

>> CameronPartners .

Consultoría para la identificación y evaluación de oportunidades para el desarrollo de la cadena de valor del litio en electrónica de consumo, electromovilidad, almacenamiento térmico y otros sectores

Informe 2

*Presentado al Comité de Minería No Metálica*

*Licitación pública ID 938251-4-LQ17*

# Consultoría para la identificación y evaluación de oportunidades para el desarrollo de la cadena de valor del litio en electrónica de consumo, electromovilidad, almacenamiento térmico y otros sectores

*Segundo Informe presentado al Comité de Minería No Metálica*

Pablo Celis – Jefe del Estudio

Mario Cameron, Francisco De la Carrera, Fabián Faúndez, Ricardo Rivano – Autores

## En pocas palabras

En este informe se presentan los resultados del trabajo correspondiente al Segundo Informe de la «Consultoría para la identificación y evaluación de oportunidades para el desarrollo de la cadena de valor del litio en electrónica de consumo, electromovilidad, almacenamiento térmico y otros sectores».

Primero se sintetizan aspectos generales tales como el contexto en el cual se enmarca este informe y su alcance.

Luego se presenta un análisis desde los aspectos de mercado y técnico de las oportunidades priorizadas para el desarrollo en Chile de productos relacionados con litio, particularmente en la producción de baterías ion-litio, materiales para cátodos, materiales para ánodos, electrolitos y almacenamiento térmico, considerando dimensiones relacionadas con el crecimiento y concentración de los mercados, ventajas y dificultades para la producción en Chile, acceso a insumos, y nuevas tecnologías, entre otros.

Finalmente, se presentan las conclusiones parciales del estudio para las oportunidades analizadas, indicando aquellas que tienen potencial para ser desarrolladas en Chile, y cuáles no deberían ser consideradas.

# Contenidos

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b>
<b>1.1</b>	<b>Contexto del informe</b> .....	<b>5</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos y alcance del informe</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>POTENCIALES OPORTUNIDADES IDENTIFICADAS</b> .....	<b>10</b>
<b>2.1</b>	<b>Baterías ion-litio</b> .....	<b>10</b>
<b>2.2</b>	<b>Materiales para cátodos</b> .....	<b>14</b>
<b>2.3</b>	<b>Materiales para ánodos</b> .....	<b>25</b>
<b>2.4</b>	<b>Electrolitos</b> .....	<b>31</b>
<b>2.5</b>	<b>Almacenamiento térmico</b> .....	<b>34</b>
<b>3</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>39</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>41</b>

## 1 Introducción

*En este capítulo se presentan el contexto y alcances de este informe, en cuanto al análisis de las oportunidades identificadas para el desarrollo de la cadena de valor del litio en Chile, correspondiente al objetivo específico O2 del estudio.*

### 1.1 Contexto del informe

En el Primer Informe orientado a alcanzar el objetivo específico O1 del estudio, el cual abarcó la conceptualización y análisis de los mercados de referencia para baterías para electrónica de consumo, electromovilidad y otras aplicaciones; la descripción general de las cadenas productivas de baterías de litio para estas aplicaciones; y la identificación de los actores claves de la industria, se analizaron los siguientes mercados de referencia y aplicaciones respectivas:

- › Electrónica de consumo, particularmente teléfonos celulares e inteligentes, computadoras portátiles y tabletas;
- › Electromovilidad, considerando vehículos eléctricos terrestres, marítimos y aéreos;
- › Otras aplicaciones, tales como grasas lubricantes, cerámicos, almacenamiento térmico de energía solar y almacenamiento de energía eléctrica.

Los resultados de los análisis realizados durante el Primer Informe indicaron que, desde el punto de vista de mercado, destaca electromovilidad en el segmento de los vehículos eléctricos, dado su mayor potencial de crecimiento, las expectativas en el aumento de apoyo de parte de los gobiernos por incentivar su proliferación siguiendo la tendencia hacia la disminución de emisiones contaminantes, además de ser un mercado no concentrado, al menos no globalmente.

Así mismo, destaca en electrónica de consumo el segmento de los teléfonos inteligentes, con un claro crecimiento de mercado, altas ventas a nivel mundial y baja concentración de mercado. Situación distinta a las computadoras portátiles y tabletas, cuyos mercados están concentrados y en claro decrecimiento.

En el caso de las otras aplicaciones analizadas, tales como grasas lubricantes y cerámicas, estos mercados son poco atractivos, donde no se pronostican mayores alzas a futuro, y su consumo se mantendrá estable.

En cuanto a los sistemas de almacenamiento térmico de energía por concentración solar, este mercado tiene un gran potencial al permitir almacenar energía a bajo costo. Sin embargo, debe comprobarse su efectividad, tras verificar si el uso de las sales ternarias de litio es viable y su eficacia es mejor que las sales solares actuales, por lo que el análisis de este mercado debe ser profundizado para concluir si presenta una oportunidad en el contexto del estudio.

En el caso de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica que utilizan baterías ion-litio, pese a representar una cuota despreciable en el mercado global actual del litio, para 2025 se proyecta demandarán el 6% de la producción global del mineral. Sin embargo, aún está en análisis su masificación, ya que debe verificarse que las baterías ion-litio para esta aplicación no presenten inconvenientes, por lo que se estima que esta expansión no sería factible hasta dentro de 10 años.

El comportamiento descrito de los mercados de referencia analizados se representa gráficamente en la Figura 1.1, considerando los tamaños de mercado (en base a ventas), crecimiento de mercado y consumo de litio,

De aquí, se puede observar que el mercado de las tabletas y las computadoras portátiles se presentan como mercados poco atractivos, con tasas de crecimiento negativas y generando ventas muy inferiores a los que se aprecian en el mercado de los teléfonos inteligentes, cuyas ventas llegan a ser cuatro veces mayor y con una tasa de crecimiento creciente de un 10%, teniendo estos tres mercados un consumo anual de litio similar.

El atractivo del mercado de los teléfonos inteligentes es comparable con el de vehículos eléctricos. Si bien el mercado de los vehículos eléctricos aún no genera el nivel de ventas que los teléfonos inteligentes, su tasa de crecimiento promedio (a nivel global) es mayor y se estima que el tamaño de mercado comience a crecer rápidamente en los próximos años.

El caso de almacenamiento térmico y eléctrico se presenta por separado en el gráfico, considerando que no aún no es posible hablar de tamaño de mercado, y tienen un consumo de litio menor.

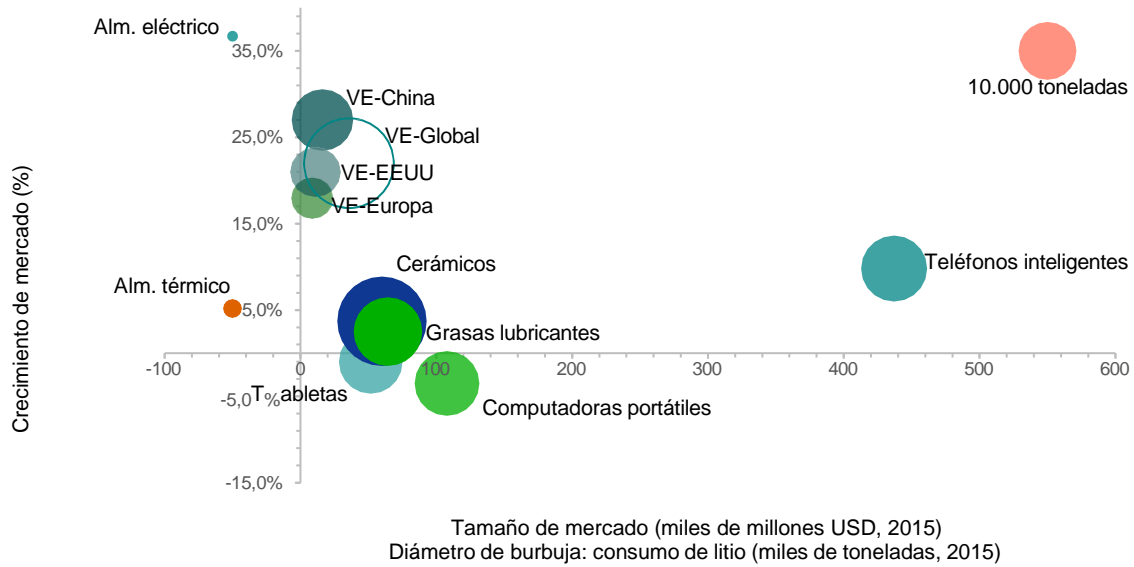


Figura 1.1. Matriz crecimiento de mercado – tamaño de mercado. Elaboración propia

Haciendo una proyección al 2025, en la Figura 1.2 se puede ver que, si bien hay diferencias en cuanto a las tasas de crecimiento y tamaño de los mercados, así como en el consumo de litio, el análisis comparado no varía mayormente, manteniéndose los teléfonos inteligentes y vehículos eléctricos como los mercados más atractivos.

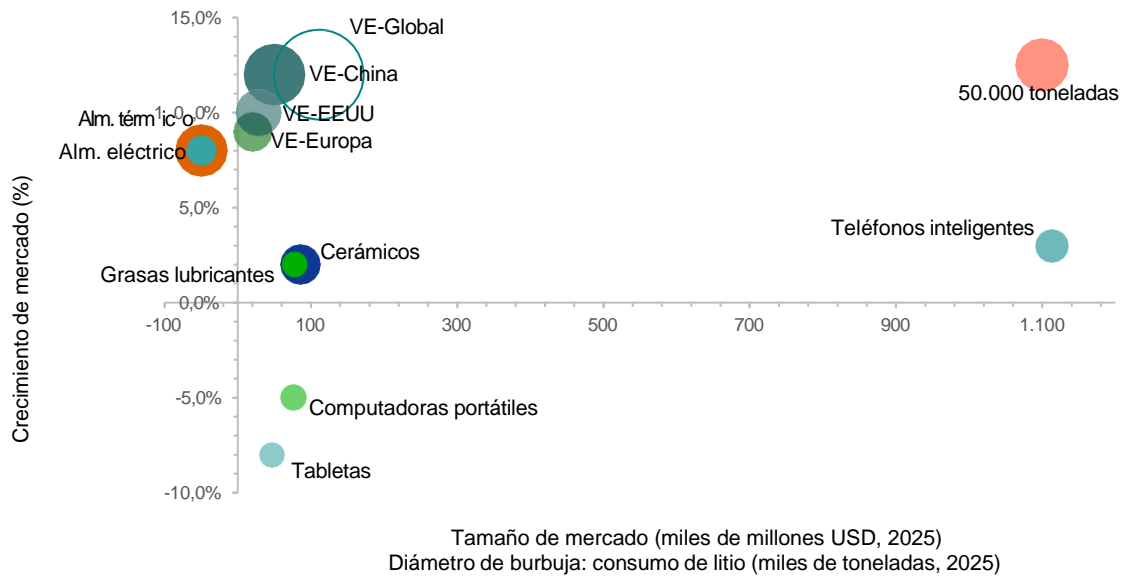
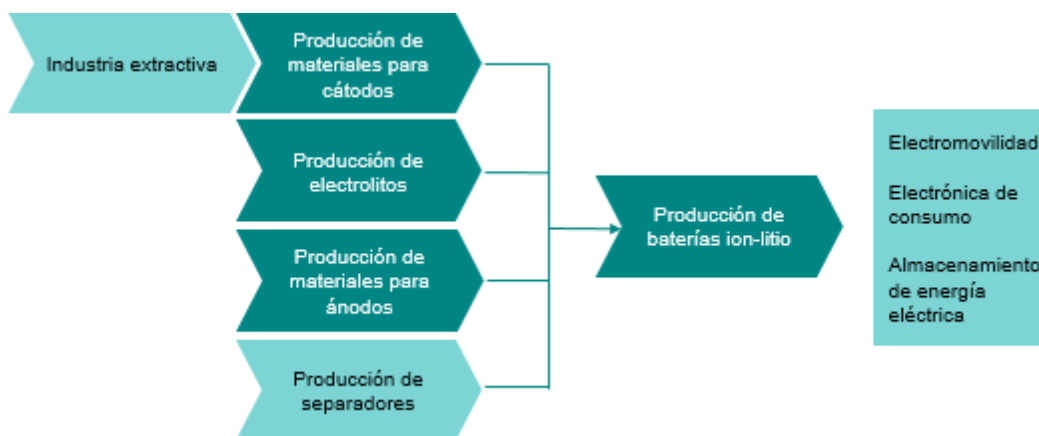


Figura 1.2. Matriz crecimiento de mercado – tamaño de mercado, proyección al 2025. Elaboración propia

Sin embargo, para los casos de electromovilidad y electrónica de consumo, las economías de escala que han alcanzado las compañías que ya están inmersas en sus respectivos mercados se han traducido en bajos costos de producción y expertise que para los nuevos participantes se hace difícil igualar en el corto plazo.

Con esta consideración, y en el contexto de las ventajas de Chile para acceder al litio, se considera que las oportunidades en el país para productos relacionados con litio están en la manufactura de baterías ion-litio y/o sus componentes, como por ejemplo materiales para cátodos, además de electrolitos y materiales para ánodos, el en contexto de ya existir antecedentes de elaboración ánodos con contenido de litio, como se muestra en la Figura 1.3.



**Figura 1.3. Esquema cadena de valor de producción de baterías ion-litio.** Elaboración propia

En el caso de los cátodos, considerando la criticidad de los insumos requeridos, particularmente cobalto, los materiales con mayor factibilidad de ser manufacturados son aquellos con bajo o nulo contenido de este mineral. Por lo anterior, los materiales más viables de realizar serían LFP y LMO, debido a que no contienen cobalto, seguidos por NCA y NMC con bajo contenido de cobalto y finalmente LCO.

Además de las oportunidades mencionadas, de conversaciones con la contraparte técnica del estudio, se incluye en este informe el análisis del litio metálico como una potencial oportunidad de desarrollo en el país en el segmento de los materiales para ánodos, considerando que este producto podría complementar sistemas de almacenamiento más prometedores que ofrecerían altas densidades energéticas en las baterías ion-litio.

En este contexto, el análisis de oportunidades para el desarrollo en Chile de productos relacionados con litio, se enfocará en baterías ion-litio, materiales para cátodos (LFP, NMC y LMO), materiales para ánodos, electrolitos, y almacenamiento térmico de energía solar.

## 1.2 Objetivos y alcance del informe

El objetivo general de la asesoría es priorizar oportunidades para el desarrollo de la cadena de valor del litio en el país para aplicaciones en electrónica de consumo, electromovilidad, almacenamiento

térmico para energía solar, entre otras, así como establecer un proceso para identificar y evaluar potenciales interesados en invertir en Chile en este tipo de proyectos.

