



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELÉCTRICA

**MODELACIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE BATERÍAS DE IÓN-LITIO
PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS O HÍBRIDOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

MATÍAS GABRIEL MAYOL SUÁREZ

**PROFESOR GUÍA:
RODRIGO ERNESTO EDUARDO PALMA BEHNKE**

**MIEMBROS DE LA COMISION:
MARCOS EDUARDO ORCHARD CONCHA
HÉCTOR MILER AGUSTO ALEGRIA**

**SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2012**

MODELACIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE BATERÍAS DE IÓN-LITIO PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS O HÍBRIDOS

El objetivo de este trabajo es aportar a la investigación e innovación tecnológica, mediante el desarrollo de un modelo computacional que permita comprender las consecuencias económicas y medioambientales de implementar parte o la totalidad del proceso de fabricación de baterías de ión de litio para vehículos eléctricos o híbridos en Chile. Este trabajo se enmarca en el proyecto CIL “Centro de Innovación del litio” perteneciente a la universidad de Chile, cuyo objetivo es “desarrollar un área de investigación aplicada sobre el uso del litio en baterías avanzadas que se usarán en los nuevos vehículos eléctricos”.

Se construye un modelo del proceso productivo de baterías de ión de litio, el que divide su proceso de producción en 5 etapas. Para cada una de las etapas y su interacción con las otras se estiman los costos desagregados. Para la obtención de materias primas y exportación de baterías, se estiman las emisiones de dióxido de carbono. Lo anterior permite calcular el valor actual neto (VAN) del proyecto y el impacto medioambiental del transporte de las materias primas y baterías terminadas.

En este trabajo, se modela el proceso de fabricar baterías de ión-litio tipo NCA-G (con materiales activos compuestos de $LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$ para el cátodo y grafito para el ánodo), con un cliente en U.S.A. Se consideran los costos de inversión, fijos y variables. La mayor parte de los costos se obtienen de referencias extranjeras, pero se ha buscado considerarlos de forma que sean adecuados para el modelo del proceso de fabricación en Chile. El resultado de este modelo, muestra que el proceso evaluado es rentable bajo ciertos supuestos detallados a continuación. Las materias primas han sido evaluadas a los menores precios encontrados y los proveedores son los más cercanos a una localización en el norte de Chile. Asimismo, se supone un decrecimiento de los costos de producción del 20% anual exponencial y costos del transporte de un 52% de los costos encontrados en empresas de correos. Cabe destacar, que en las baterías NCA, el costo es elevado y que para obtener el valor de realizar algunos procesos productivos, se consideran equivalentes conservadores con la información disponible de precios de venta en el extranjero.

Respecto del impacto medioambiental del proyecto, se compara la emisión de gases de efecto invernadero por parte del transporte de materias primas y baterías, para una planta ubicada en Antofagasta, con la misma planta ubicada en China. En ambos casos se considera un cliente en los Estados Unidos. Se observa que las emisiones del transporte de las baterías terminadas, es mucho mayor para China que para Chile, a pesar de que la emisión por parte de la importación a Chile es cercana a las emisiones de las importaciones para China. Se observa que las mayores emisiones por distancia recorrida, se tienen con las baterías terminadas.

Dado que la producción de baterías está fuertemente incentivada en los Estados Unidos, competir con ellos, resultaría difícil, e incluso si ellos producen sus baterías probablemente contaminen menos debido al transporte, que importándolas desde Chile. Se propone como trabajo futuro, el generar un grupo multidisciplinario, que por un lado busque mercados latinoamericanos de baterías, determine sus características; y por otro construya un modelo computacional que en base a características de los mercados de baterías que se deseen satisfacer, permita un análisis de los proyectos de fabricación o ensamblaje de baterías.

Agradecimientos

A mi familia por su apoyo incondicional, durante todos mis años de estudio.

A mis compañeros, profesores y amigos, por ofrecerme conocimientos, experiencia y orientación.

Gracias

Tabla de contenidos

| | |
|--|----|
| Capítulo 1: Introducción | 1 |
| 1.1. Motivación | 1 |
| 1.2. Objetivos | 1 |
| I. Objetivos generales | 1 |
| II. Objetivos específicos | 1 |
| 1.3. Estructura y alcances del trabajo | 2 |
| Capítulo 2: Revisión bibliográfica | 3 |
| 2.1. Funcionamiento y componentes fundamentales de las baterías de ión-litio | 3 |
| I. Principio de funcionamiento | 3 |
| II. Partes fundamentales en las baterías de ión-litio | 4 |
| 2.2. Manufactura de baterías de ión-litio | 5 |
| I. Diseño de la celda | 5 |
| II. Fabricación de las celdas | 6 |
| III. Preparación de los electrodos | 6 |
| IV. Fabricación de celdas cilíndricas | 9 |
| V. Fabricación de celdas prismáticas | 10 |
| VI. Fabricación de celdas para baterías de litio-ión-polímero | 13 |
| VII. Formación y envejecimiento | 15 |
| VIII. Seguridad | 15 |
| IX. Empaquetamiento en módulos y bancos de baterías | 16 |
| 2.3. Modelación y simulación de sistemas | 16 |
| 2.4. Evaluación de desempeño del proyecto | 17 |
| 2.5. Evaluación de impacto medioambiental del proyecto | 20 |
| 2.6. Evaluación económica del proyecto | 21 |
| 2.7. Costos de las baterías de ión de litio, para la verificación y el caso de estudio | 23 |
| I. Referencias para la verificación del modelo | 23 |
| II. Referencia para el desarrollo del caso de estudio | 24 |
| Capítulo 3: Propuesta de modelo, implementación y verificación | 27 |
| 3.1. Metodología | 27 |
| 3.2. Modelación del proceso | 28 |
| I. División del proceso en etapas productivas: | 29 |
| II. Modelación de cada etapa con atributos y funcionalidades: | 30 |
| III. Modelación de la interacción entre las etapas: | 32 |
| IV. Modelación de puntos a evaluar: | 32 |
| V. Incorporación de entradas al modelo: | 35 |
| 3.3. Implementación del modelo como herramienta computacional | 38 |
| I. Implementación para la evaluación de desempeño del proceso productivo en SimEvents de Matlab: | 38 |
| II. Implementación del modelo para la evaluación económica y medioambiental en planillas de cálculo: | 38 |
| 3.4. Verificación del modelo propuesto | 45 |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| I. | Características del caso de verificación: | 45 |
| II. | Construcción y ejecución del modelo de verificación: | 47 |
| Capítulo 4: | Estudio del proceso de fabricación de baterías de litio-ión en Chile | 65 |
| 4.1. | Características constructivas del caso en que se basa el estudio: | 65 |
| I. | Características de las baterías y su planta productora | 65 |
| II. | Caracterización del transporte: | 70 |
| III. | Características económicas: | 73 |
| 4.2. | Incorporación del caso descrito para Chile al modelo..... | 82 |
| I. | Puntos generales..... | 82 |
| II. | Incorporación de la información al modelo: | 82 |
| 4.3. | Resultados y estudio de casos | 91 |
| I. | Evaluación económica: | 91 |
| II. | Evaluación de impacto medioambiental: | 94 |
| Capítulo 5: | Conclusiones y trabajo futuro..... | 97 |
| 5.1. | Conclusiones: | 97 |
| 5.2. | Trabajo futuro:..... | 99 |
| Anexos..... | | 100 |
| Anexo A : | El litio | 100 |
| Anexo B : | Acumulador reversible | 101 |
| Anexo C : | Baterías de ión – litio | 102 |
| I. | Características de las baterías de ión - litio: | 102 |
| II. | Las baterías de ión de litio y los vehículos eléctricos | 102 |
| III. | Competencia de las baterías de ión - litio: | 104 |
| Anexo D : | Proyecciones de demanda de vehículos eléctricos en los Estados Unidos: | 106 |
| Anexo E : | Evaluación de proyectos | 108 |
| I. | Matemática financiera | 108 |
| II. | Indicadores para la evaluación de proyectos | 110 |
| III. | Los flujos de caja | 111 |
| IV. | Costos | 112 |
| V. | Estimaciones | 114 |
| Anexo F : | Simulación utilizada | 116 |
| I. | Simulación de sistemas basada en eventos discretos | 116 |
| II. | Simulación en planillas de calculo | 116 |
| Bibliografía | | 118 |

Capítulo 1: Introducción

1.1. Motivación

Dada la posibilidad que presenta de reducir la dependencia del petróleo con sus volátiles precios, reducir la polución, los gases de efecto invernadero y la contaminación acústica, se espera un incremento en la demanda de vehículos eléctricos e híbridos durante la próxima década. Las baterías de ión-litio con su alta densidad de energía, así como la ausencia de “efecto memoria” y largos ciclos de vida, son prometedoras para ser utilizadas almacenando energía para la tracción de estos vehículos.

Todas las baterías de litio requieren este metal y normalmente también requieren cobre. Por otra parte, se puede apreciar, que existen diferentes fabricantes para los distintos elementos que componen las baterías y que realizan diferentes actividades presentes en su cadena de valor agregado [1]. Chile es en la actualidad el mayor productor de litio y cobre a nivel mundial. Dados estos factores, surge el interés por saber si sería rentable y ambientalmente beneficioso, el incorporarse a la cadena del valor agregado del litio en Chile, satisfaciendo parte del incremento en la demanda de baterías de litio, para vehículos eléctricos o híbridos.

Actualmente el CIL “Centro de Innovación del litio”, trata de “Desarrollar un área de investigación aplicada sobre el uso del litio en baterías avanzadas que se usarán en los nuevos vehículos eléctricos”. Para contribuir al CIL, este trabajo trata de modelar el proceso de producción de las baterías, trabajando con los productos menos elaborados, que permita la información de la que se dispone, en la cadena de valor de las baterías de litio-ión.

1.2. Objetivos

I. Objetivos generales

El Objetivo general de este trabajo es aportar a la investigación e innovación tecnológica, mediante el desarrollo de un modelo computacional que permita comprender las consecuencias económicas y medioambientales de implementar un proceso de fabricación de baterías de litio para vehículos eléctricos o híbridos en Chile.

II. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este trabajo, se resumen en los siguientes puntos:

- Comprender el proceso de fabricación de baterías de litio y su mercado asociado,
- Disponer de un modelo que represente el proceso de fabricación de baterías,

- Disponer de un modelo verificado implementado como herramienta computacional,
- Obtener resultados y análisis de la simulación de diferentes casos, que permitan concluir sobre la conveniencia de fabricar baterías de litio para vehículos eléctricos o híbridos en Chile.

1.3. Estructura y alcances del trabajo

Este trabajo consta de 5 capítulos descritos a continuación:

El primer capítulo contiene la motivación, los objetivos, la estructura y los alcances, de este trabajo de memoria. Por su parte, el segundo capítulo realiza una revisión de la información relacionada con baterías de litio-ión y su fabricación, evaluación de proyectos, modelación de sistemas y una revisión de parte de la información utilizada en la verificación del modelo y los casos de estudio. El tercer capítulo describe la metodología utilizada, el desarrollo del modelo, su implementación en planillas de cálculo y su verificación. A partir del modelo desarrollado, en el Capítulo 4, se desarrollan casos y obtienen resultados. Los resultados corresponden al proceso de fabricar baterías de determinadas características (10,2 [kWh], NCA-G) en Chile, bajo diferentes consideraciones económicas y realizando una comparación del impacto medioambiental producido por el transporte al producir éstas baterías de litio en Chile y China, con un cliente en los Estados Unidos. Finalmente en el Capítulo 5, se presentan las conclusiones y el trabajo futuro recomendado.

Los casos estudiados se clasifican de 2 maneras, primeramente en la evaluación económica se tiene 3 casos y la evaluación medioambiental tiene 2.

Para la evaluación económica, en el primer caso se evalúa la factibilidad de realizar el proceso de fabricación de baterías en Chile, con consideraciones tomadas de diversas referencias. En el segundo caso se busca reducir costos, utilizando los mínimos costos de las materias primas que se encontraron. En el tercer caso se busca encontrar, la tasa de reducción de costos de las actividades y cuanto se deben reducir los costos de transporte (en relación a los costos encontrados), para que el proyecto sea rentable, dado que el valor de las baterías se reduce en el tiempo.

La evaluación medioambiental, considera 2 casos, en ellos compara el impacto medioambiental del transporte de producir baterías en Chile (primer caso) con el de producir baterías en China (segundo caso). Debido a la disponibilidad de información, sólo se pudo comparar el impacto medioambiental del transporte de materias primas y baterías terminadas.

Capítulo 2: Revisión bibliográfica

2.1. Funcionamiento y componentes fundamentales de las baterías de ión-litio

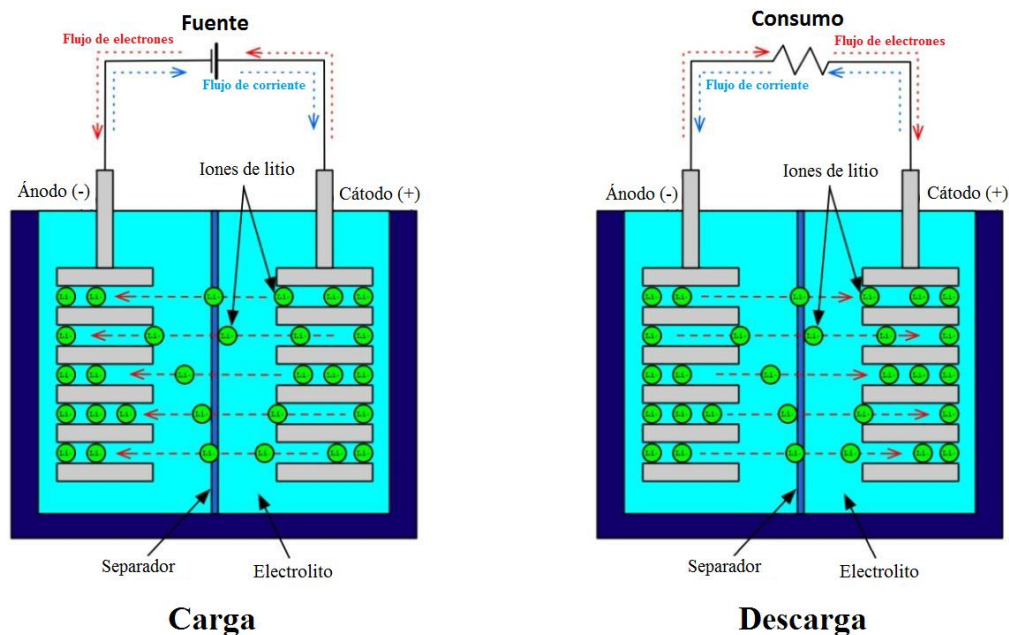
I. Principio de funcionamiento

En [2], se encuentra la información del funcionamiento de las baterías de ión-litio presentada a continuación.

Las baterías eléctricas o los acumuladores eléctricos son en esencia dispositivos que permiten almacenar y convertir energía química en eléctrica y viceversa. La unidad básica de una batería, se denomina celda, las que son agrupadas para formar módulos, los que a su vez se agrupan para formar *packs* o bancos de baterías.

Las celdas de las baterías de ión de litio, tienen 4 componentes básicos que permiten la producción de electricidad mediante reacciones electroquímicas, éstas son: cátodo, ánodo, electrolito y separador. El cátodo y el ánodo son colocados de modo de permitir la inserción y remoción de iones para permitir la carga y descarga de la batería; el electrolito permite la migración de los iones entre los electrodos; y el separador permite el paso de iones por él, pero evita un cortocircuito entre los electrodos.

Figura 1: Funcionamiento de baterías de ión – litio (modificado de [2])



En la referencia [1], se tiene la siguiente descripción; las baterías de ión-litio son un tipo de baterías recargables, en que los iones de litio se mueven entre los electrodos creando una corriente eléctrica. En el ciclo de descarga, iones de litio son liberados desde el ánodo al electrolito, en esta sustancia iones atraviesan el separador para luego adherirse a un cátodo. Dado que estas baterías son recargables, el proceso inverso ocurre durante la carga.

II. Partes fundamentales en las baterías de ión-litio

A continuación, se describen las estructuras básicas de una batería de ión-litio, correspondientes a las 4 componentes principales antes mencionadas.

i. Los cátodos

Son construidos con una pasta de material activo que recubre una lámina de aluminio, la pasta incluye un óxido de litio-metal, un aglutinante, un material de carbón y un solvente. Durante la fabricación se recubre la lámina de aluminio con la pasta, para luego ser secada y presionada hasta alcanzar el grueso apropiado [1]. En [3] caracterizan las láminas de aluminio con un grueso de $20[\mu m]$.

En [1], se observa que se tienen 4 tipos de baterías de ión de litio, utilizadas en vehículos, divididas según el material activo de sus cátodos:

1. NCA (Óxido de litio níquel cobalto aluminio, $LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$, su composición química se aprecia en [3]): tiene una energía específica de $160[Wh/kg]$, una buena densidad de potencia, pero puede tener problemas de seguridad, vida útil esperada, rango de carga y costos expuestos a variaciones,
2. LMO (Óxido de litio manganeso, $LiMn_2O_4$ su composición química se aprecia en [4]): su energía específica es de $150[Wh/kg]$, tiene buenas características de costo, seguridad y potencia, pero problema de vida útil esperada y energía utilizable,
3. NMC (Óxido de litio níquel manganeso cobalto, $LiNiMnCoO_2$ su composición química se aprecia en [4]): también su energía específica es de $150[Wh/kg]$, tiene buenas características de densidad de energía y rango de carga, pero problemas de costo y seguridad (aunque es menos insegura que las NCA),
4. LFP (Óxido de litio fierro fosfato, $LiFePO_4$ su composición química se aprecia en [2]): con una energía específica de $140[Wh/kg]$, tiene buenas características de seguridad, vida útil, rango de carga y precio de materias primas, pero tiene mal desempeño con temperaturas inadecuadas y costo de procesar los materiales.

ii. Los ánodos

Sus materiales activos recubren láminas de cobre. El material activo del ánodo típico es grafito, mezclado con un aglutinante, un solvente y carbón [1]. La lámina de cobre observada en la referencia [3] es de $12[\mu m]$.

iii. El separador

Es una membrana micro porosa, que evita el contacto entre los electrodos, construida de polietileno o polipropileno. También tiene una función de seguridad. Si se eleva la temperatura de la celda por accidente, el separador se funde, llenando los poros y evitando la conducción de corriente entre los electrodos [1]. El grueso característico del separador en la referencia [3] es de $25[\mu m]$.

En [5], se puede observar que se tienen distintos tipos de separador y que si las baterías son de electrolito sólido, este electrolito cumple su función.

iv. El electrolito

Es una mezcla de una sal de litio y un solvente orgánico. Es conveniente que el solvente tenga la mayor solubilidad de la sal de litio posible y la menor viscosidad, para aumentar la movilidad de los iones de litio en el electrolito. Los electrolitos en gel para baterías de ión-litio-polímero, se desarrollaron para evitar que existieran fugas de electrolito desde el contenedor [1].

La mayor parte de los electrolitos utilizados en celdas de baterías ión-litio comerciales, son soluciones no acuosas, de aproximadamente 1 [mol/dm³] (1000 [mol/m³]), de hexafluorurofosfato de litio (LiPF₆, una sal), disuelto en una mezcla de solventes de carbonato, como los son: carbonatos cíclicos (carbonato de etileno y carbonato de propileno) y carbonatos lineales (carbonato de dimetilo, carbonato de etil metil y carbonato de dietilo) [5].

Según el electrolito, las baterías de litio recargables se pueden dividir en tres: de tipo líquido, que utilizan electrolito líquido; de tipo gel, que utiliza electrolito de gel mezclado con líquido y polímero; y las de tipo sólido, que utilizan electrolitos poliméricos [5].

