de 2013)

Catalano, Luciano R. 1964. Boro – Berilio – Litio (Una nueva fuente natural de energía). Ministerio de Economía de la Nación, Secretaría de Industria y Minería. Buenos Aires, 1964

CEPIS, 2002. Revisión y análisis de las experiencias de Argentina, Brasil, Colombia, Ecuador y México respecto de los cinco elementos claves para el manejo ambiental de pilas y baterías: reporte final. Documento preparado por el Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA, México), a cargo de Gustavo Solórzano Ochoa. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS)

CIC, 2012. El ProtoLitio desarrollado por la CIC, el Conicet y la UNLP partió rumbo a Mar del Plata. Comisión de Investigaciones Científicas, Ministerio de la Producción, Ciencia y Tecnología, Provincia de Buenos Aires. Publicado el 6 de diciembre de 2012, disponible en <http://www.cic.gba.gov.ar/destacadas/2012/20121206auto.html> - (Accedida el 18 de octubre de 2013)

CIC, 2012. El Protolitio desarrollado por la CIC, el Conicet y la UNLP llegó a Mar del Plata. Comisión de Investigaciones Científicas, Ministerio de la Producción, Ciencia y Tecnología, Provincia de Buenos Aires. Publicado el 7 de diciembre de 2012, disponible en <http://www.cic.gba.gov.ar/destacadas/2012/20121207auto2.html> - (Accedida el 18 de octubre de 2013)

Clarín iECO, 2012. Litio, el metal maravilla. Por Carlos Boyadjián, publicado el 5 de agosto de 2012. Disponible en http://www.ieco.clarin.com/economia/Litio-metal-maravilla_0_749925218.html (Accedida el 10 de septiembre de 2013)

COCHILCO, 2009. Antecedentes para una política pública en Minerales Estratégicos: Litio. Comisión Chilena del Cobre, Dirección de Estudios y Políticas Públicas. Octubre de 2009

Collet Lacoste, Juan R. y Lamagna, Alberto, 2011. Factibilidad del desarrollo y construcción de celdas de litio-ión en Argentina. Seminario “Utilización Integral del Litio en Argentina. Ciencia, Tecnología e Innovación al Servicio del Desarrollo”, San Salvador de Jujuy, 28 y 29 de abril de 2011

Conejos, L.; Segura, E.; Silva Croome, M.; Gauna, A.; Viale, F.; Guillén, C. 2006. Tratamiento adyuvante con carbonato de litio en el hipertiroidismo amiodarona inducido Tipo 1. Congreso FASEN 2006/3

Correia de Soto, Angelina y Martín de Armando, María Luisa. 2004. Potencial impacto ambiental de la disposición final de baterías usadas de teléfonos celulares en vertederos municipales. Revista Ingeniería UC Vol.11, Nº 3, 41-51, Diciembre 2004. Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Cuentas Gallegos, A. K.; Palacín, M. R.; Colomer, M. T.; Jurado, J. R.; Gómez-Romero, P. 2002. Estudios de materiales de cátodos híbridos y ánodos vítreos.

Caracterización en celdas de ión-litio. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Vol. 41, Núm. 1, Enero-Febrero 2002

Daniel, Claus. 2008. Materials and Processing for Lithium-ion Batteries. Journal of Engineered Materials, September 2008, Vol. 60, No.9 pp. 43-48

Departamento de Salud de New Jersey. 1999. Hoja informativa sobre sustancias peligrosas, Litio.

Diario de Cuyo, 2012. Salta ya produce baterías de litio. Por Ángeles Irusta, publicado el 19 de enero de 2012. Disponible en http://www.diariodecuyo.com.ar/home/new_noticia.php?noticia_id=500458 - (Accedida el 25 de octubre de 2013)

El Ancasti, 2012. Presentan proyecto para la fabricación de baterías de litio. Publicado el 7 de mayo de 2012, disponible en <http://www.elancasti.com.ar/politicaeconomia/Presentan-proyecto-para-la-fabricacion-de-baterias-de-litio-20120507-0082.html> - (Accedida el 16 de octubre de 2013)

Fornillo, Bruno. 2012. El “Triángulo del litio”: consideraciones sobre la explotación de los salares andinos de Argentina, Bolivia y Chile. Jornada de Estudios Andinos 2012

Gallardo, Susana. 2012. La fiebre comienza. *Revista Exactamente* (Número 48, octubre de 2011), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA

Galloni, Armando. 2013. Comunicación personal con el autor. 19 de noviembre de 2013

Garcés Millas, Ingrid. S/fecha. La industria del litio en Chile. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Antofagasta, Chile.