El alcance de este segundo informe de avance contempla los resultados asociados al objetivo específico O2, presentado en la Tabla 1.1, lo que incluye la identificación y descripción de las oportunidades priorizadas en el primer informe de avance de esta asesoría.

**Tabla 1.1. Objetivo específico asociado al Segundo Informe de Avance esperados de la asesoría**

#	Objetivo específico	#	Resultado esperado
O2	Identificar y priorizar las oportunidades de manufactura y/o integración de componentes o insumos de mayor valor agregado para la industria local del litio.	R2.1	Identificación preliminar de las oportunidades de manufactura /integración local de componentes con mayor valor agregado.
		R2.2	Descripción detallada de las oportunidades priorizadas

Elaborada a partir de los términos de referencia de la Licitación pública ID 938251-4-LQ17

## 2 Potenciales oportunidades identificadas

*En este capítulo se presenta el análisis desde el punto de vista de mercado y técnico de las oportunidades de manufactura para avanzar en la cadena de valor del litio, priorizadas a partir del Primer Informe de Avance del estudio, a saber: i) baterías ion-litio, ii) materiales para cátodo, iii) materiales para ánodos, iv) electrolitos, y v) almacenamiento térmico.*

### 2.1 Baterías ion-litio

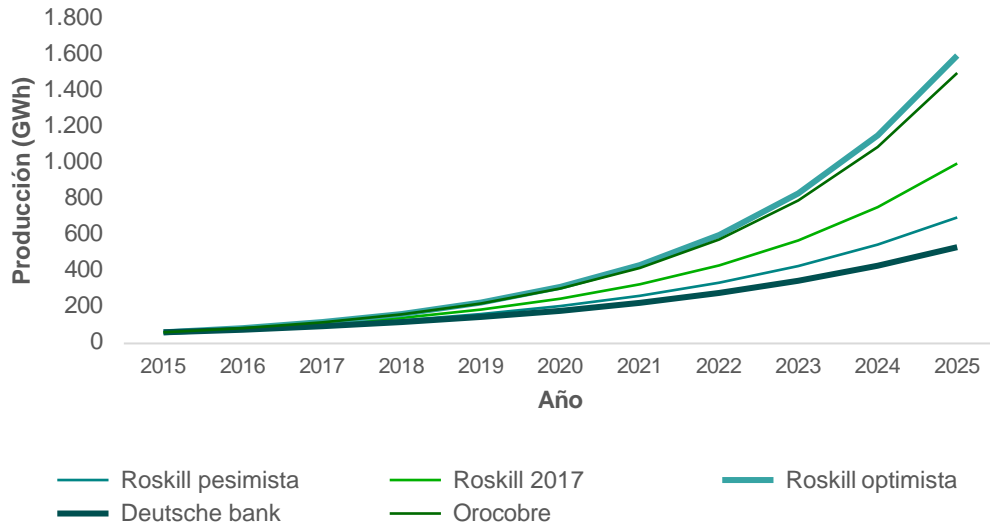
El valor total del mercado de las baterías ion-litio asciende a 45 mil millones de dólares, considerando tanto los ingresos de los fabricantes de celdas como los packs de baterías<sup>1</sup>. Impulsado principalmente por el desarrollo de la industria de vehículos eléctricos y por otras aplicaciones como la electrónica de consumo y el almacenamiento de energía eléctrica, se espera que el mercado de las baterías ion-litio siga creciendo durante la próxima década a una tasa cercana al 10% anual, por lo que representa una importante oportunidad para Chile de avanzar en la cadena de valor del litio.

#### **A. Análisis de mercado**

Las aplicaciones que utilizan baterías ion-litio serán las principales demandantes de este mineral en el año 2025. Teniendo esto en consideración, en la Figura 2.1 se muestran diferentes proyecciones respecto al consumo de estas baterías en términos de capacidad (GWh). Se observa que, para el escenario más optimista, el consumo de baterías ion-litio en 2025 superaría los 1.400 GWh, mientras que, para escenarios más conservadores, el consumo se situaría alrededor de los 550 GWh en el mismo año, destacando que ambas cifras superan ampliamente el consumo actual, siendo el promedio de las tasas de crecimiento entre las diferentes proyecciones de 27,5% anual.

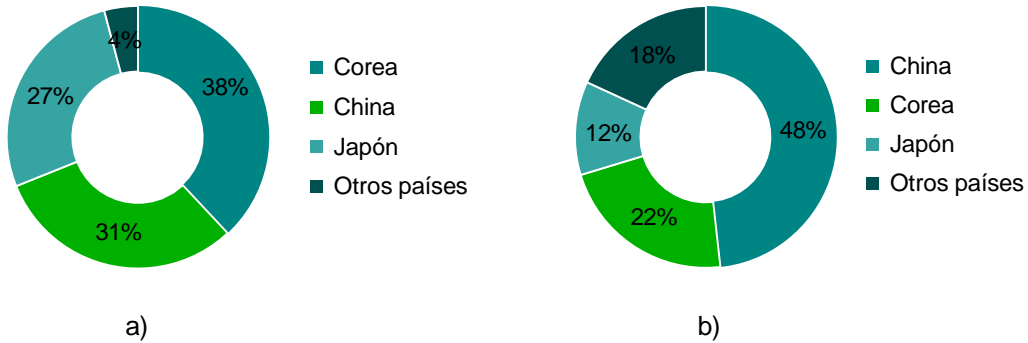
---

<sup>1</sup> Sin tomar en consideración el mercado de los materiales de componentes para baterías.



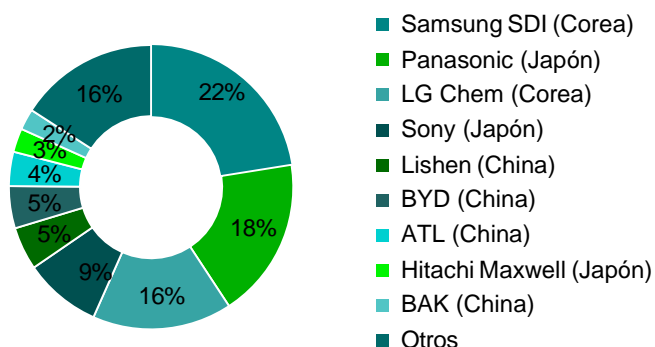
**Figura 2.1. Proyección de capacidad productiva (GWh) de la industria de baterías ion-litio.**  
Elaborado en base a Roskill (2016), (Orocobre, 2017), (Roskill, 2017), y (Deutsche Bank, 2016)

Para el año 2015, tres países se dividían el mercado de baterías ion-litio en proporciones de 38% (Corea), 34% (China) y 24% (Japón), según muestra la Figura 2.2(a). Sin embargo, se espera que esta estructura cambie, si se considera que la participación de China aumentará hasta superar a Corea como líder mundial de ventas en 2025, como se muestra en la Figura 2.2(b).



**Figura 2.2. Participación de países fabricantes de baterías ion-litio en base a su capacidad productiva (GWh) en a) 2015, y b) 2025.** Elaborado en base a (Roskill, 2016)

En cuanto a la concentración del mercado de fabricación de baterías ion-litio, en la Figura 2.3 se puede ver que el 80% del mercado se concentra en siete empresas, que tienen participaciones entre 4% y 23%, siendo Corea el país que abarca la mayor participación, con un 38% del mercado (considerando las cuotas de Samsung SDI y LG Chem, con 23% y 16%, respectivamente)



**Figura 2.3. Participación de mercado de fabricantes de baterías ion-litio en base a ventas (2015).** Elaborado en base a (Roskill, 2016)

Para los actores identificados, se tiene un Índice de Herfindahl (IHH)<sup>2</sup> con un valor estimado de 1.298, lo que quiere decir que el mercado está concentrado, tomando en consideración que existen tres actores (Samsung SDI, Panasonic y LG Chem) que tienen cuotas de mercado que superan hasta por más del doble a sus competidores más cercanos.

En cuanto a los factores que condicionan el acceso a este segmento, el notorio desarrollo que ha alcanzado el mercado de las baterías ion-litio se ha visto fuertemente catalizado por el alto nivel de expertise que han adquirido los fabricantes de estas baterías en la última década. En este sentido, una primera dificultad que enfrentarán los nuevos entrantes al mercado serán las fuertes economías de escala que han adquirido los fabricantes ya insertos, que difícilmente serán igualadas en el corto plazo, y que les permiten ofrecer baterías con alto desempeño a precios competitivos, a pesar de las constantes inversiones en I+D y gastos de patentamiento en que deben incurrir.

Otro factor que condiciona de manera importante las posibilidades de ingresar al mercado de las baterías ion-litio son los altos requisitos de capital que involucra la apertura de una nueva planta. Así, por ejemplo, para construir una planta de baterías ion-litio cuya capacidad sea de 100 MWh, se requiere una inversión de US\$ 60 millones.

Un último aspecto que limitaría las opciones de manufactura de baterías ion-litio es la lejanía con los mercados de origen de componentes, debido a que en Chile no se fabrican componentes para baterías, se deberán importar desde los países donde se instalan sus productores, incurriendo en costos de transporte que los actuales fabricantes de baterías no tienen. Así también, la lejanía con los mercados de destino podría ser un elemento condicionante, ya que en Chile no se fabrican a escala

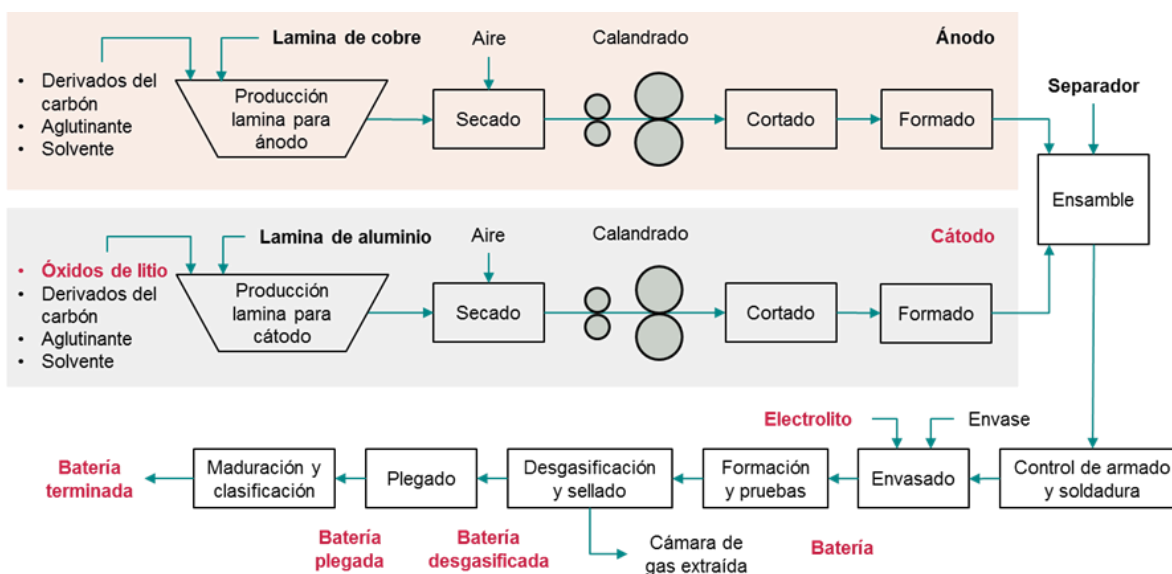
<sup>2</sup> El Índice de Herfindahl, o de Herfindahl e Hirschman, (IHH) cuantifica la participación de cada empresa en un mercado, sumando los cuadrados de los porcentajes de participación de cada empresa en ese mercado. Así, el índice se considera una medida de concentración de mercado o el nivel de concentración económica dentro de un mercado, en base a una puntuación que oscila entre 0 (competencia perfecta) y 10.000 (monopolio). Es decir, mientras más concentrado es un mercado, más cercano al control monopolístico se encuentra. Un mercado competitivo debe de obtener una puntuación en el índice de Herfindahl entre 0 y 1.000. De manera opuesta, toda puntuación mayor a 1.800 en el índice es el resultado de un mercado muy concentrado. (Observatorio de Competitividad, 2014)

comercial las aplicaciones que demandan baterías de litio, tales como vehículos eléctricos o teléfonos inteligentes, por lo que también se sumaría el costo de transporte hacia los mercados donde se fabrican dichas aplicaciones.

## B. Análisis técnico

En la actualidad, Chile no posee experiencia en fabricación de baterías ion-litio, ni el capital humano necesario para su producción, por lo que manufacturar baterías implicaría un gran desafío para lograr este desarrollo. Por otro lado, países como Japón, China y Corea del Sur poseen una vasta experiencia en este ámbito, con años de investigación y desarrollo, por lo que tratar de alcanzar el nivel de ellos implicaría un gran esfuerzo.

Este tipo de baterías son fabricadas mediante un proceso productivo estándar. La Figura 2.4 presenta el diagrama de procesos correspondiente a la producción de baterías ion-litio. En esta se observa que la producción de baterías comienza con la manufactura de ánodos por una línea y cátodos por otra, los cuales son ensamblados junto al separador en una etapa posterior y envasadas para ser rellenas con electrolito. Para terminar el proceso, la batería cargada se somete a diferentes pruebas para verificar su calidad.



**Figura 2.4. Diagrama del proceso productivo para la fabricación de baterías ion-litio.**  
Elaboración propia

Para la producción de baterías ion-litio, independiente del tipo de batería que se espere producir, se necesitan componentes, entre estos se encuentran separadores, electrolitos, cátodos y ánodos, que no están presentes en Chile actualmente.

## C. Discusión de la oportunidad

A pesar de lo atractivo que resulta el mercado de baterías ion-litio, que crece a tasas aceleradas aun considerando su gran tamaño, es necesario destacar las grandes dificultades que tendría Chile si deseara impulsar la fabricación de baterías de este tipo. En primera instancia se menciona la existencia

de fuertes competidores que dada su expertise, han generado economías de escala que serían imposibles de igualar para cualquier nuevo entrante al mercado, sumado esto a los altos costos de inversión e I+D necesarios para ser competitivos.

Otro aspecto relevante que frena las posibilidades de manufactura de baterías ion-litio en Chile es que el proceso implica la integración de una serie de componentes que no se fabrican en el país y que deberían ser importados, generando además altos costos en transporte.