También en [5], se describe la porosidad como se muestra a continuación. Porosidad, es la porción de volumen vacío con respecto de volumen geométrico aparente. Se puede determinar cómo, la cantidad de líquido absorbida por los poros de los materiales que entregan volumen vacío. El volumen vacío, es parte del volumen ocupado por el electrolito. En [6], se explicita que es conveniente que las baterías de litio-ión, tengan un volumen de electrolito de entre 1,25 y 1,65 veces el volumen vacío aportado por los electrodos y el separador

2.2. Manufactura de baterías de ión-litio

A continuación, se describe el proceso general de fabricación de celdas de baterías de ión-litio, este es conocido aunque los detalles de diseño y equipos utilizados son propiedad de los fabricantes. La información del proceso, es extraída desde la referencia [5] y expuesta entre las Secciones 2.2.I y 2.2.VIII.

La Sección IX, trata sobre el empaquetamiento de las celdas y utiliza referencias diferentes.

I. Diseño de la celda

Cada componente de la celda está en contacto con otros componentes, con lo que cada superficie de contacto y componente, genera limitantes únicas para un buen funcionamiento de la celda. Para construir las celdas comerciales, sus diseños deben ser seguros y de buen desempeño. Una vez se termina el diseño de una celda, se construyen celdas prototipo. Con estas celdas prototipo, se determina su desempeño global mediante estadísticas y se realizan pruebas, para comprobar su seguridad.

Es una buena práctica, el desarrollar un modelo computacional basado en principios químicos e ingenieriles, capaces de imitar el comportamiento de la celda real. Características importantes de las celdas para el modelo son: la distribución de la corriente en el interior de las

estructuras de los electrodos, el intercambio de corriente en los materiales activos, el grueso y la porosidad de los electrodos, el balance de la capacidad de ambos electrodos y la conductividad del electrolito. El objetivo es tener una distribución uniforme de la densidad de corriente, en la estructura geométrica de los electrodos y su recubrimiento. Una vez el programa está terminado, este debe ser probado y ajustado, utilizando parámetros reales.

Además de las consideraciones de materiales y reacciones que se producen en la celda, la mayor parte de las celdas de baterías de ión-litio incorporan dispositivos de seguridad como lo son:

- Un separador, que se somete a un cambio de fase, cerrando sus poros y aumentando la resistencia interna de la celda, para detener el flujo de corriente y el funcionamiento de la celda, (opera por temperaturas excesivas [1]),
- Un resistor de coeficiente de temperatura positivo (PTC), el cual funciona mediante el cambio de fase de un polímero en su interior, aumentando la resistencia en los terminales de la celda, para reducir el flujo de corriente. Opera, si el flujo de corriente excede su punto de diseño o la temperatura interna de la celda excede un punto de referencia. Se chequea, la corriente y temperatura de cada dispositivo, antes de utilizarlo,
- Un dispositivo interruptor de corriente (CID), desconecta los electrodos de los terminales de la celda, para detener el flujo de corriente, cuando la presión interna de la celda alcanza un valor predeterminado, normalmente esto es el resultado de una alta temperatura interna de la celda.

II. Fabricación de las celdas

El proceso de manufactura de una celda cilíndrica o prismática de una batería de ión de litio, es el siguiente: recubrir las láminas respectivas a los electrodos con sus respectivos materiales activos, enrollar los electrodos con el separador entre ellos, insertar los electrodos bobinados en un contenedor, llenar el contenedor con electrolito y sellar el contenedor. Luego, las celdas son sometidas a un proceso de formación, envejecimiento y selección.

Las celdas de construcciones cilíndricas y prismáticas, utilizan un núcleo bobinado, en que el contenedor mantiene la presión sobre los electrodos y el separador. Mientras que las celdas de de baterías de ión-litio-polímero, utilizan la naturaleza adhesiva de un electrolito de polímero para unir los electrodos, esto implica que no se necesita una estructura externa para mantener los electrodos presionados entre ellos, por lo que su contenedor puede ser un envoltorio, de aluminio y polímero laminado. Las 3 construcciones descritas utilizan la misma química.

III. Preparación de los electrodos

En el proceso de manufactura de los electrodos, se recubre las láminas metálicas de los electrodos con sus materiales activos respectivos, para luego, someterse a presión y temperatura mediante rodillos.

i. Para el cátodo

El electrodo positivo consiste en un material activo, como lo es el óxido LiCoO_2 ; un agente conductor de carbón, como lo es negro de acetileno, ketjen negro o grafito; y un aglutinante, como lo es difluoruro de polivinilideno (PVdF), ligamento etileno-propileno-dieno-metileno (EPDM) u otro.

El material activo y el conductor de carbón, en estado seco y sólido, son mezclados en un mezclador multipropósito (mezclador convencional con impulsor de paletas). La mezcla seca, es vertida en un molino de bolas, junto con la solución previamente preparada de PVdF disuelto en N-metil-pirrolidona (NMP), el conjunto se agita a fondo. Para el caso de EPDM, se utiliza agua como solvente, los solventes dependen del aglutinante utilizado.

El molino de bolas, contiene bolas cerámicas, de un diámetro entre 2 y 3 [mm] para ayudar a la mezcla. El cómo resulte la mezcla en este molino, puede afectar considerablemente el desempeño de la batería.

ii. Para el ánodo

El procedimiento es básicamente el mismo que para el cátodo, pero con diferentes materiales. Su material activo, es carbón o grafito; el aglutinante utilizado, es PVdF, carboximetilcelulosa (CMC), butadieno estireno caucho (látex SBR) o otros.

Para obtener mejores resultados, la mezcla húmeda del material activo del ánodo, se realiza en un mezclador planetario (este mezclador tiene 2 a 3 paletas impulsoras, en diferentes ejes, con el fin de mezclar uniformemente el material activo en el centro y en las paredes del mezclador).

iii. Puntos en común para los electrodos

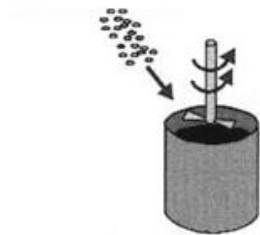
Si bien la mezcla de los materiales activos, puede producirse con una fracción predeterminada obtenida en laboratorio, se obtienen mejores resultados amasando los materiales en una pasta tiesa, para luego añadir solvente hasta obtener una viscosidad adecuada, para utilizarla en el proceso de revestimiento. Una vez las pastas tienen una viscosidad de entre 10.000 y 20.000 [cps], se aplican de forma uniforme sobre las láminas de aluminio y cobre, para cátodo y ánodo respectivamente. Técnicas adecuadas de mezclado, producen una distribución uniforme de los elementos de la masa activa durante el recubrimiento.

Para realizar el recubrimiento, se puede utilizar equipos de; “*slot die*”, “*reverse roll coating*” o “*doctor blade coating*”. Es necesario un control riguroso del espesor de los electrodos recubiertos, para asegurarse que todos los elementos de la celda cabrán en su contenedor. Usualmente ambos lados de las láminas son recubiertos, para tener electrodos de dos caras. Se debe registrar cada operación de recubrimiento, como medida de control de calidad. El espesor de cada recubrimiento puede variar entre 50 y 300 [μm], según el diseño de la celda. El recubrimiento puede ser interrumpido, con intervalos de la longitud de los electrodos, preparándose para el bobinado como núcleo de la celda. Luego los electrodos secos, son compresos con una prensa de rodillos (“*calendering*”), para tener un preciso control del espesor de los electrodos y aumentar la densidad de éstos. La velocidad de la máquina de rodillos, así como su carga, dependen del fabricante, si este proceso no es realizado adecuadamente, el rendimiento del proceso de bobinado de los electrodos se verá reducido. Después de este proceso, se corta las láminas del ancho de los electrodos y se prepara en un rollo para su bobinado.

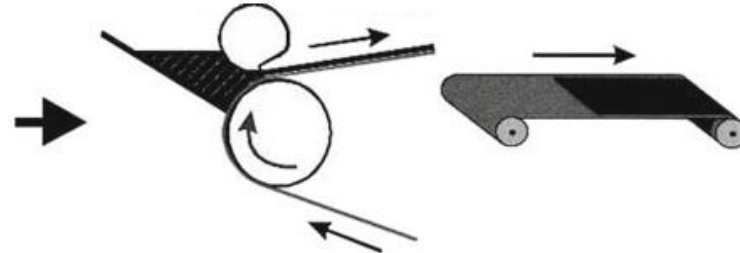
En la Figura 2, se muestra el proceso general de fabricación de los electrodos, comenzando con el recubrimiento de las láminas metálicas y terminando con el bobinado del núcleo de una celda.

Figura 2: Preparación de electrodos (modificado de [5])

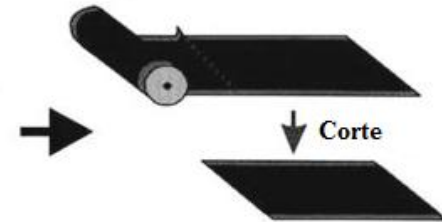
(1) Mezcla de materiales activos



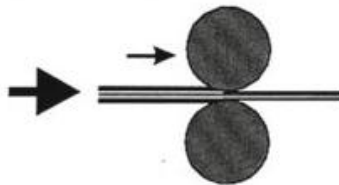
(2) Recubrimiento de las láminas, enrollado y secado



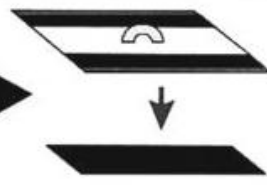
(3) Corte de electrodos de tamaño predeterminado



(4) Prensado de electrodos de un grueso predeterminado



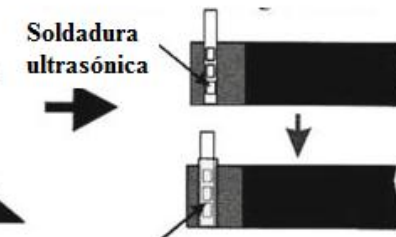
(5) Corte de electrodos de un ancho definido



(6) Preparación de la partes descubiertas de las laminas metalicas en los electrodos

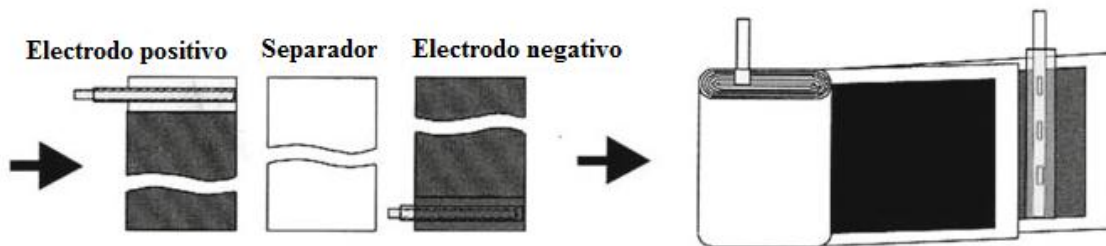


(7) Montaje de los terminales, mediante soldadura ultrasónica o de resistencia

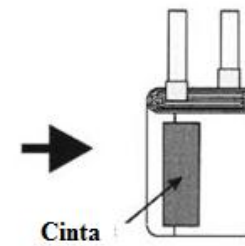


Se fija una cinta

(8) Enrollado de los electrodos, con el separador entre ellos



(9) Termino del núcleo



IV. Fabricación de celdas cilíndricas

En la fabricación de las celdas cilíndricas, el siguiente paso es la construcción de su núcleo. Los rollos de los electrodos y el separador se montan en una máquina bobinadora, se ajustan la longitud, el ancho y el espesor de estos elementos para que coincidan con el diseño de la celda. Luego la máquina comienza su operación, funciona automáticamente hasta agotar los rollos, este proceso se repite a lo largo del día de trabajo. Antes del bobinado, se fija una lengüeta de aluminio, en la parte descubierta del electrodo positivo (lámina de aluminio), mediante soldadura ultrasónica. Del mismo modo, se fija una lengüeta de níquel, a la lámina de cobre del ánodo. Si las láminas no fueron recubiertas con patrones intermitentes, deben limpiarse antes de realizar la soldadura.

Los 2 electrodos, con el separador entre ellos, son enrollados apretadamente entorno a un mandril, por la máquina bobinadora, el resultado es el núcleo de la celda. El mandril de las celdas cilíndricas es redondo, mientras que las celdas prismáticas utilizan una paleta plana. El enrollado del núcleo requiere una tensión constante hasta que alcanza su tamaño final. Las irregularidades en la bobina pueden generar brechas entre el separador y los electrodos, lo que a su vez produce una distribución de la corriente no uniforme, esto puede generar mal funcionamiento de la celda o reducir su vida útil. Para monitorear los procesos críticos y la colocación de las componentes de la celda, se utilizan sistemas de rayos X. Antes de colocar el núcleo en el contenedor de la celda, se debe comprobar que no existan cortocircuitos, mediante un medidor de alta impedancia o de alto voltaje y se debe asegurar la posición de la bobina, mediante una cinta. Es importante que no se produzca desprendimiento de materiales activos durante el proceso de enrollado. Una detección temprana de las celdas defectuosas, puede ahorrar trabajo y dinero en las actividades siguientes.

Luego de la inserción del núcleo en su contenedor, es posible insertar un mandril tubular dentado en el núcleo, para mejorar la integridad y seguridad de la batería, cuando se eleva la presión interna, este mandril permite el paso de gas a través de su centro hueco hasta un respiradero y si la celda es aplastada, este mandril cortocircuita los electrodos lo que descarga la batería. A través del mandril, se inserta un electrodo de soldadura, con el que se suelda la lengüeta del ánodo al contenedor de la celda. En el caso de las celdas cilíndricas, se coloca un material aislante entre el fondo del contenedor y la bobina, la lengüeta del electrodo negativo es soldada al fondo del contenedor.

La humedad tiene un efecto perjudicial en el funcionamiento de la celda, por esto normalmente todas las operaciones sobre la celda son realizadas en un ambiente seco, o alternativamente, se puede poner la celda en un horno de vacío entre 16 y 24 horas para extraer agua residual en el núcleo de la celda antes de continuar. El siguiente paso es llenar la celda con electrolito, utilizando un aparato de inyección al vacío. El vacío en la celda debe llenarse de electrolito, al punto de asegurarse que se impregnan y llenan por completo las porosidades de los electrodos y del separador. La bomba utilizada para llenar de electrolito debe ser de precisión y estar acompañada de un medidor de precisión, para entregar la cantidad precisa de electrolito necesaria. Usualmente la sal de litio en el electrolito es LiPF_6 , disuelta en una mezcla de solventes carbonatos orgánicos, cuya composición exacta cambia según el fabricante.

Después de llenar la celda, se tapa y se sella mediante un sello de compresión de polímero. La tapa de la celda contiene una rendija de ventilación (respiradero), además de los dispositivos de seguridad PTC y CID. Después tanto la celda cilíndrica como la prismática, son lavadas con alcohol isopropílico o acetona con una pequeña cantidad de agua, para limpiar la

celda de electrolito adherido. Luego se confirma un buen sellado, comprobando que no existan fugas de electrolito, con un sensor de olor.

Se inspecciona la construcción interna de la celda mediante rayos X, una instalación adecuada de la tapa, desalineación de la bobina, doblado incorrecto de las lengüetas, etc., para evitar un mal funcionamiento de la celda. Es común imprimir en la celda un número e información adicional, para tener referencias, si son necesarias en el futuro. El poder identificar la celda, permite conocer la fuente y el día de fabricación, más la línea de montaje y detalles de los materiales utilizados en su construcción. También, se puede incluir en la etiqueta, el detalle de los controles de calidad, información de los materiales, del procesamiento y de las condiciones de fabricación.

Finalmente, las celdas se someten a un proceso de envejecimiento en el que se selecciona aquellas que tengan cortocircuitos y clasificarlas según su capacidad, para el montaje de los bancos de baterías. Cambian la temperatura de las celdas, la duración del periodo cargada y el método de chequeo. Este proceso pretende encontrar celdas con defectos internos o cortocircuitos, que no han sido encontradas en etapas anteriores.

En la Figura 3, se muestra el esquema general de la fabricación de celdas cilíndricas.

El contenedor de las celdas cilíndricas, típicamente es de acero o aluminio [2].

V. Fabricación de celdas prismáticas

Sigue un proceso similar que las celdas cilíndricas, hasta la aplicación de la tapa, entonces se diferencian los procesos, debido a la geometría de las celdas prismáticas respecto de las cilíndricas. Las celdas prismáticas utilizan un contenedor de aluminio para reducir su masa y de aluminio laminado para reducir el espesor de la celda (4 [mm] o menos). En el caso de la celda prismática con contenedor de aluminio, el electrodo positivo es soldado al contenedor. Luego, se sueldan la tapa y conexiones, normalmente mediante soldadura láser. Si el proceso recién explicado no se lleva a cabo en un ambiente seco, las celdas son secadas en vacío durante 24 horas, con el fin de extraer el agua de las celdas. Para terminar se posiciona la tapa y se sueldan sus contornos a la celda y el tubo con el que se llena la celda de electrolito, mediante soldadura láser.

En la Figura 4 se muestra el esquema general de fabricación de celdas prismáticas.