García-Alvarado, F.; Amador, U.; Álvarez, M. y Martínez de la Cruz, A. 2000. Caracterización estructural y electroquímica de materiales útiles como electrodo en baterías recargables de litio. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Vol. 39, Núm. 3, Mayo-Junio 2000

Garrabé, Jean. 2012. La historia de la introducción del litio en medicina y psiquiatría. El nacimiento de la psicofarmacología moderna en 1949. *Salud Mental*, 35, 541-544

Goonan, Thomas G. 2012. Lithium use in batteries: U.S. Geological Survey Circular 1371, disponible en <http://pubs.usgs.gov/circ/1371/>

Hamel Fonseca, Jaime. 2011. Celdas, pilas y baterías de ión-litio, una alternativa para..? *Journal Boliviano de Ciencias*, Volumen 8, Número 22.

Herrero Ambrosio, A.; Ruano Encinar, M.; Hernández-Cano, N.; Gutiérrez Ramos, R.; Jiménez Caballero, E. 1997. Exacerbación de psoriasis por litio. *Farm Hosp.*, 21, 3:175-177

Hollender, Rebecca y Shultz, Jim. 2010. Bolivia y su litio - ¿Puede el “oro del siglo XXI” ayudar a una nación a salir de la pobreza? Centro para la Democracia, Cochabamba, Bolivia, Mayo 2010

Ilera, Verónica; Furioso, Alejandra; Cantisano, María José; Lerner, Laura; Palmero, Cintia; Silva Croome, María del Carmen; Gauna, Alicia; Levy, C. 2004. Efecto agudo del litio en el control de la crisis tiro-tóxica: reporte de un caso. *Revista Argentina de Endocrinología y Metabolismo*, Vol. 41, N° 3

INQUIMAE, 2012. Instituto de Química de los Materiales, Medio Ambiente y Energía de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA. Simposio Internacional “Desafíos en las baterías recargables de litio-oxígeno”. Disponible en <http://www.inquimae.fcen.uba.ar/simposiobaterias/index.htm> - (Accedida el 21 de octubre de 2013)

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Fichas Internacionales de Seguridad Química, Hidróxido de litio, ICSC: 0913

Jefferson Lab, US Department of Energy. Sitio web: www.jlab.org – (Accedida el 3 de septiembre de 2013)

La Nación, 2012. Baterías de litio hechas en Argentina. Por Ariel Torres, publicado el 4 de febrero de 2012. Disponible en <http://www.lanacion.com.ar/1445416-baterias-de-litio-hechas-en-argentina> - (Accedida el 12 de septiembre de 2013)

La Voz del Interior, 2013. Córdoba tendrá una planta experimental para baterías de litio. Por Diego Dávila, publicado el 9 de junio de 2013. Disponible en <http://www.lavoz.com.ar/cordoba/cordoba-tendra-planta-experimental-para-baterias-litio> - (Accedida el 30 de octubre de 2013)

Longoria Rodríguez, Francisco E.; Martínez De la Cruz, Azael; González, Lucy T.; González-Quijada, Mario R. 2011. Electroquímica de la reacción del litio con el tungstato de bismuto. *Revista Ingenierías*, Abril-Junio 2011, Vol. XIV, No. 51

López-Muñoz, Francisco; Baumeister, Alan A.; Hawkins, Mike F.; Álamo, Cecilio. 2012. El papel de la serendipia en el descubrimiento de los efectos clínicos de los psicofármacos: más allá del mito. *Actas Esp. Psiquiatr*, 40(1), 34-42

Lowe, Marcy; Tokuoka, Saori; Trig, Tali; Gereffi, Gary. 2010. Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: the U.S. Value Chain. Center on Globalization, Governance & Competitiveness (CGGC), Duke University. October 5, 2010

Mayol Suárez, Matías Gabriel. 2012. Modelación del proceso de fabricación de baterías de ión-litio para vehículos eléctricos o híbridos. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica. Santiago de Chile, Agosto de 2012

MECON, 2011. Complejo Minero: Litio. Ministerio de Economía y Finanzas Públicas, Secretaría de Política Económica y Planificación del Desarrollo, Subsecretaría de Planificación Económica. Informe Especial, Lic. Ana Méndez, Diciembre 2011

Medrano, Juan. 2006. Mogens Schou (1918-2005) y el litio. *Norte de Salud Mental*, N° 26, pág. 82-88

Ministerio de Industria, 2012. Se comenzarán a producir baterías de litio en Argentina con mayores componentes nacionales. Publicado el 8 de mayo de 2012, disponible en <http://www.industria.gob.ar/se-comenzaran-a-producir-baterias-de-litio-en-argentina-con-mayores-componentes-nacionales/> - (Accedida el 15 de octubre de 2013)

Ministerio de Minería, Gobierno de Chile. 2012. Reimpulso a la Industria Chilena del Litio: Nacen los CEOL

Moncrieff, Joanna. 1997. Lithium: evidence reconsidered. *British Journal of Psychiatry*, 171, 113-119

Montagnon, F; Saïd, S y Lepine, J.P. 2002. Lithium: poisonings and suicide prevention. *Eur Psychiatry*, 17: 92-5