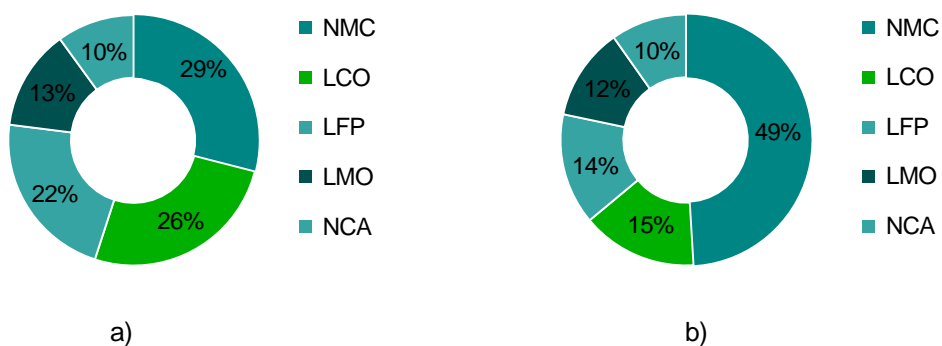
Ambos motivos son considerados suficientes para descartar la posibilidad de fabricar baterías ion-litio en el país. Sin embargo, esto no implica que algunos de los materiales para componentes de estas baterías sí puedan producirse en Chile, como se presenta en las secciones siguientes.

## 2.2 Materiales para cátodos

La capacidad productiva de la industria de materiales para cátodos para baterías ion-litio aumentará desde 131,1 kton en 2015 hasta las 343,5 kton en 2025, a una tasa de crecimiento anual de 10,1%, según Roskill (2016). Esta proyección refuerza las preconcepciones sobre el atractivo de mercado de los materiales para cátodos, considerando las intenciones de Chile de avanzar en la cadena de valor del litio.

Con respecto a la estructura de la industria de materiales para cátodos, en la Figura 2.5(a) se observa que la mayor participación se da en la fabricación de materiales de tipo NMC, con 29%, seguida de LCO con 26%, y LFP con 22%. En menor medida se fabrican materiales del tipo LMO y NCA, con 13% y 10% del total de la producción de materiales para cátodos, respectivamente.

De acuerdo a las proyecciones, la estructura de la industria no cambiaría en 2025, como se observa en la Figura 2.5(b), manteniéndose los materiales NMC como los de mayor volumen de fabricación, aumentando su participación en la industria a 49%, seguido de LCO con 15%, LFP con 14%, LMO con 12%, y NCA con 10%. A pesar de las disminuciones de LCO y LFP en relación al total, la producción de todos los materiales para cátodos aumentará al año 2025, a tasas de crecimiento anual superiores al 7%.

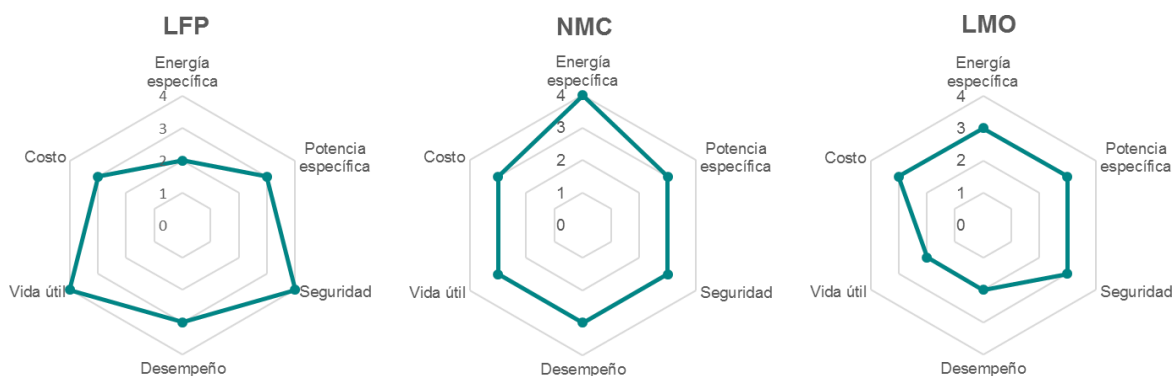


**Figura 2.5. Estructura de la industria de materiales para cátodos en base a producción (kton) en a) 2015, y b) 2025.** Elaborado en base a (Roskill, 2016)

En este punto es importante recordar que, del Primer Informe de Avance del estudio, se concluyó que por su alto contenido de cobalto, el material para cátodo LCO no sería considerado una oportunidad en este estudio, ya que el precio de dicho mineral ha aumentado de tal manera en los últimos años que ha duplicado al doble su costo de obtención. (London Metal Exchange, 2017)

Asimismo, tampoco es considerado como oportunidad para este estudio el desarrollo del material NCA, que sumado a su alto contenido de cobalto, se encuentra en un mercado altamente concentrado, y por otra parte, el Joint Venture de Tesla-Panasonic posee la mayoría de las patentes de fabricación, lo que dificultaría la entrada de nuevos competidores.

Debido a lo anterior, sólo sería factible producir en Chile materiales para cátodos del tipo LFP, NMC y LMO. Para diferenciar las propiedades de estos materiales para cátodos, se puede comparar su desempeño en la batería. Dentro de los aspectos importantes a considerar se encuentran la energía específica, la potencia específica, la seguridad, el desempeño, la vida útil y el costo. En la Figura 2.6 se muestra un resumen comparativo de los tres cátodos antes mencionados, donde se observa que el LFP presenta una excelente vida útil y nivel de seguridad, pero a un bajo nivel de energía específica. Por otro lado, el NMC presenta un equilibrio de sus características, destacándose la capacidad energética. Por último, el LMO presenta propiedades inferiores con respecto a los anteriores materiales, debido a su corta vida útil y bajo desempeño.



**Figura 2.6. Resumen propiedades de los cátodos i) LFP, ii) NMC y iii) LMO<sup>3</sup>. Elaborado en base a (BCG, 2010)**

La tecnología requerida para producir materiales para cátodos es similar a la utilizada en la industria metalúrgica, lo que implica que Chile tiene acceso a este tipo de maquinaria y el capital humano necesario para operarlas en óptimas condiciones. Sin embargo, son necesarios expertos, tanto en nivel técnico como profesional, con conocimientos específicos en los procesos productivos correspondientes a la manufactura de este tipo de materiales. De acuerdo con esto, será imperativo capacitar a un gran volumen de personal para que se familiaricen con los procesos productivos, tanto en Chile como en el extranjero.

<sup>3</sup> Escala de los gráficos; 0: pésimo – 1: malo – 2: regular – 3: bueno – 4: excelente.

## 2.2.1 Fosfato de hierro litio (LFP)

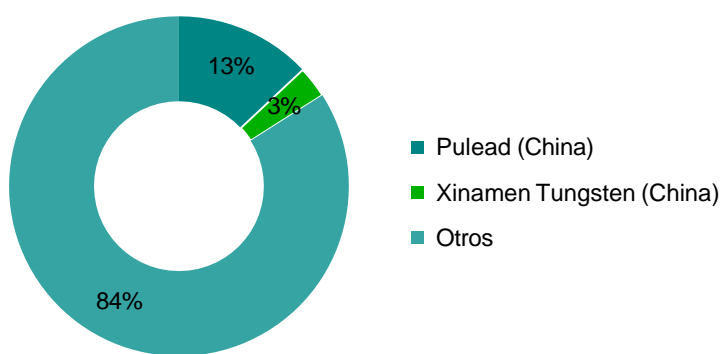
### A. Análisis de mercado

La producción china de vehículos eléctricos es el principal demandante del material LFP. La industria local de automóviles eléctricos recibió subvenciones para el uso de materiales LFP, lo que impulsó su consumo durante los últimos 5 años. Sin embargo, actualmente la industria china está cambiando sus preferencias para dar paso al NMC como material para el cátodo de las baterías de vehículos eléctricos, aprovechando el mejor desempeño general que este material ofrece frente al LFP.

No obstante, este cambio de material no disminuirá el consumo de LFP, ya que éste sigue siendo el principal material en la producción de baterías para buses eléctricos (que además de China también produce Brasil) y vehículos híbridos pequeños, aunque su consumo crecerá en proporciones menores a las de otros materiales para cátodos. Además, el alza en el precio de los otros materiales para cátodos podría fortalecer el mercado de LFP.

Considerando lo anterior, la capacidad productiva de los fabricantes de materiales para cátodos del tipo LFP, que en 2015 era de 28,8 kton, se espera que para 2025 aumente a 68 kton, a una tasa de crecimiento del 8,9% anual.

El segmento de los materiales para cátodos LFP se encuentra concentrado en China, siendo Pulead el principal fabricante con un 13% del mercado, por delante de Xinamen Tungsten con un 3%, mientras el 84% del mercado restante se distribuye en participaciones menores en otras compañías, como se puede observar en la Figura 2.7.



**Figura 2.7. Participación de mercado de fabricantes de materiales para cátodos LFP en base a capacidad productiva (2015).** Elaborado en base a (Roskill, 2016)

El segmento de materiales para cátodos LFP tiene una alta competencia y muy baja concentración, con un IHH de 346. Aun cuando en este mercado hay dos empresas que destacan (Pulead y Xinamen Tungsten, con 13% y 3% de participación respectivamente), el 84% del mercado lo dominan empresas que tienen participaciones menores al 3%

### B. Análisis técnico

Las baterías del tipo de fosfato de hierro litio presenta una alta estabilidad térmica, lo que permite que la batería se pueda sobrecalentar sin entrar en un desenfrenado térmico (*thermal runaway*), mejorando la integridad de la batería. Esta característica permite además abaratar su costo al no

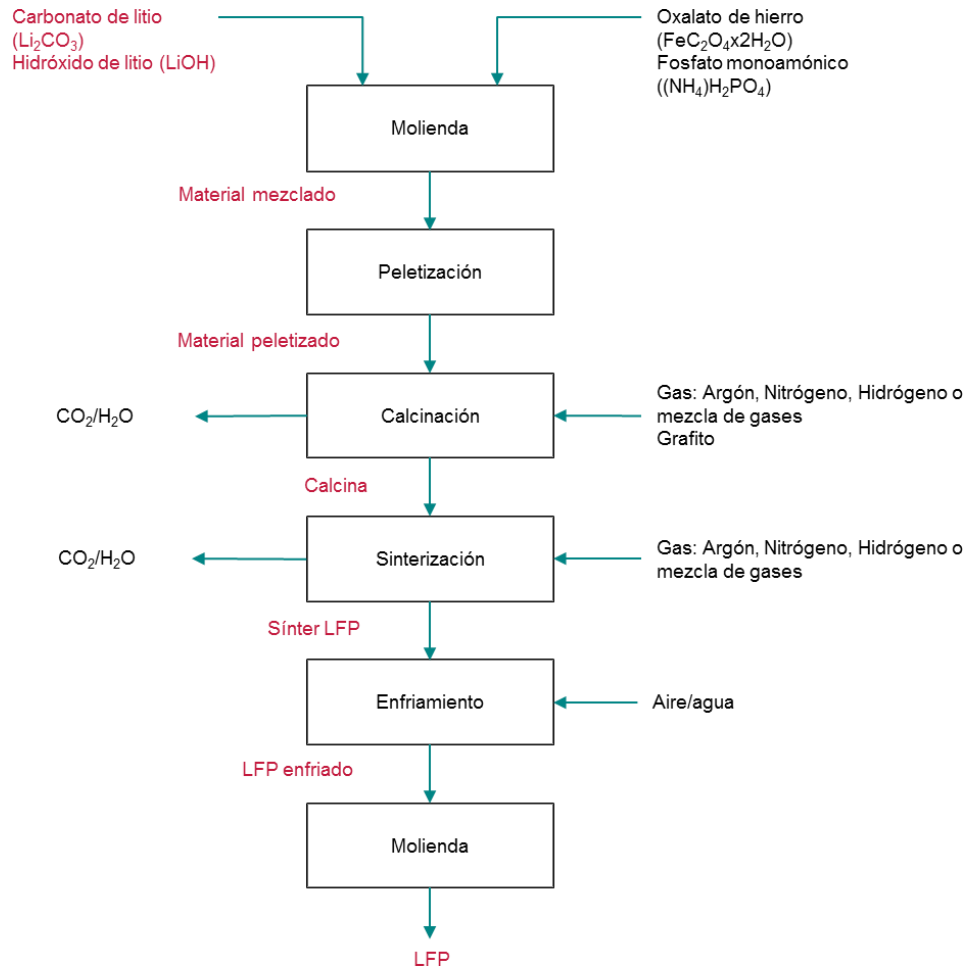
necesitar un circuito que regule la carga eléctrica para mantener la temperatura. Por su parte, todos los materiales que utiliza son abundantes y de bajo precio, disminuyendo aún más el costo de fabricación. Por otro lado, este tipo de materiales provee a las baterías un largo ciclo de vida, soportando una alta cantidad de ciclos de carga/descarga, y por su estructura química, puede soportar una alta tasa de corriente de descarga, ofreciendo una alta potencia para usos donde se requiere alto torque o aceleración. Cabe manifestar que las patentes para este tipo de material para cátodo vencen entre el 2020 y el 2021, disminuyendo drásticamente el costo de licencia posterior a esa fecha. (SEC, 2005)

No obstante, la batería ion-litio LFP posee una mediana densidad energética, haciéndola útil solo para vehículos eléctricos de amplias dimensiones, como buses o camiones eléctricos, o para sistemas de almacenamiento eléctrico con baterías (BESS), esto se debe a que productos de grandes dimensiones poseen el espacio suficiente para ubicar un gran banco de baterías. En general, ofrece un buen desempeño en relación a su precio, potencia, energía y seguridad.

Existe una gran variedad de procesos productivos por los cuales se sintetiza este tipo de materiales. En la Figura 2.8 se presenta un diagrama de procesos para la producción de material LFP mediante el método de reacción en estado sólido. Este proceso utiliza como precursores oxalato de hierro, fosfato monoamónico y carbonato o hidróxido de litio, los cuales son sometidos a una etapa de molienda con el fin producir la mezcla de los insumos, luego ocurre la peletización de la mezcla.

Posteriormente, los pellets pasan a una etapa de calcinación a aproximadamente 300 °C con el objetivo de eliminar compuestos volátiles y formar los primeros cristales de  $\text{LiFePO}_4$ . Inmediatamente después de la calcinación, procede otra etapa a mayor temperatura llamada sinterización, esta etapa suele realizarse a una temperatura levemente inferior a la temperatura de fusión del material, con el objetivo de aumentar la difusión atómica. Durante esta etapa ocurre el reordenamiento de los átomos y el consiguiente crecimiento de los cristales.