Figura 3: Ensamblaje de celdas cilíndricas (modificado de [5])

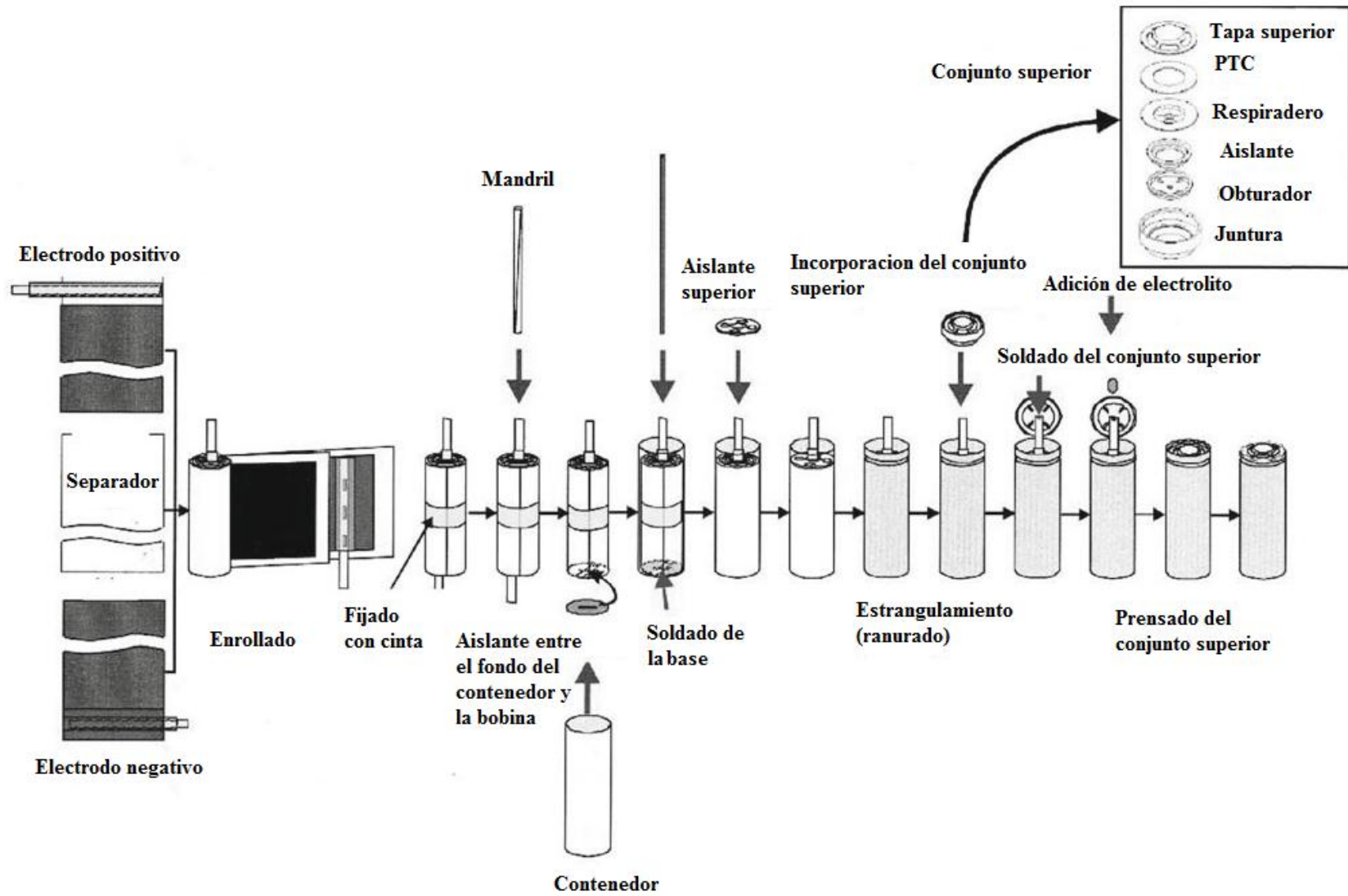
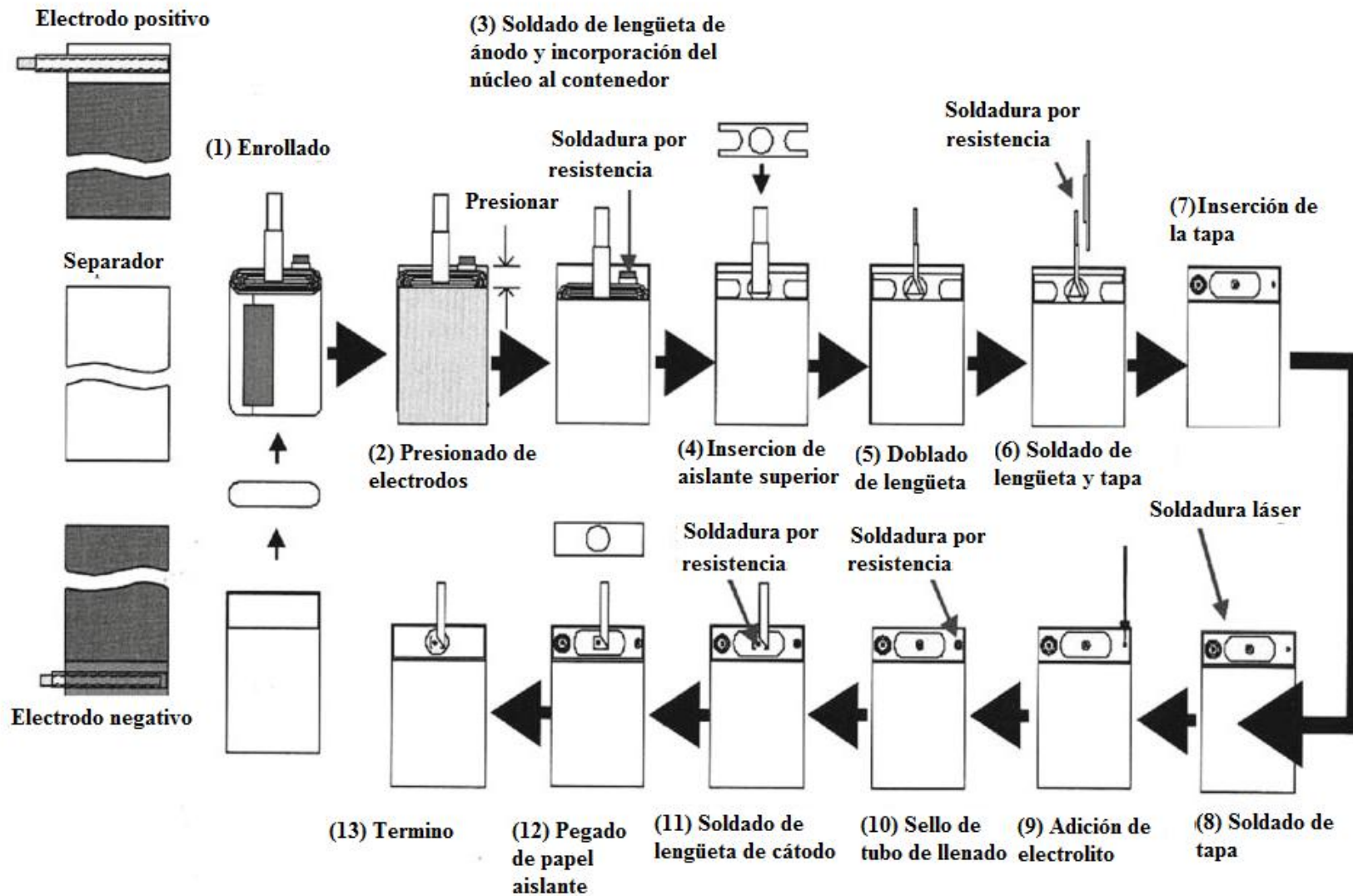


Figura 4: Ensamblaje de celdas prismáticas (modificado de [5])



VI. Fabricación de celdas para baterías de litio-ión-polímero

Este tipo de celdas, se fabrica en tamaños pequeños, para teléfonos celulares (de hasta 0,5 [Ah]) y en tamaños grandes, para aplicaciones de almacenamiento de energía y potencia motriz (hasta 200 [Ah]). Una característica común de las celdas de ión-litio-polímero, es que el polímero es un adhesivo que mantiene el electrolito y actúa como barrera física entre los electrodos, evitando su cortocircuito. La mayoría de las celdas de polímero, son de construcción de placas planas (prismáticas) y cada fabricante mantiene un proceso de fabricación un poco diferente, pero los diseños son básicamente de construcciones laminares, producidas por varios procesos de diferentes. En general, el proceso de fabricación de este tipo de celdas, es el mismo que en las celdas prismáticas. El material activo puede ser revestido sobre láminas o tiras de metal expandido, según su diseño. Los rollos de ánodo, cátodo y el electrolito de polímero se cortan de formas y dimensiones específicas, para luego ser apilados con capas de polímero. Una alternativa es la construcción de plegado en Z, esta técnica puede ser utilizada con electrodos unidos al separador. Los apilados, son unidos mediante el uso de ultrasonido o calor, para asegurarse que son unidos de forma uniforme y control de las dimensiones.

Los métodos para recubrir los electrodos son los mismos descritos anteriormente. Sin embargo, para construir el núcleo o apilado de electrodos de la celda, se usan los siguientes métodos con un contenedor de film laminado:

Los electrodos con el separador entre ellos, son bobinados, para luego ser sometidos a calor y presionados en forma plana,

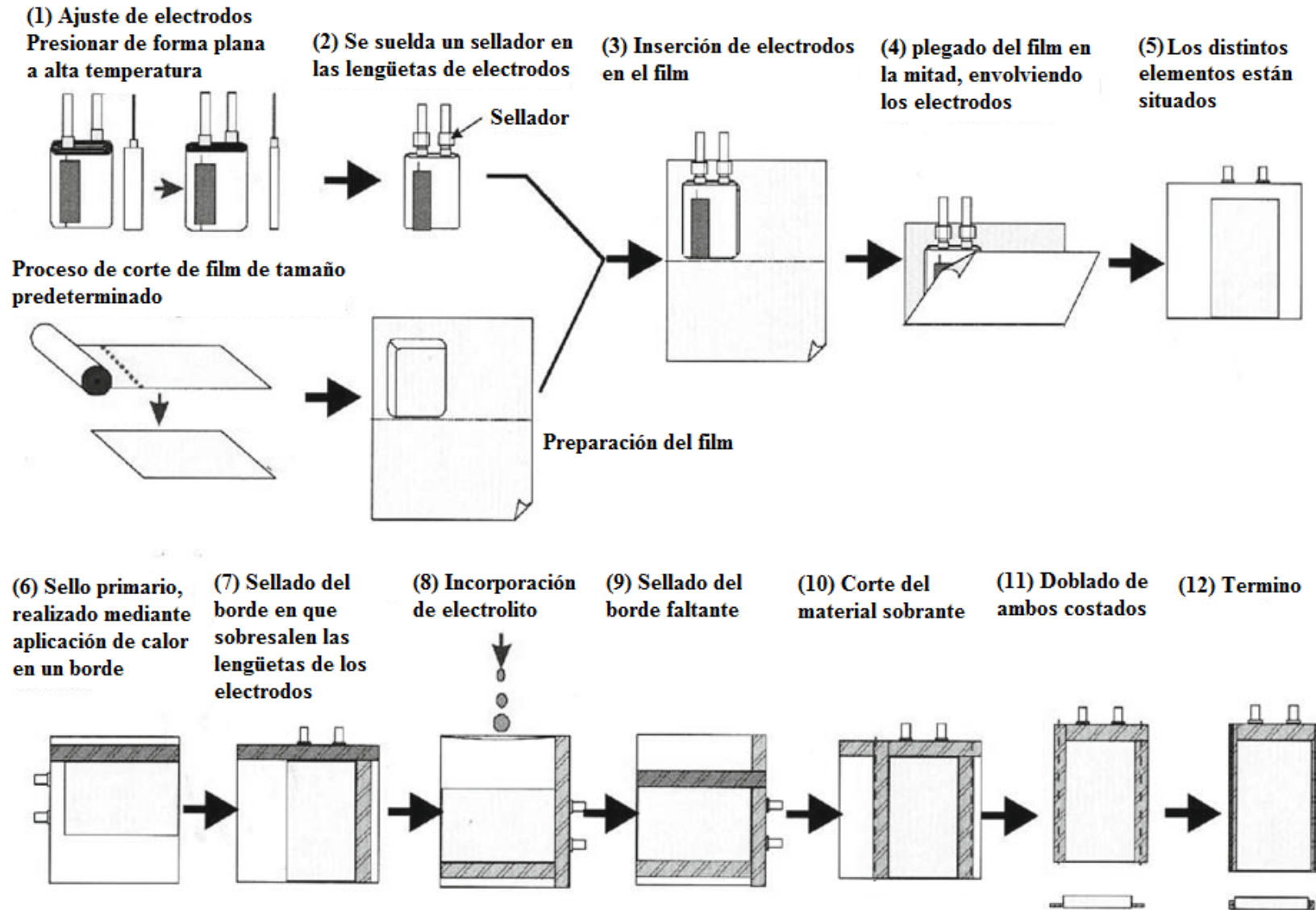
Los electrodos y el separador son entretejidos, utilizando la técnica del plegado en Z o tejido en W (método de Thuzuri-Ori),

Apilando el cátodo, el separador y el ánodo, en capas repetidamente.

El contenedor de la celda, está fabricado de un film estratificado de aluminio y polímero. El film, es doblado por la mitad y cortado en piezas. Luego es adherido mediante fusión, la pila de electrodos es insertada y luego mediante calor o ultrasonido, se une el contenedor exterior. Luego el ensamblaje es chequeado en busca de cortocircuitos, la humedad se elimina mediante calor al vacío, se inyecta electrolito de polímero y la celda es sellada al vacío, en una configuración de dos cámaras. Después de la formación, el gas que se produzca es removido mediante una cámara auxiliar de vacío, la celda resellada y se desecha la cámara de gas. Finalmente, la celda se somete a dimensionamiento, flexión de los costados de la lámina, probado con sensor de olor, limpieza y secado, revisión de des-alineamiento del bobinado usando aparato de rayos X, enumeración, carga, descarga y una inspección final.

En la Figura 5, se muestra el esquema general de fabricación de celdas para baterías de litio-ión-polímero.

Figura 5: Ensamblaje de celdas de ión-litio-polímero (modificado de [5])



VII. Formación y envejecimiento

Este proceso se realiza una vez el montaje de la celda esta completo, es el paso final en la producción de la celda y se aplica en todos los procesos de producción de celdas descritos. Las celdas de baterías de ión de litio, son fabricadas en completa descarga, por lo que para activarlas es necesario realizar una primera carga, denominada “Formación”. La formación, activa los materiales activos en los electrodos y establece su capacidad de funcionamiento, normalmente utiliza una corriente baja para formar una capa solida de electrolito de protección (SEI, “*solid electrolite interfase*”) en el ánodo, después se incrementa la corriente hasta su magnitud normal en alrededor del 30% del periodo de carga. Se mide el voltaje después de la formación y se almacena la celda durante un periodo de tiempo definido, este proceso se denomina “envejecimiento”. El tiempo de envejecimiento, así como su temperatura varían según el fabricante. El voltaje y la capacidad de las celdas son registrados, para el proceso de selección y clasificación. Éstos son utilizados más adelante, para ordenar las celdas según cortocircuitos internos u otros defectos de fabricación. Diferencias entre el voltaje de partida y termino del envejecimiento, se pueden utilizar para identificar problemas de bajo voltaje y capacidad de las celdas. Se descartan aquellas celdas de bajo voltaje debido a micro cortocircuitos internos. El proceso exacto de formación así como de selección de las celdas, depende del fabricante y el número de ciclos de carga-descarga antes de realizar el chequeo de capacidad puede cambiar.

VIII. Seguridad

La seguridad es un tema fundamental en las baterías de ión-litio y ión-litio-polímero, tanto las Naciones Unidas, como el Departamento de Transporte de los Estados Unidos de Norte América, las clasifica como un material peligroso de transportar. Otras organizaciones que siguen estas regulaciones, son la Organización marítima internacional y la asociación internacional de transporte aéreo.

Se han desarrollado protocolos de pruebas estandarizadas, para verificar la seguridad de diseños particulares de celdas. Pruebas típicas realizadas, son de cortocircuito interno, sobrecarga, sobredescarga, golpes, vibraciones, variaciones de temperatura, etc. Deben realizarse pruebas de seguridad durante las etapas de diseño de las celdas, al renovar equipos y regularmente en las celdas en producción.

En condiciones de abuso, las celdas cumplen funciones de autodestrucción integradas. Por ejemplo si una batería de 2,4 Ah libera toda su capacidad mediante un cortocircuito interno, puede calentarse hasta los 700°C en minutos. Esto produce que tanto los diseñadores como los fabricantes, estén altamente presionados a producir baterías libres de defectos. El centro de los asuntos de seguridad, en las baterías de ión de litio es evitar el embalamiento térmico. Esto ocurre debido a que al incrementarse la temperatura, la superficie del ánodo (SEI) se vuelve inestable entre los 125 y 130 °C, si la temperatura continua incrementándose, la reacción del electrolito con el cátodo es energética y autocatalítica. Los cátodos, con materiales activos compuestos de Níquel y Cobalto, son buenos catalizadores de esta reacción, la cual comienza entre los 180 y 250°C, con materiales activos compuestos de manganeso comienzan sobre los 300° C, para el caso de fosfato la reacción es menos energética y comienza alrededor de los 500°C.

Por otro lado, las celdas requieren un control electrónico, para evitar que se sobrepasen los límites de baja o alta tensión. Sobrepasar estos límites, puede traer problemas de seguridad y dañar la celda. La electrónica determina el estado de carga y el momento de detener la operación de la celda.

IX. Empaquetamiento en módulos y bancos de baterías

Al hablar del empaquetamiento, es necesario tener presente que las celdas de baterías de litio-ión, típicamente tienen contenedores de acero o aluminio y las de litio-ión-polímero, tienen contenedores de film laminado, de polímero metalizado o polímero aluminio. El uso de plástico es problemático, pues puede ser disuelto en electrolitos orgánicos [7].

Para aplicaciones automotrices, las celdas individuales son conectadas en grupos, con varias configuraciones, empaquetadas con un circuito de control y seguridad, formando un módulo. Luego un conjunto de módulos, que comparten circuitería de control, un sistema de manejo térmico y electrónica de potencia, forman los *packs* o bancos de baterías [2].

En [7], se informa que son posibles múltiples diseños para ensamblar celdas en un banco de baterías, para utilizarlo en vehículos eléctricos o híbridos, como se describió antes, cada módulo requiere circuitos de control y seguridad, para evitar daños de sobrecarga o sobredescarga. Los módulos son combinados en un banco de baterías, el cual debe ser apropiado para los requerimientos del vehículo, los mismos módulos pueden ser utilizados en una variedad de diferentes bancos de baterías. También es deseable que los módulos sean empaquetados en un material rígido, que no se corroa, sea barato y ligero. Por consiguiente, los módulos son generalmente hechos de plásticos. Para el banco de baterías, con consideraciones similares, los fabricantes de vehículos eligen sus materiales, de acuerdo a las condiciones del vehículo.

2.3. Modelación y simulación de sistemas

Los procesos de manufactura y de manejo de materiales, son una de las aplicaciones más importantes de la simulación. Valorable para la evaluación de la inversión en equipamiento y en instalaciones, al igual que en la evaluación de cambios en el manejo de materiales y su distribución, o en control de un proceso de producción [8].

La información expuesta a continuación, se ha sido extraída de [9].

Un sistema, es un grupo o colección de elementos, que interactúan, se relacionan o dependen entre sí, buscando un objetivo. El estado de un sistema, se puede definir como: el conjunto de las variables de interés con que se caracteriza.

Modelar, es el proceso de construir un modelo. Un modelo, es una representación de un sistema, que abarca sus aspectos de interés. Un modelo, es similar pero más sencillo que el sistema real, su propósito es permitir entender, analizar y predecir los efectos de cambios en el sistema. El modelo, debe ser lo suficientemente simple, para permitir su comprensión, al mismo tiempo que es una aproximación cercana al sistema, la cual incorpora sus características importantes.

Un modelo matemático, incluye variables de entrada y salida, si todas éstas son conocidas el modelo es determinístico; si al menos una de ellas es probabilística, el modelo es estocástico. También se puede clasificar un modelo según dependencia del tiempo; el modelo es estático, si se considera que sus las interacciones entre las variables no cambian en el tiempo; el modelo es dinámico, si se considera que sus interacciones entre variables cambian en el tiempo.

Simular, es operar el modelo de un sistema. A diferencia del sistema real, el modelo permite el ser reconfigurado y experimentar con él, lo que podría resultar poco práctico o muy caro en un sistema real. De este modo, la operación del modelo permite conocer la interpretación de las propiedades, el desempeño o los resultados del sistema real.

La simulación, puede ser realizada para un sistema nuevo o uno existente, para satisfacer las expectativas y especificaciones, así como para mejorar el desempeño general del sistema.

En [8] se expresa que, un sistema se puede caracterizar como continuo o discreto. Aunque en la práctica pocos son completamente continuos o discretos, la mayoría tiene un comportamiento predominante, lo que normalmente permite su clasificación. Un sistema discreto, es uno en el que sus variable(s) de estado, cambian sólo en un conjunto discreto de instantes en el tiempo. Mientras que un sistema continuo, es aquel en que sus variables(s) de estado cambian de forma continúa en el tiempo.

Información adicional, sobre simulación de eventos discretos y en planillas de cálculo se encuentra en el Anexo F.

2.4. Evaluación de desempeño del proyecto

Para evaluar el desempeño de las distintas etapas del proceso productivo de baterías, se propuso construir una representación de él mediante un programa de simulación de evento discreto, que permitiera modelar el proceso productivo y de manejo de materiales; mediante una serie de entidades con diferentes atributos, que interactúan con actividades, generando diferentes eventos según el proceso.