Montoya, Sofía. 2013. Litio, pequeño pero muy efectivo. Sitio web Salud y Medicinas, México, <http://www.saludymedicinas.com.mx/centros-de-salud/vitaminas-y-minerales/articulos/litio-pequeno-pero-muy-efectivo.html> - (Accedida el 30 de agosto de 2013)

Nacif, Federico. 2012. Bolivia y el plan de industrialización del litio: un reclamo histórico. La revista del CCC, Enero/Agosto 2012, número 14/15

Nelson, Paul A.; Santini, Danilo J. y Barnes, James. 2009. Factors Determining the Manufacturing Costs of Lithium-Ion Batteries for PHEVs. EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium. Stavanger, Norway, May 13-16, 2009

ONU-CEPAL, 2010. Reunión del Grupo de Expertos Senior sobre el Desarrollo Sostenible del Litio en América Latina: Asuntos Emergentes y Oportunidades. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (ONU-CEPAL), 10 y 11 de Noviembre de 2010, Santiago de Chile, Chile.

Orellana Rocha, Walter. 1995. El litio: una perspectiva fallida para Bolivia. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Industrial, Diciembre 1995

Página 12, 2011. La fiebre del litio. Por Darío Aranda, publicado el 11 de junio de 2011. Disponible en <http://www.pagina12.com.ar/diario/sociedad/3-169555-2011-06-06.html> (Accedida el 19 de septiembre de 2013)

Peña Ordoñez, Carlos. 2011. Estudio de baterías para vehículos eléctricos. Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid. Mayo, 2011

Pérgola, Federico. 2001/2002. Breve historia de la depresión. *Médicos y Medicina en la Historia*, Verano 2001/2002, Vol. I, N° 1

Piccardo, José y Prieto, Agustín. 2012. Vehículo eléctrico de producción nacional. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo, Carrera de Diseño Industrial. Buenos Aires, Noviembre de 2012

Puga, Alberto V. 2012. Líquidos iónicos como electrolitos estables para baterías de litio y otros dispositivos de almacenamiento de energía. *Real Sociedad Española de Química*, An. Quím. 2012, 108(4), 298-305

Región Norte Grande, 2012. NOA: firma salteña presenta hoy la primera batería de litio fabricada en el país. Publicado el 20 de abril de 2012, disponible en <http://www.regionnortegrande.com.ar/?noticia=20918> - (Accedida el 25 de octubre de 2013)

Rockwell Automation, 2004. Pautas para el tratamiento de baterías de litio. Número de catálogo 1747-BA. Publicación 1747-IN515A-ES-P, Mayo 2004

Roskill, 2009. The lithium market: 2009 review and outlook. Robert Baylis, Manager, Industrial Minerals Research. Roskill Information Services, Ltd.

Roskill, 2012. Vehicle electrification and other lithium end-uses: How big and how quickly? - 4th Lithium Supply & Markets Conference, 23-25th January 2012, Buenos Aires, Argentina. Robert Baylis, Manager, Industrial Minerals Research. Roskill Information Services, Ltd.

Roskill, 2013. Lithium: Market Outlook to 2017. Roskill Information Services, Ltd.

Sábato, Jorge y Botana, Natalio. 1968. La ciencia y la tecnología en el desarrollo futuro de América Latina. Revista del Intal, Buenos Aires, noviembre de 1968

Ströbele-Gregor, Juliana. 2012. Litio en Bolivia – El plan gubernamental de producción e industrialización del litio, escenarios de conflictos sociales y ecológicos, y dimensiones de desigualdad social. *desiguALdades.net* (Research Network on Interdependent Inequalities in Latin America), Working Paper Series, N° 14, Berlín

Ströbele-Gregor, Juliana. 2013. El proyecto estatal del litio en Bolivia – Expectativas, desafíos y dilemas. Nueva Sociedad 244, marzo-abril 2013

UNLP, 2012. Se puso a rodar la primera moto eléctrica del país. Universidad Nacional de La Plata, 14 de enero de 2012. Disponible en http://www.unlp.edu.ar/articulo/2011/12/27/moto_electrica_diciembre_2011 (Accedida el 18 de octubre de 2013)

UPS, 2012-2013. Regulaciones para las baterías de litio. Disponible en http://www.ups.com/media/news/es/mx/intl_lithium_battery_regulations.pdf (Accedida el 4 de octubre de 2013)

US Geological Survey. 2012. Mineral Commodity Summaries 2012: US Geological Survey

Visintin, A.; Thomas, J.E.; Castro, B.; Milocco, R.; Real, S.; Sacco, J.; Garaventa, G.; Triaca, W. 2011. Presente y futuro de la tecnología de baterías de ión litio: el proyecto de investigación y desarrollo de prototipos de baterías para automóviles eléctricos en la UNLP. Cuarto Congreso Nacional, Tercer Congreso Iberoamericano, Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía, HYFUSEN 2011, Mar del Plata, 6-9 de junio de 2011

Yoshio, Masaki; Brodd, Ralph J. y Kozawa, Akiya, Editors. 2009. "Lithium-Ion Batteries. Science and Technologies", Springer, 2009