Luego, los cristales formados a alta temperatura son enfriados rápidamente con el fin de que mantengan las características adquiridas durante su formación. Finalmente, los cristales son conducidos a una etapa de molienda donde se reduce su tamaño al adecuado requerido para la manufactura de cátodos. (Torrey Hills Technologies, 2017)



**Figura 2.8. Diagrama del proceso productivo para la fabricación de material LFP.**  
Elaboración propia

En cuanto a los insumos necesarios para la fabricación de los precursores, estos se pueden encontrar en el mercado nacional y latinoamericano. El concentrado de hierro se puede comprar a empresas con producción nacional y los fosfatos se pueden importar de países como Brasil o Perú, los cuales son el sexto y el noveno productor mundial de fosfatos en el mundo respectivamente. (USGS, 2017)

### C. Discusión de la oportunidad

A pesar del reemplazo paulatino por NMC, la producción del material LFP proyecta una alta tasa de crecimiento debido a los nichos de mercado que encuentra en China y Brasil. Además, se tiene conocimiento de la pronta expiración de las patentes de fabricación, lo que disminuiría los costos por concepto de licencias. Ambos son antecedentes positivos al momento de evaluar las posibilidades de fabricar este material para cátodos en Chile.

Otro aspecto a favor se tiene al observar que los insumos necesarios para producir este material se pueden fabricar en Chile, lo que en definitiva es el argumento necesario para afirmar que la fabricación de LFP es una oportunidad de manufactura para avanzar en la cadena de valor del litio en Chile.

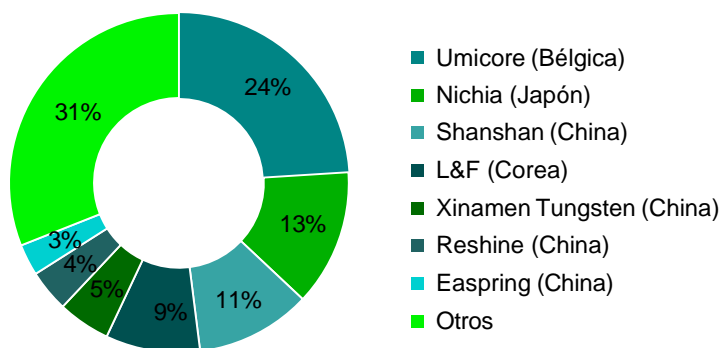
## 2.2.2 Óxido de litio níquel manganeso cobalto (NMC)

### A. Análisis de mercado

En el futuro, se espera ver un aumento continuo en NMC, muy superior en comparación con otros cátodos. El material NMC ofrece un amplio conjunto de aplicaciones, por ejemplo, en electromovilidad, almacenamiento de energía eléctrica, electrónica de consumo, entre otros. En particular, NMC se ha convertido en el material de elección para gran parte del mercado de vehículos eléctricos, que se espera domine el crecimiento del negocio de iones de litio en la próxima década.

Considerando lo anterior, la capacidad productiva de los fabricantes de materiales para cátodos del tipo NMC, que en 2015 era de 38 kton, se espera que para 2025 aumente a 231 kton, a una tasa de crecimiento del 19,8% anual, siendo el que mayor crecimiento proyecta.

En el segmento de los materiales para cátodos NMC, como se muestra en la Figura 2.9, el mercado es liderado por Umicore de Bélgica, con un 24% de participación, seguido de Nichia (Japón) con un 13%, aunque de manera agregada, las empresas chinas abarcan en total el 23% del mercado, considerando las participaciones de Shanshan (11%), Xinamen Tungsten (5%), Reshire (4%) y Easpring (3%). Por su parte, Corea también es considerado un país relevante en este mercado, a través de la producción de L&F, con un 9% de participación.



**Figura 2.9. Participación de mercado de fabricantes de materiales para cátodos NMC en base a capacidad productiva en 2015.** Elaborado en base a (Roskill, 2016)

Con un IHH de 1.058, el mercado de materiales para cátodos NMC se encuentra levemente concentrado y se puede considerar aún como competitivo, con siete empresas que abarcan el 70% del mercado. Aunque es necesario tomar en cuenta que Umicore tiene una cuarta parte del mercado, duplicando a su competidor más cercano, la empresa Nichia de Japón.

### B. Análisis técnico

La batería de óxido de litio níquel manganeso cobalto presenta una estructura química estable, ofreciendo una buena seguridad ante cualquier sobrecarga, al soportar una temperatura más alta que

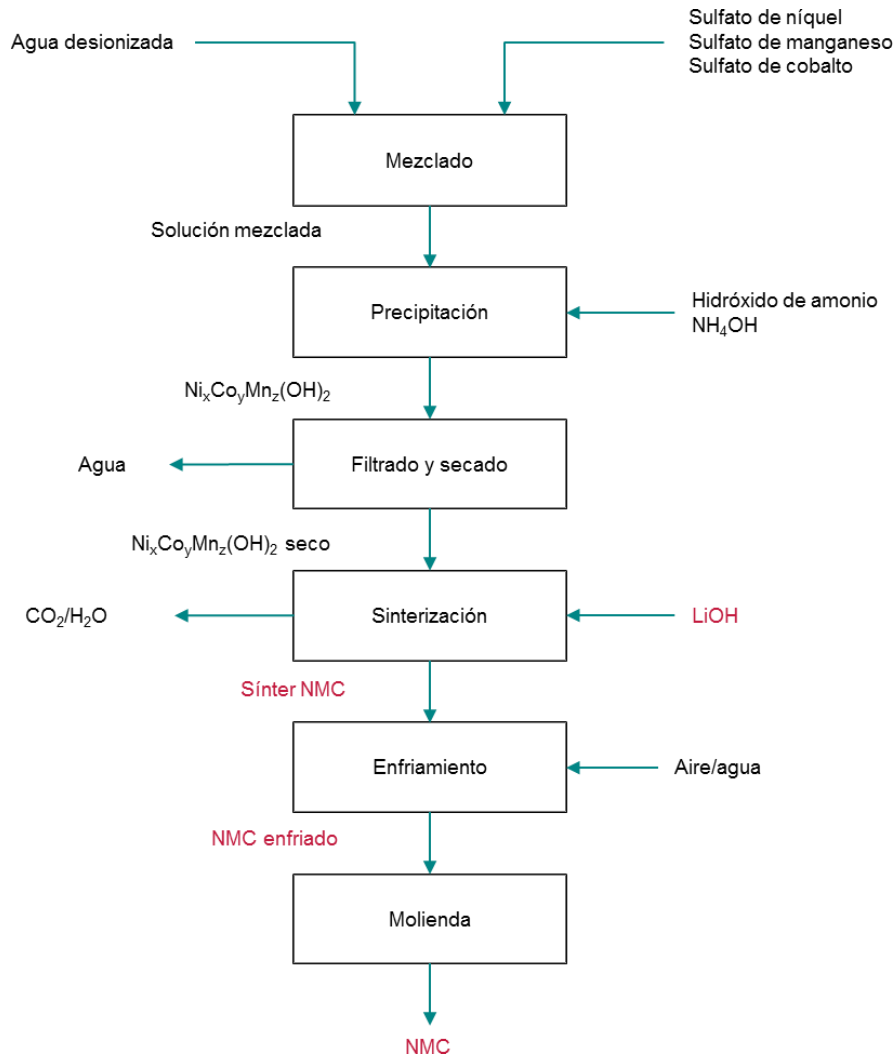
otros tipos de baterías. No obstante, es necesario un módulo de circuito de protección para regular la corriente de carga. Paralelamente, este material ofrece un excelente nivel de energía, lo que permite almacenar más electricidad en un menor volumen y peso, útil para lograr una mejor autonomía en los vehículos eléctricos (EV).

Adicionalmente las baterías NMC ofrecen buen rendimiento en cuanto a potencia, entregando una alta tasa de corriente para mejorar la aceleración y torque de los vehículos eléctricos. Su desempeño en general es el más balanceado de todos los materiales para cátodos, al ofrecer una buena potencia y una excelente energía a un costo razonable, útiles tanto en aplicaciones móviles como estacionarias.

Existe una amplia variedad de procesos mediante los cuales se producen los materiales catódicos para estas baterías. En la Figura 2.10 se presenta el diagrama de procesos para la producción de material  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}$  mediante el método de coprecipitación y reacción en estado sólido. El proceso productivo comienza con la formación del precursor a partir de sulfato de níquel, manganeso y cobalto. Para esto, los insumos se mezclan en proporciones definidas con el fin de obtener una solución base para la precipitación de los cristales del precursor a formar.

Una vez mezclados los insumos se produce la precipitación de  $\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z(\text{OH})_2$  mediante la adición de  $\text{NH}_4\text{OH}$ . Posteriormente los cristales formados son filtrados y secados. Una vez seco, el  $\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z(\text{OH})_2$  pasa a una etapa de sinterización donde se adiciona hidróxido de litio. En una primera fase, a  $500\text{ }^\circ\text{C}$  ocurre la descomposición térmica de los precursores y la formación de los primeros cristales de  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}$ .

Posteriormente, se aumenta la temperatura hasta los  $900\text{ }^\circ\text{C}$  con el objetivo de lograr una mayor difusión de los átomos en la estructura cristalina logrando así el crecimiento de los cristales de NMC. Una vez terminado el proceso de sinterización los cristales van a una etapa de enfriamiento, en la cual se puede utilizar agua o aire. El objetivo de esta etapa es mantener la estructura cristalina lograda en la etapa de sinterización y no provocar cambios en las propiedades del polvo sintetizado. Finalmente, el material obtenido va a una etapa de molienda, donde se ajusta el tamaño del producto, obteniendo material NMC con los requisitos del cliente.



**Figura 2.10. Diagrama del proceso productivo para la fabricación de material NMC.**  
Elaboración propia

Actualmente, la industria se encuentra orientada hacia la disminución de los costos de las baterías ion-litio. En ese sentido, el precio de los insumos es esencial para la reducción del costo de la batería. En el último año el costo del cobalto se ha duplicado debido al gran aumento de la demanda agregada por efecto de la electromovilidad. (London Metal Exchange, 2017)

En las últimas versiones patentadas, la proporción de cobalto con respecto a otros materiales ha disminuido considerablemente, cambiando las proporciones de 3:3:3 a 8:1:1 en los niveles de níquel, manganeso y cobalto respectivamente. Debido a lo anterior, al aumentar la proporción de níquel y disminuir el contenido de manganeso y cobalto se ha logrado un menor costo de producción, manteniendo las propiedades de la batería.

La producción de cobalto, de dónde y cómo se extrae, es un problema a la hora de importar y utilizar este material, debido a la situación actual en que se encuentra la República Democrática del Congo,

donde se concentran los mayores depósitos de cobalto. Si bien es el mayor productor de este mineral en el mundo, la República Democrática del Congo ha presentado problemas en cuanto a estándares laborales, al utilizar mano de obra infantil para la extracción del mineral, bajos sueldos y precaria seguridad, entre otros. A raíz de lo anterior, empresas de alta tecnología, por ejemplo Apple, han manifestado su postura de no utilizar baterías que contengan cobalto procedente de ese país. (Infobae, 2017)

Actualmente Chile no posee producción de los insumos críticos utilizados en este tipo de materiales. En ese sentido, la producción de cobalto se encuentra en etapa de exploración, con el objetivo de realizar una inversión en la explotación de los recursos. (Blina Minerals, 2017)

Con respecto a la posibilidad de conseguir cobalto en el mercado latinoamericano, Brasil presenta la oportunidad de proveer a Chile de este mineral, con mejores estándares de calidad y seguridad que República del Congo, por lo que podría importarse dicho material desde este país. (USGS, 2017). Además de la posibilidad de proveer de cobalto, Brasil también puede proveer de manganeso y níquel al mercado chileno.

Con respecto a la producción de manganeso, Chile extrajo el mineral entre los años 1997 y 2009, pero debido a la baja demanda detuvo su producción el año 2010. Si la demanda por el mineral se reactiva, Chile podría volver a explotar manganeso. Por otro lado, no existen datos de producción de níquel en Chile, sin embargo, en la Región de Antofagasta se encuentran yacimientos de minerales correspondiente a este metal. (Corfo, 2017)

### **C. Discusión de la oportunidad**

Aunque el cobalto y el níquel, dos minerales con altos precios en la actualidad, son parte de sus principales componentes, el material NMC demuestra sus potencialidades al proyectar la mayor tasa de crecimiento y mayor demanda al 2025 entre los materiales para cátodos. Además, dentro de los materiales para cátodos analizados en este informe, es el que mejor desempeño demuestra.

Otro aspecto a favor se tiene al observar que los insumos necesarios para producir este material se pueden encontrar en el mercado latinoamericano, lo que reafirma que la fabricación de NMC es una oportunidad de manufactura para avanzar en la cadena de valor del litio en Chile.

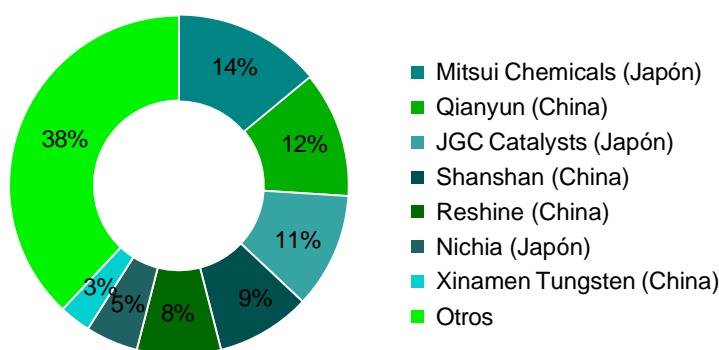
#### 2.2.3 Óxido de litio manganeso (LMO)

##### **A. Análisis de mercado**

En la mayoría de su rango de aplicación, los materiales LMO rinden menos que otras alternativas, en particular NMC. Sin embargo, con costos de materiales intrínsecamente bajos, los LMO no son vulnerables al alza de costos en cobalto y níquel, por lo que su participación debería aumentar si los precios en estos materiales aumentan sustancialmente. Por otro lado, de acuerdo a las estimaciones de Roskill (2016), es probable que los materiales LMO sigan utilizándose en la fabricación de vehículos eléctricos, y también en sistemas de almacenamiento eléctrico.

Considerando estos antecedentes, la capacidad productiva de los fabricantes de materiales para cátodos del tipo LMO que en 2015 era de 17 kton, se espera que para 2025 aumente a 56,3 kton, a una tasa de crecimiento del 12,7% anual.