Al modelar el proceso productivo mediante simulación de evento discreto, se tiene el objetivo de ganar comprensión, de cómo se podría mejorar el desempeño del proceso productivo que se está modelando. Usualmente, una visualización generada por el modelo puede ser de gran ayuda en este sentido, aunque por supuesto se esperan resultados numéricos que midan el desempeño de la simulación, los cuales deben estar acompañados de un correcto diseño experimental, un análisis riguroso y un adecuado análisis estadístico para modelos estocásticos. Típicas medidas con que se evalúa el desempeño de un proceso productivo y de manejo de materiales, se encuentran en [8]:

- Rendimiento del proceso bajo cargas determinadas,
- El tiempo que se tarda en generar un producto,
- La utilización de recursos,
- Cuellos de botella,
- Colas y retardos, debidos a equipos, sistemas, recepciones y despachos,
- Requerimiento de dotación de personal,
- Efectividad de sistemas de control, horarios y manejo de materiales,
- Efectos de cambiar las características de los pedidos,

- Tiempo de recuperación frente a imprevistos.

Ejemplos de casos de estudios de procesos de manufactura y manejo de materiales mostrados en [8] se mencionan en la Tabla 1, sus “*abstract*” orientan sobre el tipo de problemas para el que se usa esta forma de simulación.

Tabla 1: Ejemplos de modelos de procesos de manufactura y manejo de materiales (encontrados en [8], sus “*abstract*” han sido copiados desde la librería digital de la IEEE (“*IEEE Xplore*”))

| Artículo: | Autores y año: | <i>Abstract</i> |
|---|--|---|
| “ <i>Modeling and Simulation of Material Handling for Semiconductor Wafer Fabrication</i> ” | Neal G. Pierce, Richard Stafford [1994] | <i>This paper presents the results of a design study to analyze interbay material-handling systems for semiconductor wafer manufacturing. We developed discrete-event simulation models to model the performance of conventional cleanroom material handling including manual and automated systems. The components of a conventional cleanroom material-handling system include an overhead monorail system for interbay (bay-to-bay) transport, work-in-process stockers for lot storage, and manual systems for intrabay movement. This study examines the models and simulation experiments that assist with analyzing cleanroom material-handling issues such as designing conventional automated material-handling systems and specifying requirements for transport vehicles.</i> |
| “ <i>Modeling Aircraft Assembly Operations</i> ” | Harold A. Scott [1994] | <i>A simulation model can be a powerful tool for understanding the complex interactions of aircraft assembly operations. An accurate model helps identify the effects of resource constraints on dynamic process capacity and cycle time. To analyze these effects, the model must capture job and crew interactions at the control code level. This paper explores five aspects of developing simulation models to analyze crew operations on aircraft assembly lines: representing job precedence relationships, simulating crew members with different skill and job proficiency levels, reallocating crew members to assist ongoing jobs depicting shifts and overtime, modeling spatial constraints and crew movements in the production area.</i> |
| “ <i>Discrete Event Simulation for Shop Floor Control</i> ” | J. S. Smith, R. A. Wysk, D. T. Sturrock, S. E. Ramaswamy, G.D. Smith, S. B. Joshi [1994] | <i>The paper describes an application of discrete event simulation for shop floor control for a flexible manufacturing system. In this application, the simulation is used not only as an analysis and evaluation tool, but also as a "task generator" for the specification of shop floor control tasks. Using this approach, the effort applied to the development of the simulation is not duplicated in the development of the control system. Instead, the same control logic is used for the control system as was used for the simulation. Additionally, since the simulation implements the control, it provides very high fidelity performance predictions. Implementation experience in two flexible manufacturing laboratories is described. These implementations use a special feature of the Arena/SIMAN simulation language which allows Arena/SIMAN to interact directly with the shop floor control system through an interprocess communication mechanism. This feature is described in detail.</i> |
| “ <i>Developing and Analyzing Flexible Cell System Using Simulation</i> ” | Edward F. Watson, Randall P. Sadowski [1994] | <i>The purpose of this study was to develop and evaluate flexible cell alternatives to support an agile production environment at a mid-sized manufacturer of industrial equipment. Three work cell alternatives were developed based on traditional flow analysis studies, past experience, and common sense. To support the analysis of each option, a simulation</i> |

| | | |
|---|---|--|
| | | <i>model was developed and validated for the current manufacturing environment. The simulation model allowed the analyst to evaluate each cell alternative under current conditions as well as anticipated future conditions that included changes to product demand, product mix, and process technology. This paper will emphasize the modeling aspects of this study and briefly discuss the results and future directives.</i> |
| <i>“Inventory Cost Model for “Just in time” Production”</i> | <i>Mahesh Mathur [1994]</i> | <i>This paper presents the design and operation of a computer simulation model developed on a SLAM SYSTEM to compare the build up of set up costs and inventory carrying costs with varying lot sizes. While reduction of lot sizes is a necessary step towards implementation of “Just-In-Time” (JIT) in a job shop environment, a careful cost study is required to determine the optimum lot size under the present set up conditions. A simulation model can be designed to graphically display the fluctuation of carrying costs and accumulation of set up costs on a time scale in a dynamic manner. The decision for an optimum lot size can then be based on realistic cost figures.</i> |
| <i>“Modeling Strain of Manual Work in Manufacturing Systems”</i> | <i>I. Ehrhardt, H. Herper, H. Gebhardt [1994]</i> | <i>Without the use of simulation methods and technology complex logistical issues can only be dealt with insufficiently. While current research concentrates on technological aspects in the improvement of system behaviour, vital tasks in the field of production and logistics despite of increasing automation are undoubtedly assigned to human resources. Present simulation instruments are not or just rarely considering manual activities within the simulation process. The project EMSIG, supported by the BMFT (German Ministry for Research and Technology), builds up a model for the description of manual loads that can be effectively used in planning logistic systems. The author considers how simulation models with detailed worker description support the user in evaluating a manufacturing system in terms of ergonomic and economic aspects in the planning process.</i> |
| <i>“Simulation Modeling for Quality and Productivity in Steel Cord Manufacturing”</i> | <i>C. H. Turkseven, G. Ertek [2003]</i> | <i>We describe the application of simulation modeling to estimate and improve quality and productivity performance of a steel cord manufacturing system. We describe the typical steel cord manufacturing plant, emphasize its distinguishing characteristics, identify various production settings and discuss applicability of simulation as a management decision support tool. Besides presenting the general structure of the developed simulation model, we focus on wire fractures, which can be an important source of system disruption.</i> |
| <i>“Shared Resource Capacity Analysis in Biotech Manufacturing”</i> | <i>P. V. Saraph [2003]</i> | <i>Simulation is a relatively new tool for business process analysis in the Biotech industry. We discussed an application of discrete event simulation in analyzing the capacity needs of a shared resource in the manufacturing facility at Bayer Corporation's Berkeley site. The SIGMA® simulation model was used to analyze the workload patterns, run different workload scenarios, taking into consideration uncertainty and variability, and provide recommendation on a capacity increase plan. This analysis also demonstrated benefits of certain operational scheduling policies. The analysis outcome was used to determine capital investments for 2002. This illustrates the power of simulation tools in providing quick and robust analysis with solutions to planning problems.</i> |
| <i>“Behavior of an Order Release Mechanism in a Make-to-</i> | <i>A. Nandi, P. Rogers [2003]</i> | <i>The value of holding orders in a preshop pool, prior to their release to the factory floor, is a somewhat controversial topic. This is especially true for make-to-order manufacturing systems, where, if capacity is fixed and exogenous due dates are inflexible, having orders wait in a preshop pool may cause the overall due date performance of the system to</i> |

| | | |
|---|--|--|
| Order Manufacturing System with Selected Order Mechanism” | | <i>deteriorate. In such circumstances, selective rejection of orders offers an alternative approach to dealing with surges in demand whilst maintaining acceptable due date performance. This reports on the behavior of such a make-to-order manufacturing system under a control policy involving both an order release component and an order acceptance/rejection component.</i> |
|---|--|--|

2.5. Evaluación de impacto medioambiental del proyecto

Es muy probable que el aumento en las temperaturas desde mediados del siglo XX, se deba a la emisión de gases de efecto invernadero. Las mayores emisiones de gases de efecto invernadero, son debidas a actividades humanas [10].

Para medir el impacto medioambiental de la producción de baterías en Chile, de una forma que sea posible compararlo con el impacto medioambiental de la producción en países asiáticos, se utiliza las emisiones de dióxido de carbono. En Japón (57%), Corea (17%) y China (13%), se producen la mayor cantidad de baterías de ión de litio (2007). Por otro lado Estados Unidos (mediante su departamento de energía), está realizando inversiones considerables, para incorporarse al mercado de las baterías de litio [1].

Para transportar una carga de una tonelada métrica durante un kilómetro, se tiene las siguientes emisiones, como referencias en [11]:

- Para un barco moderno de entre 10 y 40 [g] de dióxido de carbono,
- Para trenes de 30 a 100 [g] y para camiones modernos de 60 a 150 [g],
- Para transporte aéreo en dirigible de 55 [g] y en aeroplano de 500 [g].

En la referencia [12], se puede observar el indicador de emisiones de CO_2 , por oferta total de energía primaria (TPES, “*total primary energy supply*”), para los países de Chile, Japón, China, Corea y los Estados Unidos de América, en el año 2009. Según esta referencia el TPES por país se calcula como se muestra en la Ec. 1.

Ec. 1: TPES

$$\begin{aligned}
 TPES = & \textit{Producción} + \textit{importaciones} - \textit{exportaciones} \\
 & - \textit{tráfico marítimo internacional} - \textit{tráfico aéreo internacional} \\
 & \pm \textit{variación de la oferta}
 \end{aligned}$$

La tabla siguiente muestra las emisiones de dióxido de carbono, de acuerdo a la producción energética de Chile, Japón, China, Corea y los Estados Unidos de América; según [12].

Tabla 2: Huella de CO₂, por oferta total de energía primaria 2009

| País | CO ₂ /TEPS | | |
|-------|-----------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| | | [t CO ₂ / toe] | [t CO ₂ / MWh] |
| Chile | 2,26 | [t CO ₂ / toe] | 0,194325021 [t CO ₂ / MWh] |
| Japón | 2,32 | [t CO ₂ / toe] | 0,199484093 [t CO ₂ / MWh] |
| China | 3,03 | [t CO ₂ / toe] | 0,260533104 [t CO ₂ / MWh] |
| Corea | 2,25 | [t CO ₂ / toe] | 0,193465176 [t CO ₂ / MWh] |
| EEUU. | 2,40 | [t CO ₂ / toe] | 0,206362855 [t CO ₂ / MWh] |

$$1 \text{ [Mtoe]} = 11630 \text{ [GWh]} \leftrightarrow 1 \text{ [toe]} = 11630 \text{ [kWh]} = 11,63 \text{ [MWh]}$$

[toe]: Toneladas equivalentes de petróleo.

Se tienen indicadores más actualizados de la huella de carbono debida a la generación energética para Chile, en la referencia [13], se puede observar la huella de carbono promedio por [MWh] generado durante el año 2011 en Chile, mostrada en la Tabla 3. La unidad utilizada en la referencia [13] para representar las emisiones de gases de efecto invernadero, es masa de CO₂eq (dióxido de carbono equivalente), considera el efecto de otros gases de efecto invernadero además del dióxido de carbono, sin embargo, las referencias anteriores consideran sólo masa de dióxido de carbono, por lo que se mantuvieron las unidades de acuerdo a sus referencias.

Tabla 3: Promedio de factores de emisión, en sistemas interconectados chilenos 2011

| | | |
|------|-------|----------------------------|
| SIC | 0,379 | [t CO ₂ eq/MWh] |
| SING | 0,725 | [t CO ₂ eq/MWh] |

2.6. Evaluación económica del proyecto

Para evaluar económicamente el proyecto de producción de baterías de ión-litio, se debe evaluar una inversión y pagar costos fijos para cada etapa productiva. Además se consideran costos por cada celda y batería construida, las materias primas necesarias para su construcción y los costos de su preparación, también los costos del transporte de los diversos productos.

Los ingresos sólo se consideran debidos a la venta de productos, se considera la venta de baterías terminadas y se supone determinadas características de la demanda.

Las características de la planta productora, como los rendimientos de sus actividades, sus costos de implementación, vida útil y lugar donde se ubica son necesarias. También se requieren características de las celdas y baterías que se espera construir. Lo mismo ocurre para los valores de las materias primas y los procesos que se deben realizar para prepararlas. Todas estas características se suponen, obtienen o estiman como se muestra en el desarrollo.

Información adicional sobre evaluación de proyectos, se encuentra en el Anexo E.

Es posible encontrar ejemplos de evaluaciones económicas de producir baterías de litio-ión, en distintas referencias, como los descritos en la Tabla 4, en los que el costo de las baterías es un resultado del modelo, sin embargo, en nuestro modelo se lo considera una entrada, porque se busca determinar la factibilidad del proyecto.

Tabla 4: Descripción de evaluaciones económicas existentes

| Artículo: | Autores y año: | Descripción |
|--|--|--|
| <p><i>“An Evaluation of Current and Future Costs for Lithium-Ion Batteries for use in Electrified Vehicle Powertrains”</i> [2]</p> | <p>David L. Anderson, Asesor Dr. Dalia Patiño-Echeverri [2009]</p> | <p>En este documento, se habla de los vehículos eléctricos e híbridos, de las baterías de ión de litio, los criterios que debe superar para alcanzar una comercialización en gran escala en aplicaciones vehiculares, su funcionamiento, sus materiales, sus tipos, su proceso de fabricación y hace una división de los costos de fabricación de baterías de litio-ión cuyos resultados se observan en la Sección 2.7.I, pues son utilizados en la verificación del modelo (corresponden a una división de los costos para el año 2000).</p> <p>También en este documento, se estudian posibles escenarios para la variación de precios de las baterías. Se observa que el valor de las baterías es clave, en la viabilidad de vehículos híbridos y eléctricos.</p> <p>Compara la variación de los precios de vehículos electrificados con vehículos de combustión interna, observando que la volatilidad del valor del combustible puede afectar la competitividad comercial de las baterías de litio-ión para vehículos híbridos y eléctricos.</p> <p>También habla de otras tecnologías de almacenamiento de energía, consideraciones sobre la disponibilidad de litio y respecto del reciclaje.</p> |
| <p><i>“Factors Determining the Manufacturing Costs of Lithium-Ion Batteries for PHEVs”</i> [3]</p> | <p>Paul A. Nelson, Danilo J. Santini, James Barnes [2009]</p> | <p>En este documento, se analizan los costos de fabricar baterías de litio-ión, para distintas capacidades productivas de la planta, distintos diseños de baterías para diferentes tipos de vehículos con diferencias en la potencia y la energía de la batería, y distintos tipos de celdas con diferentes componentes químicas.</p> <p>El caso base utilizado en esta referencia, es caracterizado con un nivel particular de detalle, lo cual lo hace útil para ser el caso de estudio del modelo expuesto en este trabajo. Sus características económicas se exponen en la Sección 2.7.II, características de la construcción de las celdas y la planta productora, se estudian en mayor detalle se encuentran en el Capítulo 4.</p> |
| <p><i>“Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: The U.S. Value Chain”</i> [1]</p> | <p>Marcy Lowe, Saori, Tokuoka, Tali Trigg, Gary Gereffi [2010]</p> | <p>En este documento, se describen las baterías de litio-ión, sus avances para su uso en vehículos, sus características, su funcionamiento, su cadena de valor y proceso productivo. Parte importante del documento está dedicada al mercado de las baterías de litio-ión, en el que se tienen productores de distintas componentes para las baterías en distintas locaciones, las políticas económicas de Los Estados Unidos de América y el proceso de fabricación en dicho país. También contiene predicciones de ventas de vehículos.</p> <p>Respecto a un modelo de costos de las baterías, este documento muestra uno, en el que los costos los dividen entre las componentes principales de las baterías, para características definidas de baterías y plantas productoras.</p> |
| <p><i>“Costs of Lithium-Ion Batteries for Vehicles”</i> [7]</p> | <p>Linda Gaines, Roy Cuenca [2000]</p> | <p>En este documento, se hace un análisis detallado de los costos de fabricar baterías de litio, considerando los materiales, el proceso productivo, los costos de instalar la planta según su capacidad y precios históricos.</p> |

2.7. Costos de las baterías de ión de litio, para la verificación y el caso de estudio

I. Referencias para la verificación del modelo

Es difícil encontrar información específica de los costos de fabricación de baterías de ión de litio, dada la protección que existe sobre dicha información. Sin embargo, utilizando [2], se tienen estimaciones que son de utilidad. Esta referencia divide los costos según el nivel de fabricación de las baterías en 3 niveles y según 3 categorías. Los 3 niveles de fabricación son de: celdas, módulo y *pack*. Mientras que las 3 categorías son: materiales, manufactura y otros. Todas éstas estimaciones hechas en [US\$/kWh], para baterías de alta densidad de energía con principalmente estudios del año 2000.

A continuación, se muestra la Tabla 5 con los costos estimados, extraída desde la referencia mencionada:

Tabla 5: Costos de fabricación de baterías para el año 2000 según categorías [2]

| Nivel de integración | Categoría del costo [US\$/kWh]: | | | |
|----------------------|---------------------------------|-------------|--------|---------|
| | Materiales | Manufactura | Otros | Total |
| Celda | 734,53 | 23,15 | 86,90 | 844,58 |
| Módulo | 771,79 | 26,77 | 86,90 | 885,46 |
| Pack | 864,38 | 31,68 | 230,27 | 1126,33 |

En esta tabla, se debe tener en cuenta el costo a nivel de módulo incluye el costo a nivel de celda y el de *pack* incluye al de módulo.

La referencia describe los componentes de las 3 categorías como se explica a continuación.

En la categoría de materiales:

- Para las celdas, se tienen costos provenientes de los materiales activos, el aglutinante, aditivos, láminas de aluminio y cobre, grafito, sal de litio, polietileno, terminales, contenedor y el ajuste debido al rendimiento de la producción de celdas (un 60% de las celdas pasan el control de calidad),
- A nivel de módulo, se encuentran aquellos costos que corresponden a empaquetamiento y terminales,
- Al nivel de los *packs*, se encuentran costos debidos al empaquetamiento, terminales y a la circuitería.

En la categoría de manufactura:

- En la celda, se tienen los costos de la fabricación de sus componentes, el ensamblaje, el control de calidad, el empaquetamiento y el ajuste debido al rendimiento de la producción de celdas,
- Para el módulo y *pack*, se tiene el costo debido al ensamblaje.

En la categoría de “otros”:

- A nivel de celda, se consideran gastos corporativos y gastos en investigación y desarrollo.
- A nivel de *pack*, se le atribuyen costos a marketing, transporte, garantías y ganancias.

Por simplicidad, más adelante para verificar el modelo implementado se considera que las ganancias son un 25% del los costos de la categoría “otros”.

Para complementar esta información, al realizar la verificación del modelo se requiere información adicional, la cual se obtiene de las referencias [14] y [15], las cuales contienen información sobre las baterías utilizadas en el vehículo solar-eléctrico “EOLIAN 2”.

En estas referencias, se encuentran celdas de capacidad 16,65 [Wh] (ión litio polímero o ión litio manganeso), tienen un precio de US\$21, luego el valor actual por [kWh] es de US\$1261,26 a nivel de celda. Los valores del *pack*, consideran un BMS de US\$1740 y otros ítems necesarios para la construcción del *pack*, se llegó a que su costo final aproximado es de \$3.000.000 o US\$6213,367 (dólar en fecha: 20-3-2012). Este valor corresponde a un *pack* de una capacidad de 4462,2[Wh], lo que nos entrega un valor del [kWh] a nivel de *pack* de US\$1392,45.

Las celdas de ión litio polímero, tienen una densidad de energía de 203 [Wh/Kg] y cada celda tiene una masa de 82 [g]. Su fuerza electromotriz característica es de 3,7 V.