En el caso de los fabricantes de materiales para cátodos LMO, en la Figura 2.11 se observa que el mercado se encuentra repartido en proporciones similares entre empresas japonesas y chinas, países que concentran, en la suma de las participaciones de sus empresas respectivas, el 30% y 32% del mercado de materiales para cátodos LMO respectivamente. De manera individual, la empresa que concentra la mayor participación de mercado es Mitsui Chemicals de Japón, con un 14% del mercado, seguido de cerca por Qianyun (China) y JGC Catalysts (Japón) con un 12% y 11% de participación, respectivamente. En cuarta y quinta posición se encuentran las empresas chinas Shanshan, con un 9% de participación, y Reshine con un 8%. Con participaciones menores, se encuentra Nichia de Japón (5%) y Xinamen Tungsten de China, con un 3%.



**Figura 2.11. Participación de mercado de fabricantes de materiales para cátodos LMO en base a capacidad productiva (2015).** Elaborado en base a (Roskill, 2016)

Con un IHH de 716, el mercado para los materiales para cátodos LMO es competitivo y de baja concentración, donde un 62% del mercado se distribuye entre 7 empresas que tienen cuotas de mercado de entre 3% y 14%, sin un líder claro entre ellos.

## B. Análisis técnico

La batería de óxido de litio manganeso presenta una buena capacidad de potencia y energía, prácticas para aplicaciones como la electromovilidad, herramientas eléctricas y almacenamiento eléctrico. A su vez, el costo de producir este material de cátodo es una de las más bajas del mercado, además de ser la menos contaminante durante la producción.

No obstante, el ciclo de vida de este material es moderado, incapaz de soportar la cantidad de ciclos de carga/descarga que ofrecen otros tipos de materiales. Adicionalmente la estructura química de este material es inestable, por lo un sobrecalentamiento considerable podría iniciar un desenfrenado térmico, incendiando la batería. Es necesario un circuito de protección para regular la corriente de carga de la batería.

Existe una amplia variedad de procesos mediante los cuales se producen los materiales catódicos para estas baterías. En la Figura 2.12 se presenta el proceso para la producción de material LMO mediante el proceso de reacción en estado sólido. El proceso productivo comienza con la molienda de los insumos, en este caso, carbonato de litio y carbonato de manganeso como insumos mayoritarios, y acetato de magnesio en menor cantidad, con el objetivo de obtener una mezcla homogénea. Posteriormente la mezcla reducida en tamaño pasa a un proceso de peletización con el objetivo de

aumentar la eficiencia del proceso. Los pellets producidos van a una etapa de calcinación a 500 °C, donde ocurre la descomposición térmica de los insumos y la formación de los primeros cristales de  $\text{LiMn}_2\text{O}_3$ .

La etapa siguiente corresponde a la sinterización de la calcina obtenida anteriormente, esta etapa ocurre a una temperatura superior a la de calcinación e inferior al punto de fusión del material, aproximadamente 900 °C, con el objetivo de aumentar la difusión atómica en la estructura cristalina para lograr un mejor producto. Inmediatamente después de la sinterización ocurre el enfriamiento del material formado, con el fin de disminuir la temperatura manteniendo las propiedades químicas y estructurales adquiridas por el material en la etapa anterior. Finalmente, el material enfriado es nuevamente molido para lograr los tamaños de partículas requeridos por los productores de baterías.

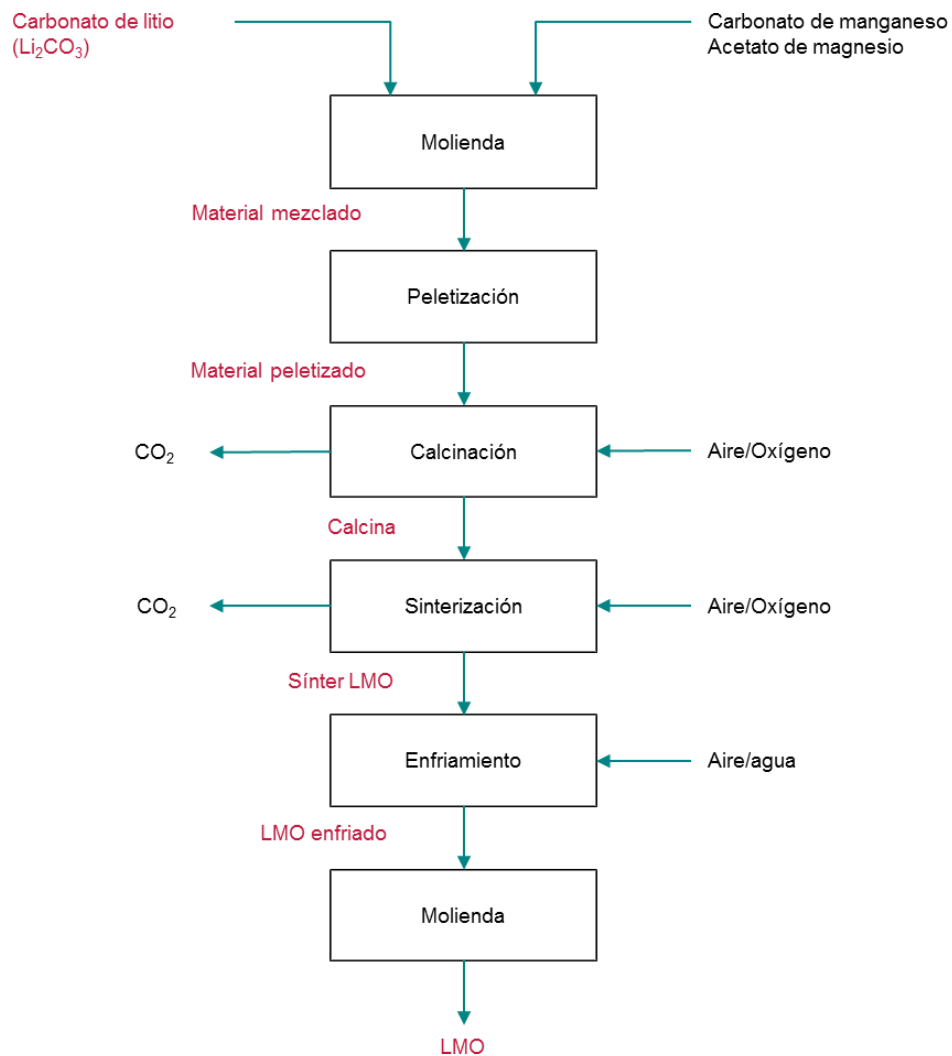


Figura 2.12. Diagrama del proceso productivo para la fabricación de material LMO.

Elaboración propia

El principal insumo de este material es el concentrado de manganeso, el cual se puede importar desde Brasil. Opcionalmente se puede usar magnesio en su síntesis con el objetivo de obtener mejores propiedades estructurales. (Cohen, 2017)

Este material podría producirse en Chile ya que el proceso productivo es relativamente simple y los insumos son de bajo costo, cercana importación, y de bajas emisiones. (Gaines & Dunn, 2015)

### C. Discusión de la oportunidad

A pesar de ser el material para cátodos con peor desempeño general, el costo de fabricación del LMO es mucho menor en comparación al resto de materiales. A esto, se suma que es el material para cátodos que menos contamina en su producción, y que su proceso de fabricación es simple. Así también, se debe considerar que las proyecciones de crecimiento para el LMO no son bajas, y su demanda aumentaría al año 2025.

Otro aspecto a favor, se tiene al observar que los insumos necesarios para producir este material se pueden encontrar en el mercado latinoamericano, lo que en definitiva reafirma que la fabricación de LMO es una oportunidad de manufactura para avanzar en la cadena de valor del litio en Chile.

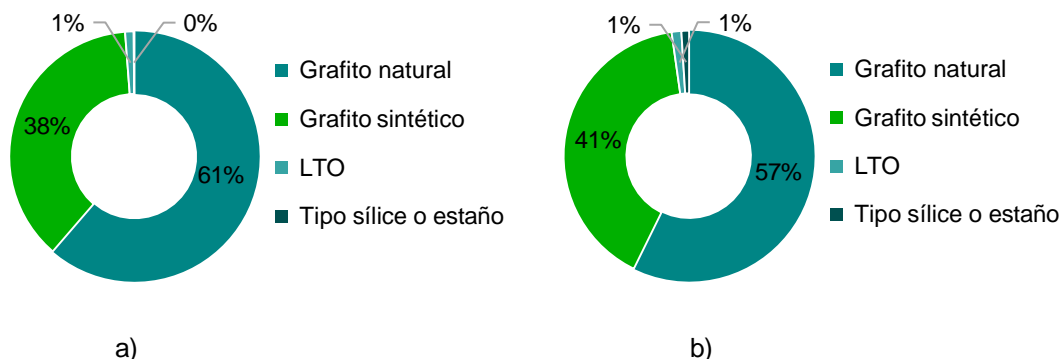
## 2.3 Materiales para ánodos

El valor del mercado de materiales para ánodos para baterías ion-litio es de 900 millones de dólares y la producción a nivel mundial superó las 88 kton en 2016, de acuerdo a Avicenne (2017). Se espera que a 2025 la producción aumente a una tasa anual del 10,2%, alcanzando las 263,5 kton en dicho año.

En cuanto a la concentración del mercado de fabricación de materiales para ánodos, el 80% del mercado se concentra en diez empresas, que tienen participaciones entre 2% y 24%, siendo China el país que abarca la mayor participación, con un 52% del mercado. En este caso, se tiene un IHH estimado de 1.226, lo que quiere decir que el mercado se encuentra concentrado, tomando en consideración que existen tres actores (BTR Energy, Hitachi Chemical y Shanshan) que tienen cuotas de mercado que triplican y hasta cuadruplican a sus competidores más cercanos.

Con respecto a la estructura general de la industria de materiales para ánodos, en la Figura 2.13(a) se observa que en primer lugar se encuentra la fabricación de materiales en base a grafito natural, con 61%, seguida del uso de grafito sintético con 38%. En menor medida se fabrican materiales para ánodos del tipo titanato de litio (LTO), con 1%, y finalmente materiales en base a sílice y estaño, con menos del 1% del total de la producción de materiales para ánodos.

De acuerdo a las proyecciones de Roskill en 2016, la estructura de la industria no cambiaría en 2025, como se observa en la Figura 2.13(b), manteniéndose los materiales en base a grafito natural como los de mayor volumen de fabricación, con una participación en la industria de 57%, seguido de grafito sintético con 41%. Con participaciones mucho menores, se menciona el material LTO y los de tipo sílice o estaño, con 1% respectivamente. La producción de todos los materiales para ánodos aumentará al año 2025, a tasas de crecimiento anual superiores al 10%.



**Figura 2.13. Participación de mercado de fabricantes de materiales para ánodos en base a producción en a) 2015, y b) 2025. (Roskill, 2016)**

Teniendo en consideración los alcances de este estudio, que busca identificar las oportunidades de manufactura en la cadena de valor del litio que Chile pueda aprovechar, a continuación, se analizan las opciones de materiales para ánodos que utilicen el litio como insumo en su fabricación, siendo el material LTO el único que cumple con esta condición dentro de los tipos de material utilizados actualmente. Además, se revisa el caso del litio metálico como alternativa de material para ánodos, identificando las potencialidades de esta tecnología y las consideraciones necesarias para su masificación en la industria de baterías ion-litio.

### 2.3.1 Titanato de litio (LTO)

#### A. Análisis de mercado

La producción de ánodos que contienen litio es pequeña, dado que representa el 1% (1,1 kton) del mercado del ánodo, que equivale a 88 kton, proyectándose para 2025 que la producción de materiales para cátodos LTO alcanzaría las 3,3 kton, creciendo a una tasa de 12,1% anual. (Roskill, 2016)

Sin embargo, estas proyecciones realizadas en 2016 no tienen en consideración algunos acontecimientos recientes que frenarían el crecimiento de la industria de materiales LTO. El primero de ellos dice relación con una nueva tecnología desarrollada por Toshiba que reemplazaría a partir del año 2019 el litio del ánodo LTO por niobio, un elemento que, como se explicará en el análisis técnico, mejoraría el desempeño general del ánodo. (Toshiba, 2017)

Por otra parte, una línea de investigación diferente ha avanzado en el desarrollo de una tecnología de electrolitos superior a las existentes en la industria, basada en sílice, que mejoraría considerablemente la densidad energética de las baterías, y reemplazaría a las soluciones electrolíticas utilizadas en la actualidad a partir del año 2020. Dicha tecnología se complementarían con el uso de litio metálico en el ánodo, por lo que, de llegar a masificarse, limitaría aún más las posibilidades de desarrollo de los materiales para ánodos LTO. (University of Texas, 2017)

Los productores de materiales LTO incluyen a Titan Kogyo e Ishihara Sangyo en Japón, POSCO ESM y Umicore en Corea del Sur, y Tronox en los Estados Unidos. Varias compañías chinas afirman que producen LTO, pero no se sabe si comercializan un producto comercial, como Yintong Group, Sichuan Xingneng New Materials, Shenzhen Tianjiao Technology y BTR Nano Technology. (Roskill, 2016)