En [16], se puede encontrar las estimaciones mostradas en la Tabla 6, para la demanda de vehículos eléctricos e híbridos, entre los años 2010 y 2015. La cual es utilizada para la verificación del modelo, para representar la demanda de baterías, como un porcentaje de esta demanda de vehículos.

Tabla 6: Demanda de vehículos eléctricos e híbridos estimada entre los años 2010 y 2015 [16]

| Año | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|---|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Demanda | 725.713 | 1.008.921 | 1.334.160 | 1.625.429 | 1.863.473 | 2.139.996 |
| Penetración en los vehículos ligeros | 1,12% | 1,39% | 1,70% | 1,96% | 2,17% | 2,41% |

II. Referencia para el desarrollo del caso de estudio

En [3], para el año 2009, se encontró información referente a la fabricación de baterías para PHEV (“*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*”, vehículos híbridos que se pueden cargar desde un sistema eléctrico externo al vehículo), el caso base expuesto en esta referencia con modificaciones, es utilizado en el estudio realizado en el capítulo 4, pues tiene un mayor detalle que los otros casos expuestos y que la mayoría de las otras referencias (en [7] se puede encontrar información igualmente útil, pero es una referencia muy antigua).

A continuación, se describe el caso base expuesto en [3]. Los parámetros estimados expuestos a continuación, se consideran para una planta con una capacidad fabricar 100.000 *packs* de baterías al año (de 300 días), con cátodos NCA y ánodos de grafito, un voltaje de circuito abierto del 50% al entregar 50 [kW], una capacidad de 30 [Ah], 8 módulos, 12 celdas por módulo y 96 celdas por *pack* o banco de baterías.

Tabla 7: Parámetros de cada pack de baterías [3]

| | | |
|---|-------|-------|
| Energía almacenada: | 10,2 | [kWh] |
| Potencia: | 50 | [kW] |
| Capacidad: | 50 | [Ah] |
| Número de celdas: | 96 | |
| Masa: | 82 | [kg] |
| Volumen: | 52 | [L] |
| Rango esperado (eléctrico) para vehículo: | 20,5 | [mi] |
| | 32,99 | [km] |

Tabla 8: Rendimientos y capacidades productivas de la planta (anuales) [3]

| | | |
|--|------------|-------------------|
| Packs producidos: | 100.000 | |
| Rendimiento de la producción de celdas: | 97 | [%] |
| Rendimiento de los materiales excepto por el electrolito: | 95 | [%] |
| Rendimiento del electrolito: | 90 | [%] |
| Número de celdas necesarias para ajustarse el rendimiento: | 9.896.907 | |
| Área de los electrodos: | 10.114.827 | [m ²] |
| Masa del material activo del electrodo positivo: | 2.083.559 | [kg] |
| Masa del material activo del electrodo negativo: | 1.387.543 | [kg] |

Tabla 9: Costos de inversión [3]

| | | |
|--|-------------|------|
| Costos de equipamiento (incluyen instalación): | 191.000.000 | US\$ |
| Edificios, terrenos y servicios públicos: | 43.000.000 | US\$ |
| Costos de comenzar el funcionamiento: | 86.000.000 | US\$ |
| Capital de trabajo: | 58.000.000 | US\$ |
| Total: | 378.000.000 | US\$ |

Tabla 10: Costos fijos (por cada pack producido, de acuerdo a la capacidad de la planta) [3]

| | | |
|--|-----|------|
| Costos de ventas, patentes y administración: | 132 | US\$ |
| Investigación y desarrollo: | 130 | US\$ |
| Depreciación: | 261 | US\$ |
| Utilidad después de impuestos: | 189 | US\$ |

Tabla 11: Costos variables, por pack [3]

| | | |
|--|-------|------|
| Materiales de la celda: | 1.214 | US\$ |
| Ítems comprados por celda: | 155 | US\$ |
| Módulo y batería: | 292 | US\$ |
| Procesamiento de los electrodos: | 72 | US\$ |
| Ensamblaje de las celdas: | 40 | US\$ |
| Ciclo de carga y control de calidad de las celdas: | 12 | US\$ |
| Ensamblaje del <i>pack</i> : | 20 | US\$ |
| Celdas rechazadas y reciclaje: | 9 | US\$ |
| Recepción y embarque: | 10 | US\$ |
| Gastos generales variables: | 97 | US\$ |

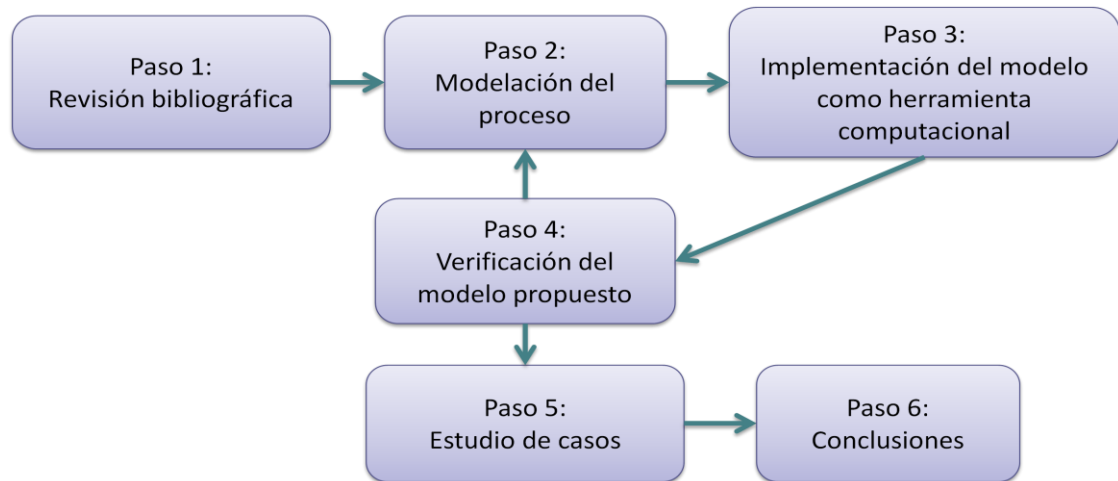
Los valores estimados de las baterías para el caso de estudio que se utilizan son los presentes en [17], de entre 450 [US\$/kWh] y 250 [US\$/kWh], entre los años 2012 y 2020, con una tasa de decrecimiento compuesto anual del 7,5%.

Capítulo 3: Propuesta de modelo, implementación y verificación

3.1. Metodología

Durante el transcurso de este trabajo de memoria, se ha propuesto seguir la metodología representada en el siguiente diagrama, para la construcción del modelo de producción de baterías de ión-litio.

Diagrama 1: Metodología



Paso 1: Revisión bibliográfica

En este paso, se incorpora los conocimientos generales y específicos, necesarios para realizar en modelo del proceso productivo de baterías de ión de litio, así como aquellos de utilidad para su comprensión.

Paso 2: Modelación del proceso productivo

En este paso, se definen la estructura y los parámetros del modelo que se propone para representar el proceso de producción de baterías de ión de litio.

Paso 3: Implementación del modelo como herramienta computacional

En este paso, se describe lo que ocurrió antes de la implementación de la evaluación del desempeño, en SimEvents de Matlab Simulink.

Por otro lado, se implementa la evaluación económica y medioambiental del proyecto en planillas de cálculo.

Paso 4: Verificación del modelo propuesto

En este paso, se comprueba que la implementación computacional del modelo del proceso en planillas de cálculo, observando que entregue resultados consistentes con las características definidas para el proceso descrito, dada la literatura mostrada en la Sección 2.7.I.

Inicialmente se deseaba validar el modelo, pero para validarlo objetivamente se requiere datos históricos del comportamiento del sistema y resultados reales, de los que no se dispone.

Paso 5: Estudio de casos y resultados

En esta actividad, se analizan casos, incorporando información esperable al modelo, para poder realizar afirmaciones sobre la realidad que se representa. Los casos estudiados se basan en los descritos en la Sección 2.7.II e información adicional cuyas referencias se mencionan al utilizarlas.

Paso 6: Conclusiones

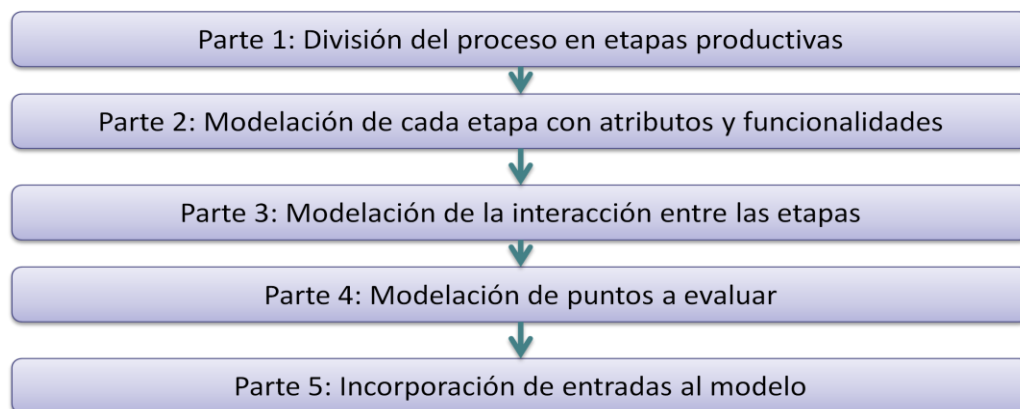
En este paso, se analizan los resultados obtenidos en el paso anterior, se concluye sobre el modelo, los resultados económicos, medioambientales y se propone trabajos futuros.

El paso 1 se encuentra representado en el capítulo 2 y en los anexos, los pasos 2 al 4 en el capítulo 3, el paso 5 en el capítulo 4 y el paso 6 en el capítulo 5.

3.2. Modelación del proceso

Para modelar el proceso productivo de baterías de ión de litio para vehículos eléctricos o híbridos de forma que permita evaluar su desempeño, rentabilidad y efectos medioambientales, se ha propuesto dividir la modelación en una serie de partes de acuerdo a las consideraciones necesarias para la construcción del modelo, estas partes siguen el siguiente diagrama.

Diagrama 2: Modelación del proceso productivo de baterías de ión de litio

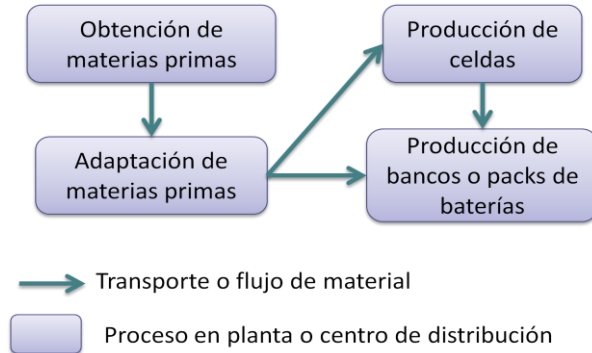


A continuación, se describe la modelación del proceso de producción de baterías de ión-litio.

I. División del proceso en etapas productivas:

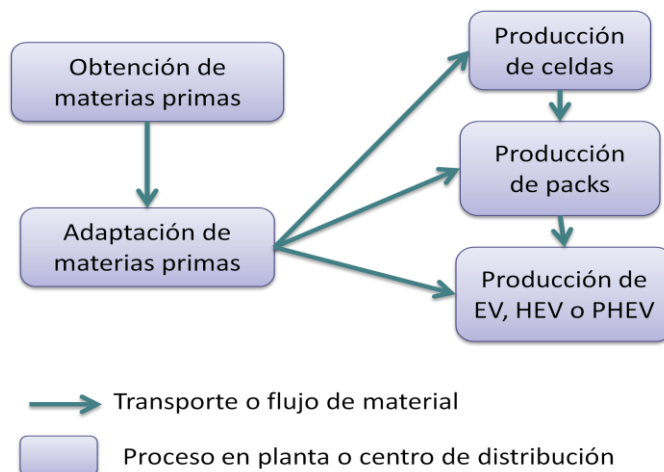
Sintetizando el proceso de producción de baterías de ión-litio de distintos tipos visto en la Sección 2.2, englobando los distintos procedimientos requeridos para producir baterías de litio, considerando tanto los mencionados, como los aquellos que posiblemente no hayan sido considerados, para producir baterías de litio-ión como cualquier otro tipo de batería de litio. Se puede construir Diagrama 3, que desglosa la producción de las baterías según el nivel de integración de sus componentes, desde la obtención de las materias primas, hasta la producción de *packs* o bancos de baterías, en 4 etapas diferentes.

Diagrama 3: Desglose del proceso de fabricación de baterías de litio



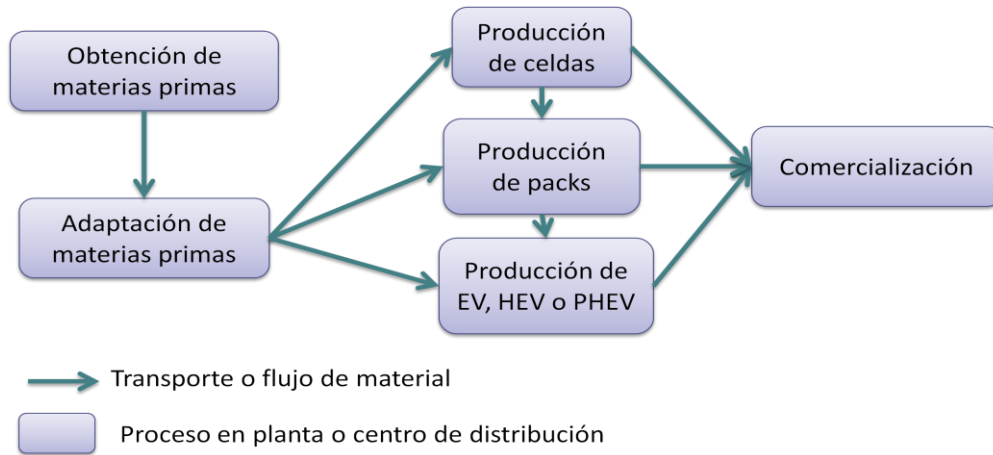
Incorporando a este diagrama la fabricación de EV (vehículos eléctricos), HEV (vehículos híbridos) o PHEV (vehículos híbridos que se pueden cargar desde un sistema eléctrico externo al vehículo), como un mayor nivel de integración de los productos y una nueva etapa al proceso, en que la obtención y adaptación de materias primas independientes de las usadas en la producción de *packs* y celdas, también son necesarias para la producción de vehículos, se obtiene el Diagrama 4.

Diagrama 4: Proceso de fabricación de baterías de litio, incorporando producción de vehículos eléctricos o híbridos



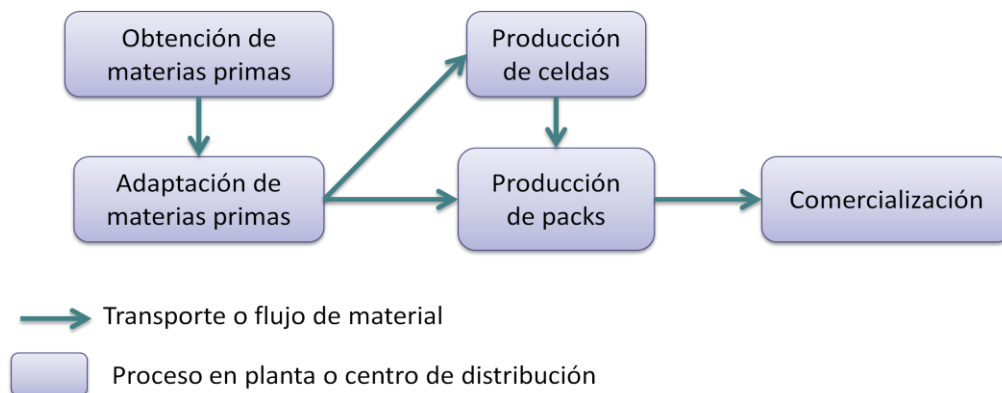
Lo siguiente que ocurre con las celdas, los bancos de baterías y los vehículos eléctricos en un proceso industrial, en que se producen estos elementos para su venta, es necesariamente la comercialización, se agrega esta actividad de forma independiente como una nueva etapa al proceso, en la que los productos terminados son transportados a sus destinatarios y se producen las ventas. Lo anterior es mostrado en diagrama siguiente.

Diagrama 5: Proceso de producción de baterías, vehículos y comercialización



En nuestro caso, se deja de considerar la comercialización de celdas y producción de vehículos, debido a que no se dispone de información suficiente para evaluar dichos puntos y que la evaluación de la fabricación de vehículos incorporaría muchas variables, que dificultarían la evaluación puntual del proceso de fabricación de baterías de ión-litio en Chile. Esto se puede observar en el Diagrama 6, que considera desde la obtención de materias primas hasta la comercialización de *packs* de baterías y representa el modelo considerado del proceso.

Diagrama 6: Proceso modelado



II. Modelación de cada etapa con atributos y funcionalidades:

A continuación, se explica cada una de las etapas, consideradas en el modelo del Diagrama 5, aunque el modelo con el que se trabaja es el expuesto en el Diagrama 6.

- i. Obtención de materias primas: En esta etapa, la actividad considerada es la obtención de materiales, para ser utilizados en cualquiera de las etapas siguientes. Entre estos materiales, se encuentran por ejemplo: carbonato de litio, cobre y aluminio.
- ii. Adaptación de materias primas: En esta etapa, se considera la preparación de las materias primas, para ser utilizadas en las etapas siguientes. Se considera que todas las materias primas pasan por esta etapa en el modelo (como se observa en los diagramas), por el simple hecho de necesitar traerlas a la planta en que deben esperar su utilización, aunque la espera sea la única actividad realizada con la materia prima, antes de una actividad de otra etapa. Sin embargo, en la implementación del caso de

estudio, se ha evitado agregar aquellas actividades que no requieran recursos o signifiquen un impacto medioambiental, por simplicidad. Un ejemplo de una actividad, que pertenece a esta etapa es la fabricación de los electrodos, si se considera como una actividad previa a la fabricación de la celda.

- iii. Producción de celdas: En esta etapa, se incluye aquellos procesos que fabrican celdas. En estos procesos, se considera que sólo pueden tener 2 etapas siguientes: la fabricación de *packs* o bancos de baterías y la comercialización de las celdas, para representar la industria completa, pero en el modelo final del proyecto, sólo tiene como etapa siguiente a la fabricación de *packs* de baterías. Se debe tener en cuenta, que es posible fabricar diferentes tipos de celdas y el mismo tipo de celda puede tener diferentes características.
- iv. Producción de *packs* o bancos de baterías: Las actividades en esta etapa al igual que en el caso de la fabricación de celdas, consideran 2 posibles etapas siguientes: la fabricación de vehículos eléctricos y la comercialización de *packs*, para representar la industria completa, pero en el modelo considerado del proyecto, se considera como única etapa siguiente la comercialización. Los bancos de baterías pueden tener diferentes características por ejemplo: las celdas que utilizan, el número de celdas que utilizan, la forma y la distribución de las celdas.
- v. Producción de EV, HEV o PHEV (vehículos eléctricos e híbridos, Anexo CII): En esta etapa se incluyen actividades cuya única etapa siguiente es la comercialización, sus actividades desde luego corresponden a la fabricación de vehículos eléctricos o híbridos de distintas características, para la representación de la industria completa, pero finalmente no es utilizada en el modelo.
- vi. Comercialización: Esta etapa, incluye dentro de sus actividades, la comercialización de los diferentes productos del proceso productivo que está siendo evaluado. En el caso del modelo de la industria completa, los productos son celdas, bancos de baterías y vehículos eléctricos, los cuales a su vez pueden ser de diferentes características, pero en el modelo final del proyecto sólo se considera la comercialización de *packs* o bancos de baterías. A diferencia de las otras etapas, esta debe considerar ingresos, además de costos por sus actividades.