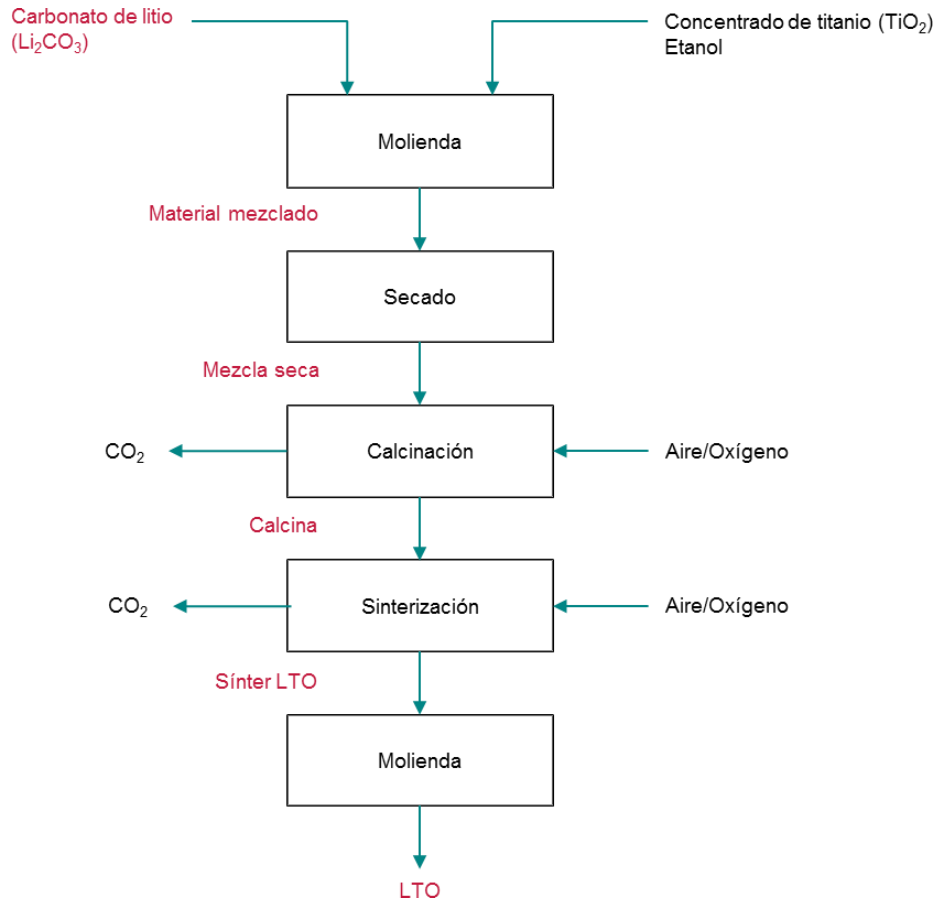
## B. Análisis técnico

Actualmente la amplia mayoría de los fabricantes de baterías utilizan grafito en sus ánodos, sin embargo, Toshiba ha desarrollado una batería que en su ánodo utiliza litio y titanio, el titanato litio. Este presenta ventajas frente al ánodo de grafito, tales como un mejor desempeño en potencia, ofreciendo una alta tasa de corriente tanto en carga como descarga. Esta característica permite una recarga mucho más rápida y una aceleración/torque más intenso, al tener una menor impedancia en comparación al grafito. Adicionalmente, la estructura de este material para ánodo no se descompone con los ciclos de carga y descarga, previniendo la generación de una interfaz de electrolito sólido (Solid Electrolyte Interphase - SEI) que es eléctricamente aislante. Esta propiedad, además de no producir dendritas de litio, hace que el LTO sea un material activo muy seguro, minimizando el riesgo de sufrir un desenfrenado térmico de la batería. Asimismo, este ánodo tolera un alto número de ciclos de carga/descarga, extendiendo la vida útil de la batería.

A pesar de tener varias ventajas, uno de sus inconvenientes es que entrega un pobre desempeño energético, restringiendo el alcance de los vehículos eléctricos, además de presentar altos costos de producción en comparación al grafito.

En la Figura 2.14 se presenta el diagrama de procesos para la producción de material anódico del tipo LTO. El proceso productivo comienza con una etapa de molienda, donde se disminuye el tamaño de los precursores a la vez que se produce la mezcla de estos. Los precursores utilizados en este proceso son carbonato de litio y concentrado de mineral de titanio. Una vez realizada la mezcla de los precursores, procede una etapa de secado con el objetivo de que la mezcla obtenida pase con el menor contenido de humedad a la etapa siguiente de calcinación.

La calcinación del material se realiza a una temperatura de 900 °C, en esta etapa se forman los primeros cristales de  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  a la vez que ocurre la descomposición térmica de los precursores. Finalizada la etapa de calcinación procede la sinterización de la calcina formada, esta etapa se realiza a una temperatura de 1050 °C, a esta temperatura se obtiene una alta movilidad iónica en la estructura cristalina del material  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ , lo que ayuda a la correcta formación de estos. El proceso productivo finaliza con la molienda del producto formado con el objetivo de adecuar el tamaño para su uso final.



**Figura 2.14. Diagrama del proceso productivo para la fabricación de material LTO.**  
Elaboración propia

Actualmente, Chile no posee producción local de titanio, por lo que la manufactura de este material no sería posible. Sin embargo, la empresa White Mountain posee un proyecto aprobado por la Comisión de Evaluación ambiental de la Región de Atacama, mediante el cual pretende producir 80.000 toneladas de concentrado de mineral de titanio. Si el proyecto, se llevara a cabo, aumentaría la factibilidad para la producción de LTO en el país debido a la disponibilidad de este recurso junto a las sales de litio. (Minero, 2017)

Hoy en día, Toshiba se caracteriza por la producción de baterías ion-litio con ánodos LTO. Sin embargo, dentro de sus últimos desarrollos en esta tecnología, la compañía ha reemplazado el litio del material por niobio. Este cambio en la tecnología mejora las características como la carga rápida, y también aumenta la densidad energética de la batería, la gran limitante en las baterías LTO. Por su parte, Toshiba espera que esta tecnología sea implementada durante el año 2019. (Toshiba, 2017)

### C. Discusión de la oportunidad

Muy pocos fabricantes de baterías y vehículos eléctricos están utilizando ánodos de LTO, ya que principalmente optan por el grafito, por lo que su participación en el mercado es mínima.

Por otra parte, el creador de esta tecnología, Toshiba, ya desarrolló la siguiente generación de este ánodo, reemplazando el litio por niobio, lo que mejoraría el desempeño global de la batería.

Un último aspecto a considerar es la etapa en el ciclo de vida en la que se encuentran las tecnologías de materiales para ánodos, ya que sería inminente el cambio de electrolitos líquidos a sólidos, lo que ampliaría notablemente el espectro de tecnologías para ánodos, desechando algunas de las alternativas actuales.

Teniendo en consideración ambos antecedentes, se considera que el material para ánodo LTO no sería una oportunidad de manufactura para avanzar en la cadena de valor del litio en Chile.

### 2.3.2 Litio metálico

La producción de litio metálico para ánodos de baterías ion-litio es minoritaria si se compara con el total de la industria de este componente. Sin embargo, el litio metálico es usado en diversas aplicaciones como aleaciones junto a aluminio y magnesio, baterías primarias, fusión nuclear de baja energía, usos militares y aeroespaciales, representando un 5% de la demanda global de litio en 2017. (SignumBox, 2017)

Por otra parte, a futuro se puede utilizar como ánodo junto con el electrolito sólido, lo que aumentaría drásticamente su demanda, por lo que es considerado una oportunidad interesante de analizar.

#### A. Análisis de mercado

La producción de litio metálico para ánodos de baterías ion-litio es pequeña, aún en fase de desarrollo, destinándose 0,3 kton de LCE en su fabricación. Una proyección realizada por Roskill en 2016 señala que a 2025, la producción de ánodos en base a litio metálico alcanzaría las 0,6 kton, creciendo a una tasa de 11,3% anual.

Por su parte, la producción global de litio metálico aumentaría desde las 9,4 kton de LCE en 2017 a 21,3 kton de LCE en 2025, según SignumBox (2017). Estas proyecciones no consideran el reemplazo de las tecnologías actuales de electrolitos por electrolitos sólidos, por lo que esta cifra estimada a 2025 podría ser incluso superior.

#### B. Análisis técnico

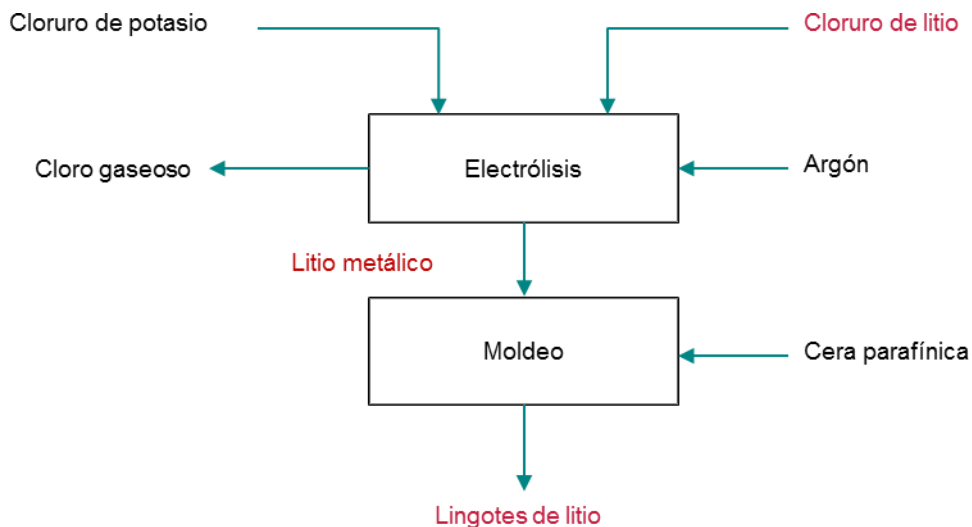
El litio metálico es considerado uno de los candidatos más prometedores para sistemas de almacenamiento al ofrecer la más alta densidad energética en las baterías ion-litio. Sin embargo, uno de los principales obstáculos que presenta implementar esta tecnología es la formación de dendritas<sup>4</sup> en el ánodo, fenómeno que se podría superar al implementar un electrolito de estado sólido en el futuro. (Cheng, 2017)

En la Figura 2.15 se presenta el diagrama de procesos para la formación de litio metálico. El proceso productivo comienza con la mezcla de las sales en una razón 55% cloruro de litio y 45% cloruro de potasio los cuales son sometidos a un proceso de electrólisis a alta temperatura, donde ocurre la

---

<sup>4</sup> Ramificaciones metálicas que crecen en el ánodo, por el electrolito hacia el cátodo, donde podría cortocircuitar la celda, provocando una ignición y un eventual desenfrenado térmico.

formación de litio metálico, el cual procede a una etapa de moldeo donde se forman lingotes de litio metálico, los que son cubiertos con cera parafínica debido a su alta reactividad con el oxígeno.



**Figura 2.15. Diagrama del proceso productivo para la fabricación de litio metálico.**  
Elaboración propia

Actualmente, Chile produce cloruro de potasio y cloruro de litio, importantes sales utilizadas para la producción de litio metálico, por lo que la producción de litio metálico no posee desventajas con respecto a la obtención de los insumos.

El proceso productivo tiene como subproducto el gas cloro que es altamente tóxico. Se deben instalar sistemas de mitigación de gas cloro asociados a las plantas de producción de litio metálico para una producción amigable con el medioambiente y segura para la mano de obra. También se podría implementar un sistema de licuación del gas cloro para poder procesarlo y venderlo para producir hipoclorito o ácido clorhídrico, elementos muy usados en la industria. Esta mitigación constituye aproximadamente el 33% de los costos para una planta de litio metálico.

De acuerdo a Rockwood Lithium (2014), el costo global de la producción de litio metálico en Chile es 3,9 veces más caro que el mismo proceso productivo en Estados Unidos. Esta estimación, no obstante, no considera los cambios en el precio de la electricidad en Chile en los últimos años, que disminuiría la brecha de costos.

Por su parte, este proceso consume una gran cantidad de electricidad, por lo que es necesario asegurar una producción eléctrica fiable y en lo posible, de limpia generación. En este sentido, Chile es uno de los países con mayores proyectos en ejecución, construcción y desarrollo en materia de energías renovables no convencionales, por lo que la industria chilena es atractiva para este tipo de procesos que demandan altas cantidades de energía eléctrica con una baja o nula huella de carbono.

Es necesario mencionar, además, que el proceso de electrólisis es el mismo utilizado en la industria del cobre, por lo que se tiene el capital humano necesario y la tecnología requerida por esta industria.

### C. Discusión de la oportunidad

Dentro de los últimos desarrollos tecnológicos, la implementación del litio metálico en baterías secundarias ion-litio podría ser factible y segura cuando entre al mercado el electrolito sólido, material que mejoraría el desempeño general del sistema de almacenamiento eléctrico, al evitar la formación de dendritas en su estructura cristalina interna

Actualmente Chile posee los insumos necesarios para la producción del litio metálico, como el cloruro de potasio y de litio. Adicionalmente, a futuro el país tendrá la capacidad de producir energía para implementar un proyecto de esta envergadura con una electricidad de bajo costo.

El proceso de mitigación de gases contaminantes, como el cloro, puede encarecer el proceso productivo del litio metálico, pero no a tal punto de comprometer el proyecto.

En este contexto, se considera que la fabricación de litio metálico es una oportunidad de manufactura para avanzar en la cadena de valor del litio en Chile, solventando su alta demanda energética a través de fuentes de energías renovables.

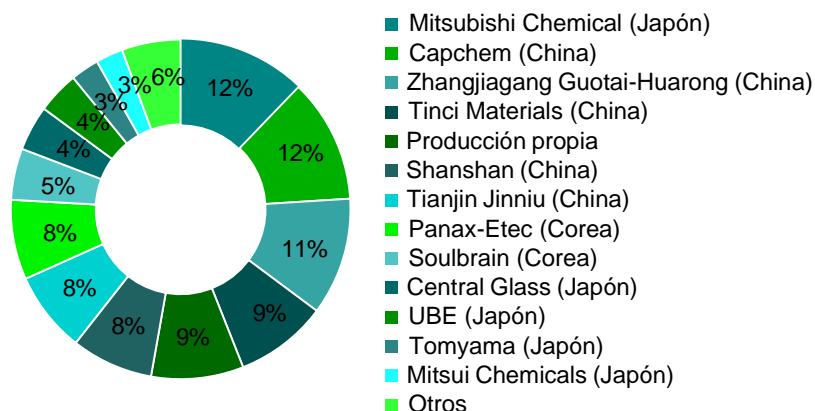
## 2.4 Electrolitos

El considerable crecimiento que ha experimentado la industria de baterías ion-litio, ha impulsado la demanda de todos sus componentes. Tal es el caso del electrolito, cuyo mercado alcanzó los 1,1 mil millones de dólares en 2016, creciendo entre 2006 y 2016 a una tasa anual de 19%, superando las 86 kton de este material en 2016. Considerando este antecedente, el mercado de electrolitos podría representar una oportunidad de manufactura para avanzar en la cadena de valor del litio en Chile, esto teniendo en cuenta que todas las baterías ion-litio demandan material para electrolitos.

### A. Análisis de mercado

En cuanto a la producción de electrolitos, siguiendo la tendencia de la producción de otros fabricantes de componentes para baterías ion-litio, la fabricación de electrolitos se concentra en países asiáticos, donde China se presenta, en la suma de las participaciones individuales de sus empresas, como el país con una mayor participación de mercado, abarcando el 55% éste, seguido por Japón con un 26% y en menor medida por Corea con un 13%, bajo el mismo parámetro.

Como se observa en la Figura 2.16, las empresas con las mayores participaciones de mercado son, ambas con un 12%, Mitsubishi Chemical (Japón) y Capchem (China), seguidas de cerca por Zhangjiagang Guotai-Huarong, también de China, con un 11%. Con participaciones menores, pero cercanas a los líderes en el mercado, se encuentran Tinci Materials, Shanshan y Tianjin Jinniu de China con el 9%, 8% y 8% del mercado respectivamente, en el mismo orden que Panax-Etec de Corea (8%). En un grupo de menor participación se tiene a Soulbrain de Corea, con un 5% de participación, y las empresas japonesas de Central Glass, UBE, Tomyama y Mitsui Chemicals, con participaciones que rondan entre el 4% y 3% del mercado. Cabe destacar que con un 9% de participación se encuentran con empresas en diferentes localidades, que cuentan con una producción propia de soluciones electrolíticas, abasteciéndose internamente de este material.



**Figura 2.16. Participación de mercado de fabricantes de electrolitos en base a capacidad productiva (2015).** Elaborado en base a (Roskill, 2016)

Desde el punto de vista de la concentración de mercado para los electrolitos, éste no se encuentra concentrado, presentando un IHH de 850, donde el 80% del mercado se concentra en nueve empresas, con participaciones de entre un 8% y 12%.

Sin embargo, estos antecedentes están basados en electrolitos que utilizan litio. Los nuevos desarrollos en este componente proyectan el uso de sílice en la elaboración de electrolitos, descartando el uso de litio, como se detalla a continuación, por lo que bajo este escenario, se prevé un decrecimiento en el mercado de los electrolitos en base a litio.

## B. Análisis técnico

El electrolito sirve como un medio que permite el transporte de carga eléctrica entre el ánodo y el cátodo. El electrolito, como el utilizado en las baterías ion-litio, consiste en sales solubles, ácidos y bases líquidas.

Existen varias formas de electrolitos líquidos que contienen sales líticas con solventes orgánicos. En ocasiones se le agrega carbonatos para aumentar la conductividad y ampliar el rango de temperatura, mientras otros aditivos permiten disminuir la formación de gases y mejorar el ciclo de vida.

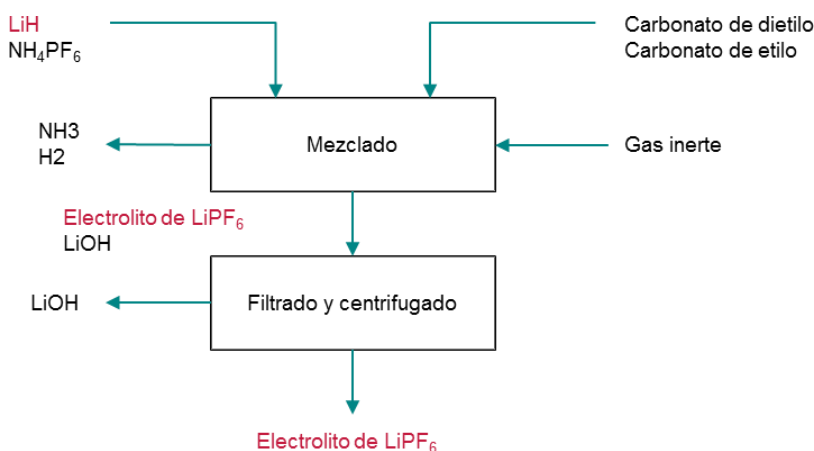
Las sales líticas más comunes utilizadas en los electrolitos son el hexafluorofosfato de litio ( $\text{LiPF}_6$ ) y el tetrafluoroborato de litio ( $\text{LiBF}_4$ ), que son mezclados con solventes o carbonatos.

La estructura química de este material es usualmente estable, sin embargo, en el caso de las baterías ion-litio es común la formación de una capa llamada interfaz de electrolito sólido (SEI). Esta capa actúa como un aislante entre los electrodos y el no controlar su formación podría causar un desenfrío térmico en la batería.

Durante el 2017, el creador de la primera batería ion-litio, Dr. John Goodenough, anunció la siguiente generación de electrolito de estado sólido, que consiste en un material en base a vidrio (sílice), descartando el uso de litio en el mediano plazo. Por su naturaleza sólida también sustituiría el separador entre los electrodos. Este nuevo invento promete una batería de estado sólido de bajo costo y no combustible. Además, ofrecería un prolongado ciclo de vida, con una alta densidad de energía volumétrica y altos ciclos de carga/descarga. Sin embargo, esta nueva tecnología aún no se encuentra optimizada para entregar altos niveles de corriente. (University of Texas, 2017)

En la Figura 2.17 se presenta el diagrama de procesos para la producción de electrolito  $\text{LiPF}_6$ . El proceso productivo comienza con la adición de hidruro de litio y hexafluorofosfato de amonio a una mezcla de carbonato de etilo y carbonato de dietilo líquido formando una solución donde reaccionan los compuestos sólidos formando el hexafluorofosfato de litio y liberando amoníaco e hidrógeno gaseoso.

Con el objetivo de desplazar los gases de la reacción química ocurrida durante la mezcla, la solución es gasificada con gas inerte, logrando así desplazar el equilibrio químico hacia la producción de  $\text{LiPF}_6$ . Además, durante esta etapa ocurre formación de hidróxido de litio, el cual no se disuelve en la solución, por lo que ésta debe ser sometida a una etapa de filtrado y centrifugado con el fin de extraer todos los sólidos que pudiesen existir en la solución. Una vez filtrado, el producto queda listo para su comercialización. (Burnaby, Brithish Columbia Patente nº 0 643 433 B1, 1995)



**Figura 2.17. Diagrama de procesos para la producción de electrolito de  $\text{LiPF}_6$ .** Elaboración propia

Actualmente, Chile no posee producción de hidruro de litio, por lo que no tendría el insumo necesario para su síntesis. Por otro lado, podría producirse este insumo junto al hexafluorofosfato de amonio, sin embargo, estas tecnologías pronto serán reemplazadas por el electrolito en estado sólido, el cual reemplaza el electrolito de litio por uno de sílice.

Hoy en día, la producción de electrolito no es prioritaria dentro de las oportunidades de desarrollo de productos de litio, quedando relegada tras los materiales para cátodos y ánodos.

### C. Discusión de la oportunidad

Hay una tecnología de electrolito sólido en desarrollo que sería mucho más eficiente que el actual electrolito líquido y que podría masificarse en los próximos 5 años, aumentando las capacidades de las baterías y abaratando los costos de producción.

La masificación de electrolito sólido frenaría el desarrollo de la industria del electrolito actual, disminuyendo el consumo de litio en la batería. Un proyecto de inversión en una planta de electrolito líquido correría el riesgo de no generar rentabilidad suficiente en el mediano plazo, por lo que se

descarta la fabricación de electrolito como oportunidad para avanzar en la cadena de valor del litio en Chile.

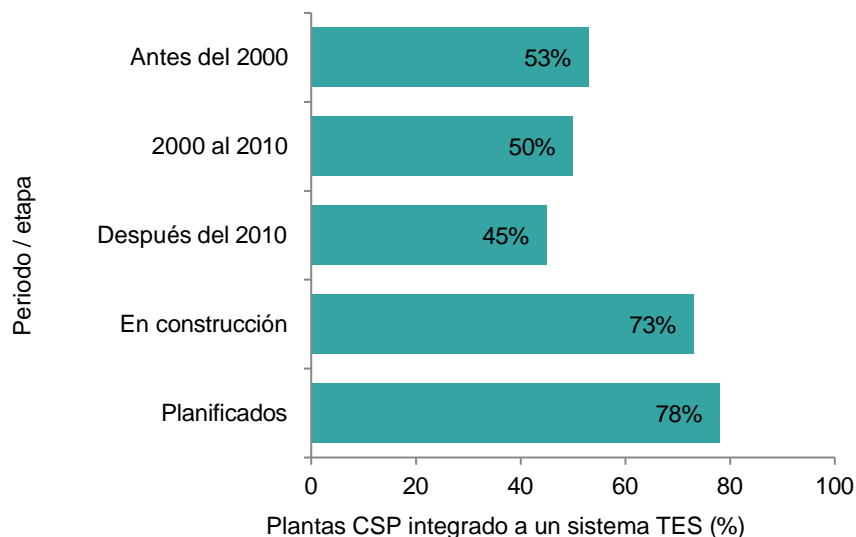
## 2.5 Almacenamiento térmico

El creciente interés de los estados por impulsar el desarrollo de diversas tecnologías de generación de energía menos contaminantes, ha generado una paulatina diversificación de sus matrices energéticas hacia fuentes de energía no convencionales, como el caso del almacenamiento térmico de energía solar.

Actualmente las tecnologías de almacenamiento térmico solar (TES) no utilizan sales ternarias con litio, pero tienen gran potencial si se considera que por sus características las sales ternarias serían capaces de mejorar notablemente la capacidad de almacenamiento de las plantas de concentración solar que incorporen sistemas TES.

### A. Análisis de mercado

En la actualidad existen 35 plantas de concentración solar (CSP) que incorporan tecnologías de almacenamiento térmico (TES), y se espera que con los proyectos en ejecución y planificados esta cifra aumente. Así, las plantas CSP que integren tecnologías TES aumentarían del 45% actual hasta el 78% del total de plantas de concentración solar, como muestra la Figura 2.18. Es importante recordar que solo las plantas con sistemas de almacenamiento térmico podrían utilizar sales ternarias.



**Figura 2.18. Evolución de plantas de concentración solar que integran tecnologías de almacenamiento térmico.** (Pelay, Luo, Fan, Stitou, & Rood, 2017)

El almacenamiento térmico de energía enfrenta dos desafíos que podrían convertirse en poderosos obstaculizadores para el desarrollo de este mercado. El primero de ellos es el desconocimiento de los resultados de las pruebas efectuadas con sales ternarias con litio a nivel de planta piloto, lo que limita las posibilidades de realizar proyecciones con parámetros más estrictos, debido al alto grado de incertidumbre al respecto, obligando a incurrir en una serie de supuestos en las estimaciones.

El segundo factor condicionante se relaciona con el alto costo de inversión que representa la instalación de una planta CSP con sistemas TES frente a una planta sin almacenamiento térmico. En este sentido, es posible afirmar que se requiere de un capital intensivo para la instalación de las plantas con tecnologías TES, que va desde los 6.400 a los 8.900 US\$/kW, mientras que, en comparación, una planta de concentración solar sin TES tiene un costo de instalación de 4.000 US\$/kW.

## B. Análisis técnico

Las plantas de concentración solar en la actualidad utilizan sales térmicas, llamadas “sales solares”, para almacenar el exceso de calor y utilizarlo cuando la radiación solar es baja o nula (noche) para seguir produciendo electricidad. Dentro de las últimas investigaciones de estas sales, se está probando una sal ternaria que utiliza litio en su fórmula. Esta nueva sal térmica de litio ha sido analizada y los resultados muestran que ofrece una mayor densidad energética, lo que se necesitaría menos material para almacenar la misma cantidad de energía. Además, aumenta el rango de temperatura de trabajo, con un punto de fusión más bajo disminuyendo el riesgo de solidificación al enfriarse. En la Tabla 2.1 se presenta una comparativa de las sales térmicas que existen hoy en día.

**Tabla 2.1. Propiedades de sales para almacenamiento térmico**

#	Mezcla	Punto de fusión (°C)	Temp. de descomposición térmica (°C)	Calor específico <sup>5</sup> (kJ/kg-K)	$\Delta T$ (°C) <sup>6</sup>
1	40% KNO <sub>3</sub> -60% NaNO <sub>3</sub>	222	588,5	1,5	366,5
2	25.92% LiNO <sub>3</sub> + 20.01% NaNO <sub>3</sub> + 54.07% KNO <sub>3</sub>	117	435	1,63	318
3	30% LiNO <sub>3</sub> + 60% KNO <sub>3</sub> + 10% Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	132	567,2	1,4	435,2
4	53% KNO <sub>3</sub> + 29% LiNO <sub>3</sub> + 18% NaNO <sub>3</sub>	120	540	1,64	420
5	20% LiNO <sub>3</sub> + 52% KNO <sub>3</sub> + 28% NaNO <sub>3</sub>	130	600,5	1,09	470,5

Elaborado en base a (Montané, Cáceres, Villena, & O’Ryan, 2017)

De todas las sales térmicas anteriores, la número 4 presenta las mejores propiedades termodinámicas. En la actualidad no existe ninguna planta comercial que utilice este tipo de sal ternaria en sus procesos. Recientemente la planta Arquimed, en Italia, ha probado este tipo de sales ternarias para probar su desempeño. Sin embargo, los datos de estas pruebas no están disponibles de forma pública.

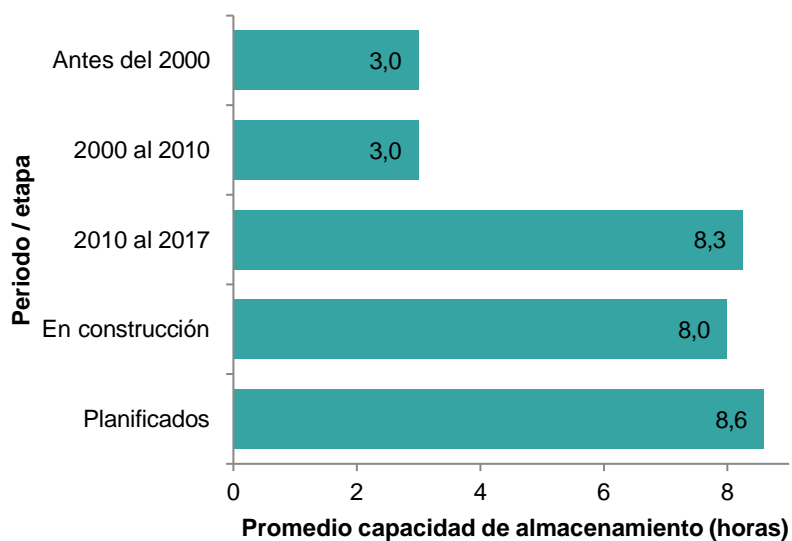
<sup>5</sup> El calor específico de una sustancia es la energía necesaria para aumentar en 1 grado la temperatura de 1 kilogramo de dicha sustancia

<sup>6</sup> Las diferencias de temperaturas en grados Celsius y Kelvin son lineales y responden a la fórmula  $K=^{\circ}C+273,15$

La función de las tecnologías de almacenamiento de energía térmica es almacenar energía en forma de calor, que será usada posteriormente en la generación de energía eléctrica. La industria valora el tiempo que la tecnología puede almacenar calor sin que se produzcan pérdidas de temperatura.