Cada etapa realiza actividades, como se describió previamente. En cada actividad, se tienen costos, los cuales se consideran de 2 formas, como “costos variables” y “costos de inversión y gastos fijos actualizados”. Los “costos variables”, son aquellos dados por el número de elementos con el que trabaja cada actividad, éstos tienen la opción de evolucionar en el tiempo. Los “costos de inversión y gastos fijos actualizados”, consideran los costos fijos actualizados de acuerdo a la vida útil del proyecto, pues entre costos fijos y de inversión, considerando la vida útil de la infraestructura de cada actividad, se calculan cuotas fijas a lo largo del proyecto.

Los precios de ventas presentes en la etapa 6, se consideran variables, pues se esperan variaciones en los precios de los productos comercializados.

Los impactos medioambientales debidos a las etapas, se consideran de forma fija y variable, los fijos están dados por los impactos medioambientales de la implementación de las actividades, de acuerdo a la vida útil de éstas y los variables de acuerdo al número de productos producidos por las actividades. También se consideran, impactos variables debidos al transporte de productos, entre etapas y actividades. Finalmente, sólo se consideraron el impacto

medioambiental del transporte de materias primas y bancos de baterías; por lo que existen campos libres y el modelo implementado, es subutilizado en ese sentido.

III. Modelación de la interacción entre las etapas:

Por la forma en que se han modelado las etapas, la interacción entre ellas puede ser vista como un flujo de productos, entre las actividades de cada etapa y una o más de las actividades, en alguna de las etapas siguientes.

El flujo de productos entre actividades, puede incluir y debe considerar al implementarlo, un transporte que involucre gastos e impacto medioambiental asociado a cada producto transportado, el cual puede ser de distinta magnitud dependiendo del producto. Por ejemplo, la planta en la que se fabrican las baterías puede estar a cientos de kilómetros de donde se fabrican los vehículos, o puede estar en una planta vecina. De este modo, son importantes las distancias recorridas por los productos entre las actividades, así como los medios que se utilizan para el transporte, pues de estos factores depende el costo e impacto medioambiental de transportar los productos.

Se debe tener en cuenta en cada actividad, que su producto debe ser requerido por una demanda o producto de una etapa siguiente, en cierta cantidad definida y la producción puede tener un rendimiento determinado. Por ejemplo: un vehículo eléctrico, puede requerir un banco de baterías y a su vez 100 celdas en el banco, para tener las 100 celdas, se necesitan más de 100, pues el rendimiento de su producción no es del 100% y además, puede existir una demanda adicional de celdas, por fallas en algunos vehículos que ya están en manos de clientes. También se tiene en cuenta que los costos de transporte pueden variar.

IV. Modelación de puntos a evaluar:

i. Evaluación de desempeño en proceso de producción:

Para comprobar la forma en que se desempeña el proceso productivo, se pretende observar cómo se desenvuelven los materiales utilizados, hasta convertirse en productos terminados. Para lograrlo, es necesario modelar la capacidad de almacenaje tanto de productos terminados, en proceso de producción, como de materias primas, así como la capacidad productivas de las distintas etapas del proceso, las pérdidas de productos por diversos motivos (como por ejemplo: no pasar control de calidad), las fallas de los equipos, la tardanza de los productos (y o materias primas) en cada etapa, la frecuencia con que se retiran productos y la frecuencia con que se entregan materias primas.

No se extendió este desarrollo, debido a que requería hipótesis demasiado particulares, para nivel de desarrollo actual del proyecto, del nivel de frecuencia de falla de equipos; capacidades de equipos, tanto de producción, como de almacenaje; comportamientos estadísticos de las distintas actividades, recepción y despacho de productos; etc.

ii. Evaluación del impacto medioambiental:

Dentro de las evaluaciones de impacto medioambiental, se enmarcan distintos ámbitos, tales como la emisión de ruidos, el desecho de residuos, el efecto sobre la zona en que se realiza el proyecto y el efecto del transporte de los materiales. Sin embargo, se desea utilizar las emisiones de dióxido de carbono (medida en masa de emisiones de CO_2) del proceso como indicador, ya que permite una comparación sencilla e imparcial de las consecuencias medioambientales de un proceso productivo.

En nuestro caso, el modelo considera el impacto medioambiental de fabricar y transportar los distintos productos envueltos en el proceso, obtener las materias primas y comercializar los

productos terminados. Esto, se hace mediante la suma de las emisiones de dióxido de carbono, de implementar cada actividad en el proyecto, más la suma de la cantidad requerida de cada producto, por masa de dióxido de carbono que genera la actividad que lo produce, por producto, más el impacto de transportar cada producto a la actividad siguiente.

Impacto medioambiental por productor y su vida útil: Para cada actividad, se asigna un productor, que corresponde al área del proyecto que realiza la actividad. La vida útil del productor, corresponde a la menor de las vidas útiles de los diferentes equipos en la actividad. El impacto medioambiental, de la implementación de cada productor se considera mensualmente. Para obtenerlo, se suma los impactos medioambientales de la instalación de cada equipo, dividido por la vida útil de cada equipo.

Impacto medioambiental por producto: a cada producto se le asigna un impacto medioambiental correspondiente a la suma del impacto de su obtención, producción o comercialización, en las distintas actividades de cada etapa, más el impacto de transportarlo. A cada actividad, se le asocia el impacto de transportar sus productos a la actividad siguiente.

Conociendo la demanda y las cantidades requeridas de diferentes productos, se calcula el impacto medioambiental resultante, sumando: las demandas de cada producto por su impacto, más el impacto mensual debido a la instalación para cada mes y luego sumando los impactos de todos los meses hasta el horizonte de evaluación.

La evaluación del impacto medioambiental implementada, es subutilizada, debido a que finalmente sólo se considero el impacto medioambiental del transporte, en los casos evaluados.

iii. Evaluación económica:

Para el caso de la evaluación económica del proyecto, se consideran los ingresos y egresos de las distintas actividades e inversiones, sujetos a una tasa de descuento que refleje el costo de oportunidad del dinero de quien invierte, para llevar los ingresos y costos futuros a su valor presente. El valor presente neto o valor actual neto es el indicador elegido para realizar la evaluación económica del proyecto, ya que ofrece la posibilidad de ordenar la realización de proyectos, con características distintas de acuerdo a su conveniencia.

Para poder calcular el VAN del proyecto, se considera un flujo de caja, realizado en base a la cantidad de productos comprados en las actividades de la etapa 1, producidos en las actividades de las etapas 2 a 5 y vendidos en las actividades de la etapa 6. Además de las inversiones necesarias por las diferentes etapas y el costo del transporte.

Para obtener el VAN del proyecto se elabora un flujo de caja.

El flujo de caja tiene 3 componentes, como se ve en el Anexo EIII:

- **Flujos de inversiones:** En el momento de la inversión, existe la posibilidad la adquirir un crédito, si bien el modelo permite su representación, es una opción no utilizada. Todas las inversiones, por compra de equipos o inmuebles, se consideran como costos de inversión en actividades específicas en el modelo.
- **Ingresos de operación:** El modelo, considera que el proyecto sólo tiene ingresos por ventas de productos. Por consiguiente sólo se considera que se tienen ingresos variables.
- **Costos de operación:** El modelo considera que existen costos en los que incurren las distintas actividades para satisfacer cierta producción y que se comportan de forma semi-variable mixta.

Inversión, costos fijos y vida útil del productor: Para cada actividad se asigna un productor, que corresponde al área del proyecto que realiza la actividad. La vida útil del productor, corresponde a la menor de las vidas útiles de los diferentes equipos en la actividad. A continuación, se explica el procedimiento para obtener el costo de inversión en la actividad:

- El costo de los diferentes equipos, es representado en forma de mensualidades de acuerdo a su vida útil particular,
- Se suman las mensualidades de todos los equipos y los costos fijos correspondientes, hasta la vida útil de la actividad, obteniéndose una serie de flujos,
- Con los flujos de costos recién obtenidos, se calcula el valor actual, lo que nos entrega el valor de inversión en la actividad.

Como es lógico, se asume que se repetirá la inversión en un activo cada vez que se acabe su vida útil, pero gracias a la equivalencia financiera, se puede representar este proceso como si un pago, se realizase en la actividad cada cierto tiempo (Anexo E).

Ya que, es posible tener actividades de diferentes vidas útiles y gracias a la equivalencia financiera, se representan las inversiones de las distintas actividades como una serie de flujos mensuales.

Finalmente, se puede decir que la inversión y la vida útil del productor, en cada actividad, sirven para representar los costos fijos de operación y los flujos de inversiones.

Costo actual por producto y su variación esperada: Como su nombre lo dice, el costo actual del producto de cada actividad y su variación esperada son también utilizados. Es necesario calcular cuánto cuesta realizar cada actividad definida, por producto, para obtener este valor y conocer su comportamiento, para poder representarlo de forma adecuada.

Precio actual de transporte y productos comercializados más su variación esperada: Del mismo modo, se tienen los costos de transporte entre las distintas actividades y de comercialización de los productos, para instantes futuros.

En conjunto, los costos por las diferentes actividades y el transporte por los que pasa cada producto, más la información de las cantidades necesarias de cada producto para satisfacer una demanda, se consideran los costos de operación variables.

Precio actual de cada producto comercializado y su variación esperada: De igual modo que en el caso de los costos por producto, pero para los ingresos, se necesita conocer su valor actual y el comportamiento para tener valores esperados de los productos, que se pretende comercializar.

Al sumar la demanda de productos comercializados a esta información, se obtiene los ingresos de operación, ya que sólo se consideran ingresos variables.

Con la información recién mostrada, es posible calcular un flujo de caja y obtener un valor presente neto, para el proyecto.

El flujo de caja, supone que los costos están estimados de forma actualizada para el mes en que se venden los productos y los retrasos en los pagos de las ventas ocurren con respecto a esta fecha.

V. Incorporación de entradas al modelo:

Como se ha mencionado antes, el modelo de desempeño no se termino de construir, en este se habrían representado las actividades como series de subsistemas entre los que productos y materiales viajan, uniéndose y formando productos nuevos, generando costos y dióxido de carbono, sometidos a retardos, fallas, transporte y procesos. Sus entradas habrían sido características del desempeño de las actividades, como por ejemplo: la distribución en el tiempo de ocurrencia de distintos eventos (llegada de materias primas, llegada de pedidos, fallas), la distribución de la tardanza del transporte, capacidades de almacenaje en colas, la tardanza de un proceso de cierta capacidad representado en un servidor, etc.

La evaluación económica y de impacto medioambiental se implementa mediante una serie de planillas de cálculo y macros en Microsoft Excel. En esta serie de planillas (hojas de cálculo) se tiene las siguientes entradas:

- i. En la Hoja 1 del modelo, se tienen 2 entradas, estas corresponden el horizonte de evaluación del proyecto y la tasa de descuento utilizada en el,
- ii. Desde la Hoja 2 y hasta la Hoja 6, se representan las Etapas 1 a 5 del modelo, aunque la Etapa 5 (producción de vehículos), no es utilizada. En cada una de estas hojas, las entradas son características de las distintas actividades realizadas en cada etapa, a cada actividad se le asigna una fila. Las entradas por cada actividad son:
 - a. En primer lugar, si la actividad de la fila correspondiente se realiza, este punto fue agregado para simplificar la modificación del modelo, permitiendo quitar una actividad del modelo sin borrarla, sino que simplemente informando al modelo que no se realiza, mediante una variable booleana,
 - b. En segundo lugar el nombre de la actividad, usualmente se utiliza su funcionalidad, como por ejemplo: Obtención de grafito,
 - c. Luego se incorporan características de cada producto, éstas son:
 1. El nombre del producto, por ejemplo: Grafito,
 2. La masa del producto por unidad requerida,
 3. El impacto medioambiental (masa de gases de efecto invernadero emitidos) de realizar la actividad para una unidad de producto.
 4. El costo actual por producto, su comportamiento en el tiempo (Por ejemplo: Constante, De crecimiento constante o De crecimiento exponencial) y el porcentaje de variación mensual,
 5. El rendimiento porcentual de la actividad de producir el producto.
 - d. Después se incorpora características del productor, donde el productor es el área o empresa a cargo de producir los productos de la actividad. Las entradas por productor son las siguientes:
 1. El nombre del productor,
 2. La ubicación del productor,
 3. Los costos de inversión, necesarios para la implementación de la actividad productiva, sumados a los costos fijos actualizados, por productor de cada actividad,

4. La vida útil asignada al productor, correspondiente a la menor de las vidas útiles de sus diferentes equipos,
 5. El impacto medioambiental de la instalación del productor.
- e. También, se tiene entradas que caracterizan a las actividades, que utilizan los productos de cada actividad. Estas actividades, son caracterizadas mediante las siguientes entradas:
1. Producto: se refiere al nombre del producto que requiere el uso del producto. Por ejemplo: cada celda requiere electrodos,
 2. Actividad: se refiere a la actividad en la que se ocupa el producto de cada actividad. Por ejemplo: Los electrodos son requeridos una actividad que se ha denominado “ensamblaje, carga y control de las celdas”,
 3. Etapa: corresponde a la etapa en que se ocupa el producto. Por ejemplo: los electrodos, son utilizados en la “Etapa 3: Producción de celdas”, esta etapa contiene la actividad “ensamblaje, carga y control de las celdas”, la que a su vez produce celdas.
 4. Cantidad necesaria: corresponde al número de productos que requiere la actividad que utiliza los productos de cada actividad. Por ejemplo: Cada celda requiere un par de electrodos y cada *pack* 96 celdas.
- iii. La Etapa 6, se divide en 2 hojas con diferentes entradas, una para caracterizar los costos de comercialización y otra para caracterizar los ingresos. En ambas hojas, las actividades son las mismas, cada una se coloca en una fila y corresponden a la comercialización de productos con los clientes, cada combinación de producto y cliente, genera una actividad de comercialización. Las características particulares de cada hoja se exponen a continuación:
- a. En la Hoja 7, las entradas son similares que para las etapas anteriores, ya que se caracteriza los costos de comercialización, con ciertas diferencias:
1. La utilización, ya no se considera, debido a que no hay una etapa siguiente,
 2. En lugar de caracterizarse a un productor en esta etapa se caracteriza a un cliente, con características equivalentes a las del productor, como se muestra a continuación:
 - i. El nombre del cliente,
 - ii. La ubicación del cliente,
 - iii. Los costos de inversión necesarios para la comercialización, sumados a sus costos fijos actualizados, para cada actividad de comercialización,
 - iv. La duración de la comercialización con cliente antes de realizar una nueva inversión en el,
 - v. El impacto medioambiental de comerciar, durante duración de la comercialización antes de la nueva inversión,
 3. No se considera que esta etapa tiene un rendimiento (o que tiene un rendimiento del 100%).

- b. En la Hoja 8, se caracteriza los ingresos de comercialización, esta etapa sólo se considera ingresos, luego sus entradas son:
 - 1. El nombre da cada actividad (de comercialización) y si se realiza,
 - 2. El nombre de cada producto comercializado, su precio, el comportamiento de su precio y la variación porcentual mensual de su precio. Estos parámetros afectan los ingresos del proyecto.
 - 3. Sólo el nombre para el cliente, sus otras características relevantes se utilizan para calcular los costos.
- iv. Otra entrada existente en el modelo, es la demanda de productos de la comercialización, esta define las cantidades requeridas de distintos productos. Se define en la Hoja 9, del modelo construido en Excel, mediante la cantidad de productos demandada mes a mes.
- v. Otras entradas utilizadas, son características de los transportes existentes entre las distintas actividades, de las distintas etapas. Para estos casos, en la Hoja 10, se tienen las siguientes entradas:
 - a. Medio de transporte,
 - b. Distancia recorrida,
 - c. Precio del transporte según la masa y la distancia a recorrer,
 - d. Emisiones de dióxido de carbono del transporte según la masa y la distancia a recorrer,
 - e. Comportamiento y variación mensual, del precio del transporte.
- vi. Los retardos existentes en los pagos por productos vendidos, para el cálculo de los ingresos en la Hoja 12,
- vii. Características de un crédito, se ha implementado computacionalmente la posibilidad de pedir un crédito, en la misma hoja en que se realiza el flujo de caja (la Hoja 14), sus entradas son las siguientes:
 - a. Financiamiento bancario (cantidad pedida en el crédito),
 - b. Tasa de interés anual del crédito,
- viii. Número de cuotas, la implementación computacional considera que se pagan desde el mes siguiente al comienzo del proyecto.
- ix. Una última entrada, también presente en la Hoja 14, son los impuestos a las utilidades.

3.3. Implementación del modelo como herramienta computacional

I. Implementación para la evaluación de desempeño del proceso productivo en SimEvents de Matlab:

Durante el comienzo de este trabajo de memoria, se dedico bastante tiempo al desarrollo de un modelo del proceso productivo de baterías de ión de litio para SimEvents de Matlab Simulink. Primero, se desarrollo un modelo preliminar del proceso completo, dada la forma en que fue construida su mayor utilidad fue el servir como base para el desarrollo de otros modelos.

Luego, se desarrollo un modelo que sólo representa el despacho de las baterías, muestra y calcula variables como: los costos del despacho, los ingresos, la huella de carbono del despacho, los pedidos entregados, los pedidos despachados, los pedidos en espera, las tardanzas en completar los pedidos y las tardanza del despacho de pedidos, en el tiempo. Este modelo, es visto de forma satisfactoria, sin embargo, requiere conocer variables demasiado precisas para el momento en el que se encuentra el proyecto, podría permitir mejorar el proceso, en una etapa de más avanzada. Se ha detenido el desarrollo del modelo para SimEvents, esperando que sea útil continuar con él en futuras etapas del proyecto o en otros trabajos.

Información adicional de simulación de evento discreto, se expone en el Anexo AI.

II. Implementación del modelo para la evaluación económica y medioambiental en planillas de cálculo:

Este modelo se implemento en Microsoft Excel, en la Sección 3.3.II.i, se expone un diagrama del modelo implementado completo. En el diagrama, se muestran las hojas de cálculo utilizadas, con sus respectivas entradas y salidas. También muestra las macros que se utilizan y el momento en que se deben ejecutar. Para que el modelo se ejecute de forma correcta, se debe seguir el orden establecido en el diagrama, para la incorporación de las entradas y ejecución de las macros.