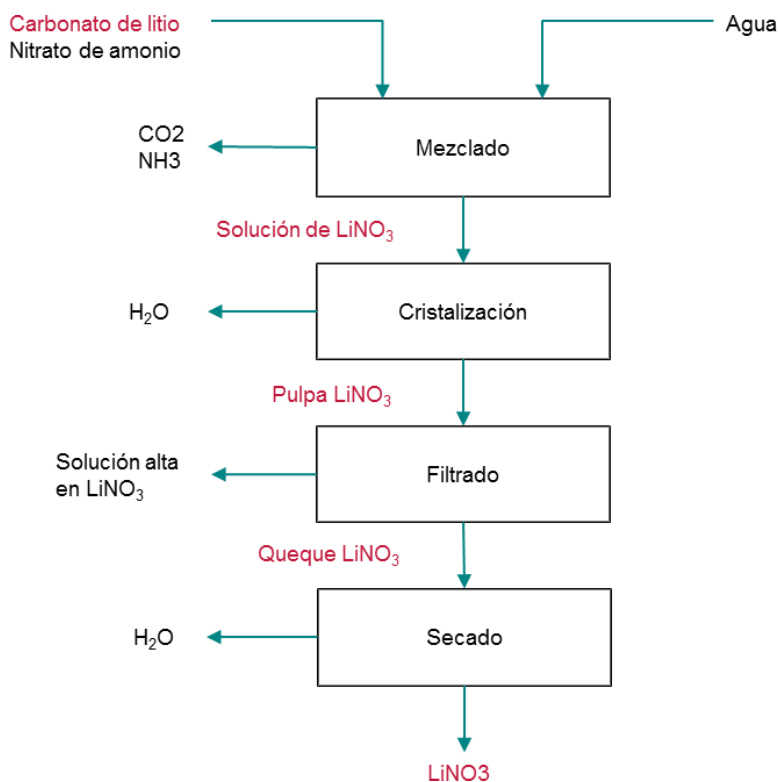
Considerando estos antecedentes, la Figura 2.19 presenta la evolución de la capacidad de almacenamiento, en horas, de los proyectos de concentración solar de potencia. En esta se observa que hasta el año 2010 el promedio de horas de almacenamiento térmico en las plantas de concentración solar era de solo 3 horas. Entre el año 2010 y la actualidad, se observa un crecimiento considerable del promedio de horas de almacenamiento a 8,3 horas, lo que implica un aumento del 177%.

Considerando los proyectos que están actualmente en construcción, cuando estos estén terminados, el promedio en las horas de almacenamiento será de 8 horas. Finalmente, considerando que todos los proyectos entren en funcionamiento, en las condiciones establecidas, el promedio en las horas de almacenamiento podría incrementarse a 8,6 horas.



**Figura 2.19. Capacidad de almacenamiento para plantas de concentración solar de potencia.** Elaborado en base a (NREL, 2017)

La Figura 2.20 presenta el diagrama de procesos para la producción de nitrato de litio. El proceso productivo comienza con la mezcla de carbonato de litio y nitrato de amonio los cuales reaccionan en la solución formando dióxido de carbono y amoniaco gaseoso, los cuales deben ser captados para disminuir las emisiones medioambientales. Posteriormente, procede una etapa de cristalización, con el objetivo de lograr la precipitación del nitrato de litio, el cual debe ser filtrado y posteriormente secado para su comercialización.



**Figura 2.20. Diagrama del proceso productivo para la fabricación de nitrato de litio.**  
Elaboración propia

Actualmente, Chile no produce nitrato de litio. Sin embargo, produce nitratos de sodio y potasio, constituyentes principales de las sales ternarias utilizadas de manera experimental en la investigación pertinente a almacenamiento térmico. De lo anterior, se desprende la posibilidad de manufactura local de nitrato de litio, el cual junto a los nitratos de potasio y sodio producidos actualmente en Chile podrían ser comercializados como medio de almacenamiento térmico. (SQM, 2017)

Por otro lado, la empresa Enaex posee producción local de nitrato de amonio en la ciudad de Mejillones con una producción de 800 kton anualmente.

Finalmente, Chile tiene el potencial de implementar plantas de concentración solar de alta eficiencia, por sus regiones de alta radiación solar, y ser capaz de producir los insumos que necesita para operar con la máxima densidad energética posible, utilizando las sales ternarias de litio.

### C. Discusión de la oportunidad

La utilización de sales ternarias que incluyan al nitrato de litio en los sistemas de almacenamiento térmico representa una importante oportunidad para las intenciones de Chile de avanzar en la cadena de valor del litio.

Las sales ternarias poseen mayor capacidad calorífica que las sales solares usadas en la actualidad, por lo que demandarían menor cantidad de material. Además, todos los insumos para la producción de sales ternarias se pueden conseguir en el mercado chileno, facilitando la entrada a este mercado.

Sin embargo, a pesar de la gran oportunidad que eventualmente representarían estas tecnologías, la producción de sales ternarias que incluyan al nitrato de litio no se producen de manera comercial y continúan en fase de desarrollo.

Otro antecedente a destacar es la ausencia de información relativa al uso de sales ternarias en los proyectos en construcción o planificados de plantas de concentración solar con sistemas de almacenamiento térmico, situación que genera incertidumbre en la realización de proyecciones sobre el uso del litio en estos sistemas.

Lo anterior, sumado al alto costo de inversión que actualmente tienen las plantas CSP con tecnologías TES, obliga a descartar la posibilidad de avanzar en la cadena de valor del litio con la producción de sales ternarias que incluyan al nitrato de litio, al menos hasta que la comunidad científica aclare el panorama respecto a las complicaciones que podría involucrar el uso de esta nueva tecnología. En este sentido es necesario recalcar que esta recomendación podría modificarse dependiendo de los resultados de las investigaciones que se llevan a cabo hasta el momento, por lo que tiene el carácter de transitorio.

### 3 Conclusiones

En base al análisis de las potenciales oportunidades descritas para el desarrollo de la cadena de valor del litio en Chile, se puede decidir sobre cuáles de éstas no podrían ser consideradas, ya sea por razones de mercado o técnicas, y cuáles presentan antecedentes que avalan su consideración para el estudio.

En cuanto a aspectos de mercado, basándonos en los índices de concentración de los mercados para los cuales es posible calcular su IHH, como se puede ver en la Tabla 3.1, las baterías ion-litio y materiales para ánodos no se muestran atractivos al mostrarse índices de alta concentración de sus mercados, lo que dificulta el ingreso de nuevos participantes. Es necesario considerar, en el caso de los materiales para ánodos, que éste índice incluye a todos los tipos de fabricantes de ánodos y no sólo a quienes producen ánodos que incluyen litio.

En el caso de los materiales para cátodos NMC, si bien se presentan grados de concentración, aún se encuentra en el límite de este índice, por lo que bajo este criterio no se podría descartar con seguridad esta oportunidad.

En cuanto a los mercados de materiales para cátodos LFP y LMO, así como para los mercados de electrolitos, bajo el criterio de los índices de concentración de los mercados, estas oportunidades se presentan favorables.

**Tabla 3.1. Resumen de IHH en los mercados de referencia analizados**

Mercado	IHH
Baterías ion-litio	1.298
Materiales para cátodos LFP	346
Materiales para cátodos NMC	1.058
Materiales para cátodos LMO	716
Materiales para ánodos	1.226

Mercado	IHH
Electrolitos	850

#### Elaboración propia

Aun cuando se proyecta un alza creciente en el uso de baterías ion-litio, otro aspecto de mercado que afecta la implementación de su producción en el país es la fuerte competencia con que se encontraría un nuevo participante, dado el alto nivel de expertise que tienen los principales actores actuales, lo que les ha permitido alcanzar economías de escala que serían difíciles de igualar.

El alza esperada en el uso de baterías ion-litio influye positivamente en el mercado de sus componentes, como en el caso de los materiales para cátodos LFP, NMC y LMO, que proyectan una alta tasa de crecimiento, además de la pronta expiración de las patentes de fabricación de cátodos LFP, lo que abarataría su producción por concepto de licencias.

Caso contrario se da en el caso de los materiales para ánodos LTO. Estos no solo tienen una participación menor dentro del segmento de los ánodos, sino que no se prevé un escenario auspicioso para el litio en este segmento, ya que, por un lado, los ánodos más usados son aquellos compuestos por grafito, y por otro lado, los ánodos compuestos de litio están siendo reemplazados por niobio, que presentan un mejor desempeño. Situación similar se da en los electrolitos, donde en los próximos años el litio dejaría de ser utilizado en este componente, los cuáles serían reemplazos por electrolitos sólidos en base a sílice, los que permiten aumentar las capacidades de las baterías, y a un menor costo.

Desde el punto de vista técnico, particularmente el acceso a los insumos para la fabricación, el escenario se presenta favorable para la producción de materiales para cátodos LFP, NMC y LMO, ya sea porque los insumos críticos se encuentran en Chile, o bien porque se encuentran en el mercado latinoamericano y es posible acceder a ellos. Situación similar se dan para la producción de litio metálico y producción de sales ternarias que incluyen nitrato de litio, para los sistemas de almacenamiento térmico.

En el caso del litio metálico, además de contar con los insumos necesarios para su producción, puede favorecerse de los proyectos en Chile para la producción de energía eléctrica a partir de energías renovables no convencionales, lo que permitiría reducir los costos de fabricación de este material. Y por otro lado, su fabricación comparte procesos con la industria del cobre, lo que podría significar que existe la tecnología y el capital humano en el país con el conocimiento para participar en la producción de litio metálico.

Sin embargo, en el caso de las sales ternarias para los sistemas de almacenamiento térmico, si bien las pruebas realizadas hasta el momento indican que poseen mayores densidades energéticas que las sales solares usadas actualmente, esta tecnología aún se encuentra en fase de desarrollo, y no se han identificado proyectos de plantas de concentración solar con estos sistemas de almacenamiento térmico, por lo que en estos momentos no es posible calificar este segmento de mercado como una oportunidad para Chile en el desarrollo de la cadena de valor para el litio.

Con esto, las oportunidades para avanzar en el desarrollo de la cadena de valor del litio se presentarían en la fabricación de materiales cátodos (LFP, NMC y NMO), y litio metálico para materiales para ánodos.

## Bibliografía

Blina Minerals. (2017). Acquisition of cobalt-prospective project in Chile. Obtenido de Blina Minerals: <https://hotcopper.com.au/documentdownload?id=uOMxKKzFkiWRTLKhOROKAx-jvTDYC5gm1yxCZovNwke92GA%3D%3D>

Cheng, X.-B. (2017). Toward Safe Lithium Metal Anode in Rechargeable Batteries: A. Chemical Reviews.

Cohen, S. (2017). Lithium-ion Battery Materials and Engineering.

Corfo. (2017). Lithium Call 2017.

Deutsche Bank. (2016). Welcome to the Lithium-ion Age. Frankfurt: Deutsche Bank Markets Research.

Gaines, L., & Dunn, J. (2015). Lithium-Ion Battery Production and Recycling Materials Issues. Argonne National Laboratory.

Infobae. (2017). Apple anunció que no comprará más cobalto de las minas de Congo donde trabajan niños. Obtenido de Infobae Web site: <https://www.infobae.com/america/tecno/2017/03/07/apple-anuncio-que-no-comprara-mas-cobalto-de-las-minas-de-congo-donde-trabajan-ninos/>

London Metal Exchange. (2017). LME Cobalt. Obtenido de LME Website: <https://www.lme.com/Metals/Minor-metals/Cobalt#tabIndex=0>

Mao, H. (1995). Burnaby, British Columbia Patente nº 0 643 433 B1 .

Minero, G. (2017). Sociedad Contractual Minera White Mountain Titanium. Obtenido de Guia de minerales chile: <http://guiamineradechile.cl/sociedad-contractual-minera-white-mountain-titanium/>

Montané, M., Cáceres, G., Villena, M., & O'Ryan, R. (2017). Techno-Economic Forecasts of Lithium Nitrates for Thermal Storage System. Mdpi.

NREL. (2017). Concentrating solar power projects. Obtenido de NREL Web site: <https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/>

Observatorio de Competitividad. (2014). Observatorio de Competitividad. Obtenido de <http://www.competitividad.org.do/el-indice-de-herfindahl-o-indice-de-herfindahl-e-hirschman-ihh/>

Orocobre. (2017). Key concerns for the lithium industry to the end of the decade.

Pelay, U., Luo, L., Fan, Y., Stitou, D., & Rood, M. (2017). Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82-100. doi:10.1016/j.rser.2017.03.139

Roskill. (2016). *Lithium: Global Industry, Markets and Outlook to 2025*.

Roskill. (2017). The impact of automotive electrification on lithium: 1 TWh and 1 Mt LCE in 10 years?

SEC. (2005). Patent Sublicense Agreement. Obtenido de U.S. Securities and Exchange Commission: [https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1167178/000104746912002475/a2207978zex-10\\_36.htm](https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1167178/000104746912002475/a2207978zex-10_36.htm)

SignumBox. (2017). *Lithium Batteries & Vehicles*.

SQM. (2017). Sales Termo-Solares. Obtenido de SQM Web site: <http://www.sqm.com/es-es/productos/quimicosindustriales/salestermo-solares/nitratosdesodioypotasio.aspx>

Torrey Hills Technologies. (2017). Furnace Temperature and Atmosphere Influences on Producing Lithium Iron. Obtenido de Belt Furnace Web site: [http://www.beltfurnaces.com/doc/White\\_paper\\_Battery.pdf](http://www.beltfurnaces.com/doc/White_paper_Battery.pdf)

Toshiba. (2017). Toshiba Develops Next-Generation Lithium-ion Battery with New Anode Material. Obtenido de Toshiba Press release: [https://www.toshiba.co.jp/about/press/2017\\_10/pr0301.htm](https://www.toshiba.co.jp/about/press/2017_10/pr0301.htm)

Toshiba. (3 de Octubre de 2017). Toshiba Develops Next-Generation Lithium-ion Battery with New Anode Material. Tokyo, Japan.

University of Texas. (2017). Lithium-Ion Battery Inventor Introduces New Technology for Fast-Charging, Noncombustible Batteries. *UT News*.

University of Texas. (28 de Febrero de 2017). Lithium-Ion Battery Inventor Introduces New Technology for Fast-Charging, Noncombustible Batteries. Austin, Texas, Estados Unidos.

USGS. (2017). Mineral commodity summaries 2017. Obtenido de USGS Website: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2017/mcs2017.pdf>