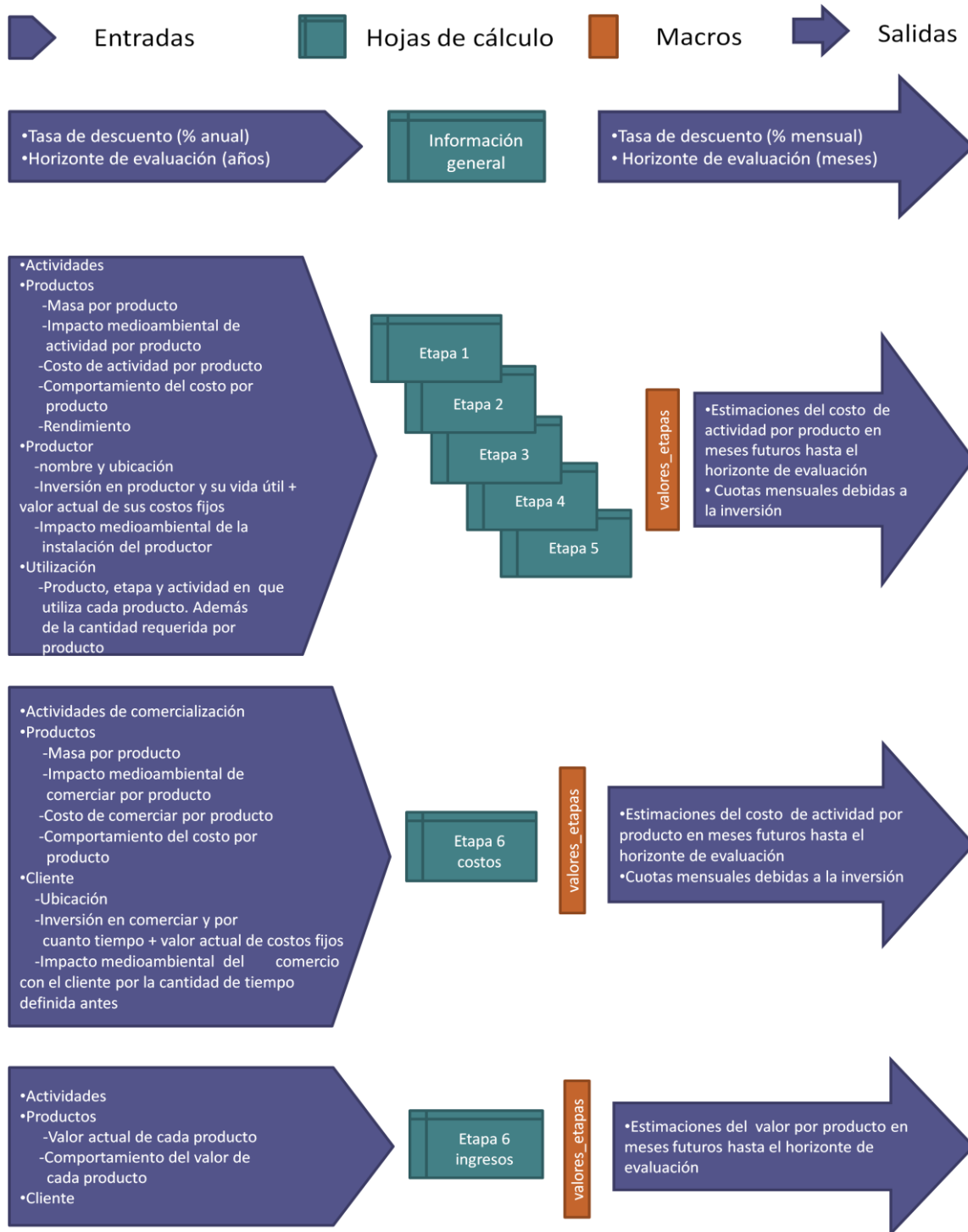
En la Sección 3.3.II.ii, se describe las hojas del documento, con sus entradas, salidas y la forma en que se obtienen las salidas al ejecutar las macros correspondientes.

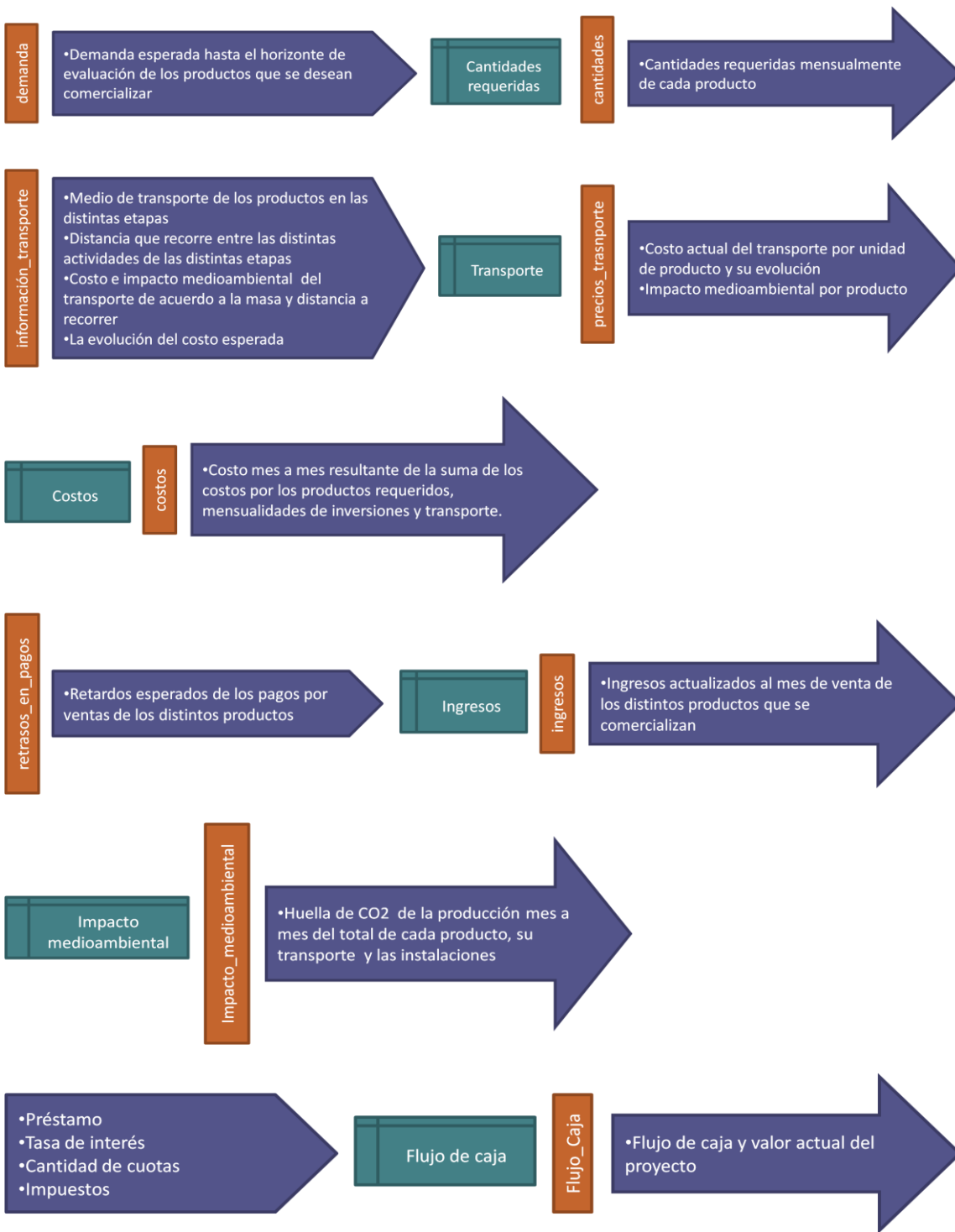
En la Sección 3.3.II.iii, se describe la funcionalidad de cada una de las macros implementadas.

i. Diagrama funcional del modelo implementado:

A continuación, se observa un diagrama, con las funcionalidades implementadas en las diferentes hojas. Sucesivamente se agregan entradas, se utilizan salidas de hojas anteriores y se ejecutan macros. El orden con que se realizan estas acciones, debe ser el mostrado en este diagrama.

Diagrama 4: El modelo implementado





ii. Las hojas del documento:

Las hojas del documento de Excel representan partes del modelo, cada hoja tiene entradas y salidas correspondientes, las cuales se explican a continuación:

a. Información general (Hoja 1)

La primera hoja del modelo construido en Excel, contiene información general del proyecto, la tasa de descuento y el horizonte de evaluación. Sus entradas corresponden a las expuestas en el Sección 3.2.V.i, en unidades anuales.

La Hoja 1 calcula automáticamente:

- La tasa de descuento mensual
- El horizonte de evaluación en meses

b. Etapas 1 a 5 (Hojas 2 a 6)

Estas hojas, contienen los modelos de costos asignados a las Etapas 1 a 5, cada actividad agregada a una etapa, genera un producto que es utilizado en una etapa siguiente por otra actividad. En cada hoja, las entradas corresponden a las explicadas en el Sección 3.2.V.ii.

c. Etapas 6 costos (Hoja 7)

Esta hoja, contienen los modelos de costos asignados a la Etapa 6, cada actividad agregada a esta etapa, genera un producto que es entregado a un cliente. Para la Hoja 7, las entradas se caracterizan en el Sección 3.2.V.iii.a.

Para las Hojas 2 a 7 se implemento una macro, “valores_etapas”, que realiza los siguientes cálculos:

- Las mensualidades debidas a las inversiones,
- Los costos esperados en instantes futuros del producto de cada actividad.

d. Etapas 6 ingresos (Hoja 8)

Esta hoja, es similar a las Hojas 2 a la 7, sin embargo, en ella sólo se consideran los precios de ventas en la comercialización de los diferentes productos. En la Hoja 8 las entradas se caracterizan en el Sección 3.2.V.iii.b.

Para esta hoja, se utiliza la misma macro que en las Hojas 2 a 7, sólo que las celdas de inversiones permanecen vacías y se estiman los precios de ventas esperados de los productos, en lugar de los costos.

e. Cantidades requeridas (Hoja 9)

Esta hoja, contiene las cantidades requeridas de los distintos productos, según la demanda que se desee satisfacer.

Para construir esta hoja, se utilizan 2 macros, la primera macro, “demanda”, define los elementos que se comercializan, basándose en los existentes en la Hoja 8 y deja los espacios libres para definir las demandas mensuales de los distintos productos, listos para ser completados por el usuario. Los espacios corresponden a las entradas descritas en el Sección 3.2.V.iv.

La segunda macro, “cantidades”, se encarga de definir las cantidades de productos intermedios y materias primas que viajan a través de nuestro proceso productivo, en base a las cantidades que se requieren de cada elemento en las etapas siguientes y las cantidades de productos demandadas.

Para abastecer a actividades diferentes de un mismo producto, se debe repetir actividades que producen el producto, pero cuyos productos tienen diferentes destinos.

f. Transporte (Hoja 10)

Esta hoja contiene los costos del transporte entre las distintas etapas por unidad transportada.

De forma similar que en el caso anterior, se utilizan 2 macros en esta hoja, la primera, “informacion_transporte”, para la lectura de los productos que serán transportados en el proceso, la cual entrega la siguiente información proveniente de las Hojas 2 a 7: Producto transportado, masa por unidad del producto transportado, etapa de origen, actividad de origen, lugar de origen, etapa de llegada, actividad de llegada, lugar de llegada, producto que utiliza al transportado en llegada.

Luego de ejecutar esta macro, se debe llenar la información del transporte entre las distintas etapas, similarmente a como ocurre en las Hojas 1 a 7, esta información es la correspondiente a las entradas del Sección 3.2.V.v.

Con la información expuesta en la Hoja 10, hasta el momento, la 2ª macro, “precios_transporte”, calcula el costo y el impacto medioambiental de transportar cada unidad de producto entre las distintas etapas. Finalmente, esta macro calcula los precios para el transporte, por unidad, hasta el horizonte de evaluación.

g. Costos (Hoja 11)

La Hoja 11, contienen los costos totales de la producción de los distintos elementos necesarios para completar el proceso productivo y el gasto en transporte de éstos. Esta información, se calcula mensualmente de acuerdo a los precios y la demanda, para luego determinar el valor actual de la producción de cada elemento. Toda la información en esta hoja, es expuesta por una única macro “costos”.

h. Ingresos (Hoja 12)

En esta hoja, se calculan los ingresos obtenidos de la Etapa 6, de acuerdo a la demanda definida, al igual que en el caso anterior, requiere el cálculo del valor actual de los ingresos. En esta hoja además se adjunta un conjunto de entradas, correspondientes a los retrasos de los pagos de los compradores. Para la construcción de esta hoja se utiliza 2 macros, la primera, “retrasos_en_pagos”, se encarga de habilitar los espacios para llenar los posibles retardos de los pagos para las compras de cada producto en cada mes, correspondientes a las entradas expuestas en el Sección 3.2.V.vi. La segunda macro, “ingresos”, se encarga de calcular los ingresos mensuales y el valor actual de las series de pagos, considerando los retardos de cada pago.

i. Impacto medioambiental (Hoja 13)

En esta hoja, se calcula el impacto medioambiental de producir los distintos elementos, transportarlos entre las distintas etapas y realizar las instalaciones de las actividades. Esto es hecho mediante una única macro, “impacto_medioambiental”.

El modelo, es sub utilizado, pues finalmente, sólo se considera el impacto medioambiental del transporte de materias primas y baterías terminadas, al realizar el análisis de casos. No se dispone de información suficiente, para determinar el impacto medioambiental de realizar las distintas actividades del proceso productivo y su implementación.

j. Flujo de caja (Hoja 14)

En esta hoja, se consideran como entradas, el porcentaje de impuestos pagado, la cantidad pedida de un crédito para el financiamiento del proyecto, sus intereses y su número de cuotas, como se ha mencionado en los Secciones 3.2.V.vii y 3.2.V.viii.

Al ejecutar la macro “flujo_caja”, se obtienen las salidas de esta hoja. Las primeras salidas de esta hoja, son la tasa de interés mensual del crédito y el valor de cada cuota. Las otras salidas de esta hoja, corresponden a la realización de un flujo de caja, el cual considera:

- Los ingresos y costos, que son los expuestos en las hojas de dichos nombres,
- La utilidad antes de impuestos, se calcula como los ingresos, menos los costos, menos los intereses,
- Los impuestos, se calculan sobre las utilidades antes de impuestos,
- Al descontar los impuestos a las utilidades antes de impuestos, se obtienen las utilidades después de impuestos,
- Los flujos de caja, se consideran como las utilidades después de impuestos, más los prestamos, menos las amortizaciones.

A los flujos de caja de cada mes, se les calcula el valor actual, para luego determinar el VAN del proyecto, como la suma de los valores actuales del los flujos de caja mes a mes.

iii. Las macros construidas:

A cada macro, corresponde un procedimiento, se tiene información adicional sobre programación en macros de Excel en el Anexo AII. A continuación, se explica las funciones de cada macro:

a. “valores etapas”

Para las Hojas 2 a la 8, se encarga de borrar los precios de los productos predichos en ejecuciones anteriores, predecir nuevamente los precios hasta el horizonte de evaluación, de acuerdo a las descripciones existentes en las hojas.

Para las Hojas 2 a la 7, se encarga de calcular las cuotas mensuales de las inversiones y los costos fijos, según la vida útil y los valores de las distintas actividades.

b. “demanda”

Se encarga de borrar el contenido de la Hoja 9 y prepararla para que el usuario ingrese la información pertinente a la cantidad de productos que se planea vender, hasta el horizonte de evaluación.

c. “Cantidades”

Se encarga de completar las cantidades requeridas de los distintos productos elaborados por las distintas etapas, en la Hoja 9. Teniendo la demanda de los productos comercializados, definida por el usuario y la cantidad de productos que necesita producir cada actividad, para construir los productos comercializados, además del rendimiento de cada actividad.

d. “información transporte”

En la Hoja 10, se encarga de mostrar todos los transportes de productos que deben realizarse durante el proceso productivo entre las distintas etapas, sus orígenes, destinos y procesos que requieren los distintos productos. Para que el usuario, llene la información referente al medio de transporte que se utiliza.

e. “precios transporte”

Se encarga, de llenar en la Hoja 10, los precios de los transportes para la actualidad y tiempos futuros más el impacto medioambiental por producto transportado, de acuerdo a la información entregada por el usuario.

f. “costos”

Teniendo en consideración las cantidades requeridas de productos, la información referente a los costos de las actividades y los productos, además de la información referente al costo del transporte. Esta macro, calcula los costos resultantes de las actividades mes a mes, más el costo del transporte de los productos a la actividad siguiente, su valor actual y los costos totales mes a mes.

Todos los cálculos descritos, son mostrados por esta macro en la Hoja 11.

g. “retrasos en pagos”

Se encarga de preparar la Hoja 12, para que el usuario inserte los retrasos esperados para los pagos de los distintos productos comercializados en cada mes.

h. “ingresos”

Considerando los precios y las cantidades de productos comercializados, más los retrasos en los pagos, este módulo calcula, en la Hoja 12, los valores actuales de las ventas en cada mes y el valor actual, de los ingresos por cada producto comercializado. También, calcula los ingresos mes a mes por la venta de todos los productos comercializados.

i. “impacto medioambiental”

Se encarga de calcular la huella de carbono resultante de realizar las actividades del proceso productivo y los transportes mes a mes, además de su suma hasta el horizonte de evaluación.

j. “flujo caja”

Se encarga de realizar el flujo de caja, además del valor actual del proyecto completo.

3.4. Verificación del modelo propuesto

El caso construido para la verificación, no representa necesariamente la realidad, es construido exclusivamente para verificar el funcionamiento del modelo implementado. Contiene información de diferentes casos y referencias, con los que se construye el caso utilizado.

I. Características del caso de verificación:

La información de costos e ingresos para la verificación, está expuesta en la Sección 2.7.I, está expresada en [US\$/kWh].

En materiales, se asume un gasto de US\$734,53 por [kWh] a nivel de celda y US\$ (864,38-734,53)=US\$ 129,85 por [kWh] a nivel de *pack* de baterías. La única actividad, en la verificación, que se considera con un rendimiento distinto del 100% es la producción de celdas, correspondiente al 60%.

Se asume una capacidad de 16,65 [Wh], por celda de ión litio polímero y tiene una masa de 82 [g] (como las descritas en la Sección 2.7.I), luego se asume que tiene un costo en materiales US\$7,34 (734,53/1000*16,65*0,6).

Considerando, que un *pack* de baterías convencional para un vehículo eléctrico, almacena 24 [kWh], como es el caso del Nissan Leaf [1]. Para almacenar esta energía se requieren 1.442 celdas como las descritas, las cuales almacenan un total de 24,01 [kWh]. Esto genera un costo en materiales para la fabricación de *packs* de 24,01*US\$129,85=US\$3117,7.

La masa total del conjunto de celdas, es entonces de 118,24[Kg] (82/1000[Kg]*1442).

La masa que se considera, para materiales adicionales en cada banco de baterías es de 47 [Kg], utilizando el valor de electrónica, control y empaquetamiento, de las baterías del Nissan Altra como referencia [7]. Con lo anterior, la masa de los *packs* de baterías completos, es de 118,24[Kg]+47 [Kg]=165,24 [Kg].

El costo de manufactura para las celdas de litio es de US\$0,2313 (0,6*16,65/1000[kWh]*23,15[US\$/kWh]) por celda y para cada banco de batería es de US\$204,81 (24,01[KWh]*(31,68-23,15) [US\$/KWh]).

Los costos asignados a otros, diferentes de la utilidad (la cual se supone implícita en la tasa de descuento) se asignan a la comercialización de *packs* pues no deben ser afectados por el rendimiento del 60% de la producción de celdas. Otro punto a considerar en los costos de “otros”, es que la utilidad en el modelo no se considera un costo, por simplicidad se considera de ¼ de sus costos a nivel de *pack* en “otros”, de este modo:

230,27[US\$/KWh]*3/4*24,01[KWh]=US\$4.146,59 es el costo da cada *pack* de baterías en “otros”.

Para los ingresos por ventas se considera un valor de US\$1.392,45 el [kWh] a nivel de *pack* de baterías, luego el valor de cada *pack* es de:

$$1.392,45[\text{US}\$/\text{kWh}]*24,01[\text{kWh}]=\text{US}\$33.432,72.$$

Con la información de la que se dispone, no se puede cuantificar el impacto medioambiental de la producción de baterías de ión de litio. Para simplificar el problema, no se considerará los impactos medioambientales de la producción, pero si del transporte. En la

verificación sólo se considerará el transporte de las baterías terminadas, para mantener el problema con poca complejidad.

Resumiendo los cálculos realizados, en las tablas siguientes se describe el caso de verificación.

Tabla 12: Características de la celda en la verificación

| | | |
|--|---------------------|--------|
| Tipo de celda: | Ión litio manganeso | |
| Capacidad: | 16,65 | [Wh] |
| Masa: | 82 | [g] |
| Costo de fabricación: | 0,2313 | [US\$] |
| Costo de materiales: | 7,34 | [US\$] |
| Costo completo: | 12,62 | [US\$] |
| $(= (7,34+0,2313)/0,6; \text{Rendimiento del } 60\% \text{ de la producción de celdas})$ | | |

Tabla 13: Características de cada pack en la verificación

| | | |
|---|-----------|----------|
| N° de celdas: | 1442 | [celdas] |
| Capacidad: | 24,01 | [kWh] |
| Masa (1442 celdas): | 118,24 | [kg] |
| Masa (equipos y materiales adicionales) | 47 | [kg] |
| Masa: | 165,24 | [kg] |
| Costo de fabricación: | 204,81 | [US\$] |
| Costo de materiales: | 3.117,70 | [US\$] |
| Costo en otros: | 4.146,59 | [US\$] |
| Costo completo: | 25.665,46 | [US\$] |
| $(=4146,59+3.117,70+204,81+1442*(7,34+0,2313)/0,6)$ | | |

Tabla 14: Precios de venta en la verificación:

| | | |
|---------------------------|-----------|--------|
| Precio de venta del pack: | 33.432,72 | [US\$] |
|---------------------------|-----------|--------|

II. Construcción y ejecución del modelo de verificación:

Con la información descrita anteriormente, se tiene las entradas necesarias para el modelo implementado y se muestra su funcionamiento hoja por hoja:

Hoja 1: Información general

En esta hoja las entradas al modelo son una tasa de descuento utilizada del 10% anual y un horizonte de evaluación de 6 años (se tiene demandas para el intervalo 2010 al 2015). Luego se tienen una tasa de descuento mensual de:

$$r_m = (1 + 0,10)^{\frac{1}{12}} - 1 = 0,007974 = 79,74\%$$

Y un horizonte de evaluación en meses de:

$$v_m = 6 * 12 = 72$$

Lo explicado aquí coincide con lo que se observa en la hoja:

Ilustración 1: tasa de descuento y horizonte de evaluación

| | | | | |
|----------------------------|-----|-------|---------|---------|
| Tasa de descuento nominal: | 10% | Anual | 0,7974% | mensual |
| Horizonte de evaluación: | 6 | Años | 72 | meses |

A continuación, se muestra la incorporación de datos al modelo hoja por hoja, entre las Hojas 2 y 8, los resultados se obtienen utilizando la macro “valores_etapas”.

Hoja 2: Etapa 1, Obtención de materias primas

La Ilustración 2, muestra las actividades realizadas incorporadas en la Hoja 1.

Ilustración 2: Actividades en etapa 1 y su realización

| | |
|--------------|---------------------------------------|
| Realización: | Actividad: |
| | |
| TRUE | Obtención de materiales para la celda |
| TRUE | Obtención de materiales para el pack |

Se ingresan las características definidas para los productos y sus productores correspondientes, según se definió previamente. Particularmente en esta etapa, se considera un costo de materiales para la producción de celdas de US\$ 7,34 por celda y de obtención de materiales para la elaboración de *packs* de US\$ 3.117,7 por *pack*. Estos productos consideran respectivamente masas de 82 [g] y 47 [kg]. No se considera impacto medioambiental por las actividades. Esto se observa en la Ilustración 3.

En este momento, no se consideran costos de inversión en la obtención de las materias primas, se considera que este costo es externo al proyecto, sin embargo, es necesario asignar una vida útil a los equipos de los productores, para que no se indefinida el valor de las cuotas mensuales debidas a la inversión. En este caso quien realiza las actividades, son los proveedores. Se caracteriza a los proveedores en la Ilustración 4.

La etapa siguiente a la obtención de materias primas, es su adaptación, como se muestra en la Ilustración 5.

Se tienen estimaciones de costos futuros por producto, en este caso no cambian, pero se realizan estimaciones hasta el mes 72, pues se configura 6 años, se muestran las estimaciones cada 12 meses en la Ilustración 6.

Ilustración 3: Características de los productos en Etapa 1

| Producto: | | | | | | |
|-------------------|------------------|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------|
| Nombre: | Masa por unidad: | Impacto medioambiental por producto: | Costo actual por producto: | Comportamiento del costo: | Variación mensual del costo: | Rendimiento |
| | [kg/unidad] | [g CO2eq /unidad] | [US\$/unidad] | | | |
| Materiales celdas | 0,08200 | 0,00000 | 7,34 | Constante | 0,00% | 100,00% |
| Materiales packs | 47,00000 | 0,00000 | 3.117,70 | Constante | 0,00% | 100,00% |

Ilustración 4: Características de proveedores en la Etapa 1

| Productor: | | | | | | |
|------------|------------|--|---------------|------------------------|--------------|---------------------------------------|
| Nombre: | Ubicación: | Inversión y gastos fijos actualizados: | Vida Útil: | Factor de mensualidad: | Mensualidad: | Impacto medioambiental de instalación |
| | | [US\$] | [meses] (>=1) | | [US\$] | [g CO2eq] |
| Varios | Varios | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Varios | Varios | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |

Ilustración 5: Características de los productos y actividades en etapas siguientes, para los productos de la etapa 1

| Utilización: | | | | |
|-----------------------------|---------------------------------|---------|--------------------|--|
| Producto: | Actividad: | Etapas: | Cantidad necesaria | |
| | | | [unidades/unidad] | |
| Materiales adaptados celdas | Adaptación de materiales celdas | 2 | 1 | |
| Materiales adaptados packs | Adaptación de materiales packs | 2 | 1 | |

Ilustración 6: Costos estimados de la obtención de materias primas

| Variaciones del precio: | | | | | | |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| mes 0: | mes 12: | mes 24: | mes 36: | mes 48: | mes 60: | mes 72: |
| | | | | | | |
| 7,34 | 7,34 | 7,34 | 7,34 | 7,34 | 7,34 | 7,34 |
| 3117,7 | 3117,7 | 3117,7 | 3117,7 | 3117,7 | 3117,7 | 3117,7 |

Hoja 3: Etapa 2, Adaptación de materias primas

Al igual que el caso anterior, se considera que se trabaja a nivel de celda y *pack*. Se muestran sus características entre la Ilustración 7 y la Ilustración 11.

Ilustración 7: Actividades de la adaptación de materias primas y su realización

| Realización: | Actividad: |
|--------------|---------------------------------|
| TRUE | Adaptación de materiales celdas |
| TRUE | Adaptación de materiales packs |

Ilustración 8: No se consideran costos por productos en la adaptación de materias primas

| Producto: | | | | | | |
|-----------------------------|------------------|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------|
| Nombre: | Masa por unidad: | Impacto medioambiental por producto: | Costo actual por producto: | Comportamiento del costo: | Variación mensual del costo: | Rendimiento |
| | [kg/unidad] | [g CO2eq /unidad] | [US\$/unidad] | | | |
| Materiales adaptados celdas | 0,08200 | 0,00000 | 0 | Constante | 0,00% | 100,00% |
| Materiales adaptados packs | 47,00000 | 0,00000 | 0 | Constante | 0,00% | 100,00% |

Ilustración 9: No se consideran costos de inversión ni fijos

| Productor: | | | | | | |
|------------|-------------|--|---------------|------------------------|--------------|---------------------------------------|
| Nombre: | Ubicación: | Inversión y gastos fijos actualizados: | Vida Útil: | Factor de mensualidad: | Mensualidad: | Impacto medioambiental de instalación |
| | | [US\$] | [meses] (>=1) | | [US\$] | [g CO2eq] |
| Propio | Antofagasta | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Propio | Antofagasta | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |

Ilustración 10: Las actividades siguientes a la adaptación de materias primas, corresponden a la producción de celdas y packs

| Utilización: | | | |
|--------------|-------------------|---------|--------------------|
| Producto: | Actividad: | Etapas: | Cantidad necesaria |
| | | | [unidades/unidad] |
| Celdas | Producción Celdas | 3 | 1 |
| Packs | Producción packs | 4 | 1 |

Ilustración 11: Se considera que, tampoco hay un incremento de los costos

| Variaciones del precio: | | | | | | |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| mes 0: | mes 12: | mes 24: | mes 36: | mes 48: | mes 60: | mes 72: |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Hoja 4: Etapa 3, Producción de celdas

Esta etapa se caracteriza entre la Ilustración 12 y la Ilustración 16.

Ilustración 12: La única actividad considerada en esta etapa es la producción de celdas

| Realización: | Actividad: |
|--------------|-------------------|
| TRUE | Producción Celdas |

Ilustración 13: El costo de fabricar una celda en se considera US\$0,2313 y tiene un rendimiento del 60%

| Producto: | | | | | | |
|-----------|------------------|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------|
| Nombre: | Masa por unidad: | Impacto medioambiental por producto: | Costo actual por producto: | Comportamiento del costo: | Variación mensual del costo: | Rendimiento |
| | [kg/unidad] | [g CO2eq /unidad] | [US\$/unidad] | | | |
| Celdas | 0,08200 | 0,00000 | 0,2313 | Constante | 0,00% | 60,00% |

Ilustración 14: No se considera que existan costos fijos ni de inversión, en la producción de celdas,

| Productor: | | | | | | |
|------------|-------------|--|---------------|------------------------|--------------|---------------------------------------|
| Nombre: | Ubicación: | Inversión y gastos fijos actualizados: | Vida Útil: | Factor de mensualidad: | Mensualidad: | Impacto medioambiental de instalación |
| | | [US\$] | [meses] (>=1) | | [US\$] | [g CO2eq] |
| Propio | Antofagasta | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |

Ilustración 15: La única actividad siguiente considerada a la producción de celdas es la producción de *packs*, la cual requiere 1442 celdas por *pack*

| Utilización: | | | |
|--------------|------------------|---------|--------------------|
| Producto: | Actividad: | Etapas: | Cantidad necesaria |
| | | | [unidades/unidad] |
| Packs | Producción packs | 4 | 1442 |

Ilustración 16: No se consideran variaciones del costo de fabricar celdas

| Variaciones del precio: | | | | | | |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| mes 0: | mes 12: | mes 24: | mes 36: | mes 48: | mes 60: | mes 72: |
| 0,2313 | 0,2313 | 0,2313 | 0,2313 | 0,2313 | 0,2313 | 0,2313 |

Hoja 5: Etapa 4, Producción de *packs*

Del mismo modo que la etapa anterior, se caracteriza entre la Ilustración 17 y la Ilustración 21.

Ilustración 17: En esta etapa se considera que sólo se producen *packs*

| Realización: | Actividad: |
|--------------|------------------|
| TRUE | Producción packs |

Ilustración 18: El costo de producción de un pack es considerado de US\$ 204,81 y su masa estimada de 165,24 kg

| Producto: | | | | | | |
|-----------|------------------|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------|
| Nombre: | Masa por unidad: | Impacto medioambiental por producto: | Costo actual por producto: | Comportamiento del costo: | Variación mensual del costo: | Rendimiento |
| | [kg/unidad] | [g CO2eq /unidad] | [US\$/unidad] | | | |
| Packs | 165,24 | 0,00000 | 204,81 | Constante | 0,00% | 100,00% |

Ilustración 19: No se consideran costos fijos ni de inversión, por consiguiente su vida útil es irrelevante

| Productor: | | | | | | |
|------------|-------------|--|---------------|------------------------|--------------|---------------------------------------|
| Nombre: | Ubicación: | Inversión y gastos fijos actualizados: | Vida Útil: | Factor de mensualidad: | Mensualidad: | Impacto medioambiental de instalación |
| | | [US\$] | [meses] (>=1) | | [US\$] | [g CO2eq] |
| Propio | Antofagasta | 0 | 30 | 0,037313772 | 0 | 0 |

Ilustración 20: Se considera que los *packs* sólo son vendidos, por lo que la siguiente etapa que los utiliza es la comercialización.

| Utilización: | | | |
|---------------------|------------------------|---------|--------------------|
| Producto: | Actividad: | Etapas: | Cantidad necesaria |
| | | | [unidades/unidad] |
| Pack comercializado | Comercialización packs | 6 | 1 |

Ilustración 21: Tampoco se considera variaciones en los costos de fabricar *packs*

| Variaciones del precio: | | | | | | |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| mes 0: | mes 12: | mes 24: | mes 36: | mes 48: | mes 60: | mes 72: |
| 204,81 | 204,81 | 204,81 | 204,81 | 204,81 | 204,81 | 204,81 |

Hoja 6: Etapa 5, Producción de vehículo

Para efectos prácticos en la verificación, se considerará que no se venden ni vehículos, ni celdas, sino que exclusivamente *packs* de baterías. Luego no es necesario producir vehículos. Se niega la realización de una actividad en el modelo, como se muestra en la Ilustración 22.

Ilustración 22: La actividad mostrada en esta etapa no se realiza

| Realización: | Actividad: |
|--------------|---------------|
| FALSE | Producción EV |

El resto de la información incorporada en esta hoja, es irrelevante, pues no se considera dado que esta actividad se supone no realizada

Hoja 7: Etapa 6, Costos de comercialización

Entre la Ilustración 23 y la Ilustración 26, se caracteriza los costos de comercialización, del mismo modo que las etapas anteriores.

Ilustración 23: La única actividad en esta etapa es la comercialización de *packs*

| Realización: | Actividad: |
|--------------|------------------------|
| TRUE | Comercialización packs |

Ilustración 24: El costo que se tiene por comercializar cada pack vendido, es de US\$4.146,59, correspondiente al costo de “otros” y no considera variaciones

| Producto: | | | | |
|---------------------|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Nombre: | Impacto medioambiental por producto: | Costo actual por producto: | Comportamiento del costo: | Variación mensual del costo: |
| | [g CO ₂ eq /unidad] | [US\$/unidad] | | |
| Pack comercializado | 0,00000 | 4.146,59 | Constante | 0,00% |

Ilustración 25: No se consideran gastos de inversión en clientes, sin embargo se define su ubicación en los Estados Unidos de América

| Cliente: | | | | | | |
|----------|------------|--|------------------------|------------------------|--------------|---------------------------------------|
| Nombre: | Ubicación: | Inversión y gastos fijos actualizados: | Duración de inversión: | Factor de mensualidad: | Mensualidad: | Impacto medioambiental de instalación |
| | | [US\$] | [meses] (>=1) | | [US\$] | [g CO ₂ eq] |
| Cliente1 | U.S.A. | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |

Ilustración 26: No se consideran variaciones de los costos de comercialización

| Variaciones del precio: | | | | | | |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| mes 0: | mes 12: | mes 24: | mes 36: | mes 48: | mes 60: | mes 72: |
| | | | | | | |
| 4146,59 | 4146,59 | 4146,59 | 4146,59 | 4146,59 | 4146,59 | 4146,59 |

Hoja 7: Etapa 6, Ingresos de comercialización

Entre la Ilustración 27 y la Ilustración 28, se caracteriza los ingresos de comercialización.

Ilustración 27: La única actividad en esta etapa es la comercialización de packs, se considera que el valor de venta del pack es de US\$33.432,72 para la verificación

| Producto: | | | |
|---------------------|---|----------------------------|-------------------------------|
| Nombre | Precio actual por producto [US\$/unidad]: | Comportamiento del precio: | Variación del precio mensual: |
| Pack comercializado | 33.432,72 | Constante | 0,00% |

Ilustración 28: Se supone que el precio de venta no varía

| Variaciones del precio: | | | | | | |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| mes 0: | mes 12: | mes 24: | mes 36: | mes 48: | mes 60: | mes 72: |
| | | | | | | |
| 33433 | 33432,72 | 33432,72 | 33432,72 | 33432,72 | 33432,72 | 33432,72 |

Hoja 9: Cantidades requeridas

La demanda de baterías, se considera como un 1% de la estimada para vehículos eléctricos o híbridos en mostrada en la Sección 2.7.I, para el intervalo 2010 – 2015, suponiendo que se comporta de forma uniforme en el año.

Las demandas mensuales calculan como, un doceavo del 1% de las demandas de vehículos eléctricos o híbridos entre los años mencionados. Lo anterior genera la Tabla 15.

Tabla 15: Demanda que se desea satisfacer mensualmente

| Año | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Demanda que se desea satisfacer | 605 | 841 | 1112 | 1355 | 1553 | 1783 |

A continuación, se muestra ilustraciones de la Hoja 9, la cual contiene las cantidades de productos necesarias para la línea de producción de las baterías de ión de litio. Además, se muestran las cantidades demandadas de distintos productos mes a mes para la comercialización y las cantidades de los distintos elementos necesarias para satisfacerla.

Ilustración 29: Muestra los productos cuya demanda debe ser definida, en este caso corresponden sólo a packs de baterías

| Demanda a satisfacer | | | | | | | | | | |
|----------------------|------------------------|---------|----------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Producto: | Actividad: | Etapas: | Cliente: | mes 0: | mes 1: | mes 13: | mes 25: | mes 37: | mes 49: | mes 61: |
| Pack comercializado | Comercialización packs | 6 | Cliente1 | 0 | 605 | 841 | 1112 | 1355 | 1553 | 1783 |

Ilustración 30: Muestra las etapas, actividades, productos, los rendimientos y cantidades requeridas

| Cantidades requeridas | | | | | | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------------------|--------------|
| Producto: | Actividad productora: | Etapas productoras: | Producto que lo requiere: | Actividad que requiere: | Etapas que requiere: | Cantidad requerida por producto: | Rendimiento: |
| | | | | | | [unidades/unidad] | [%] |
| Packs | Producción packs | 4 | Pack comercializado | Comercialización packs | 6 | 1 | 100,00% |
| Celdas | Producción Celdas | 3 | Packs | Producción packs | 4 | 1442 | 60,00% |
| Materiales adaptados celdas | Adaptación de materiales celdas | 2 | Celdas | Producción Celdas | 3 | 1 | 100,00% |
| Materiales adaptados packs | Adaptación de materiales packs | 2 | Packs | Producción packs | 4 | 1 | 100,00% |
| Materiales celdas | Obtención de materiales para la celda | 1 | Materiales adaptados celdas | Adaptación de materiales celdas | 2 | 1 | 100,00% |
| Materiales packs | Obtención de materiales para el pack | 1 | Materiales adaptados packs | Adaptación de materiales packs | 2 | 1 | 100,00% |

Antes del ingreso de las cantidades de productos vendidos, se utiliza la macro “demanda” que genera los campos que se deben llenar (Ilustración 29) y para obtener las cantidades requeridas de los distintos elementos, se ejecuta la macro “cantidades” (la Ilustración 30 muestra las áreas que producen y requieren productos; la Ilustración 31 muestra las cantidades de productos requeridas).

Ilustración 31: Cantidades requeridas mes a mes

| mes 0: | mes 1: | mes 13: | mes 25: | mes 37: | mes 49: | mes 61: |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0 | 605 | 841 | 1112 | 1355 | 1553 | 1783 |
| 0 | 1454017 | 2021203 | 2672507 | 3256517 | 3732377 | 4285143 |
| 0 | 1454017 | 2021203 | 2672507 | 3256517 | 3732377 | 4285143 |
| 0 | 605 | 841 | 1112 | 1355 | 1553 | 1783 |
| 0 | 1454017 | 2021203 | 2672507 | 3256517 | 3732377 | 4285143 |
| 0 | 605 | 841 | 1112 | 1355 | 1553 | 1783 |

Las cantidades que se requieren de productos elaborados, en las distintas etapas se definen como una multiplicación de las cantidades que se utilizan por producto que las requiere, por la cantidad de producto que los requiere, dividido por el rendimiento de la actividad que los produce. Se observa que las cantidades coinciden con esta descripción.

Hoja 10: Transporte

Dado que el costo de transporte, ha sido considerado previamente dentro de los costos de comercialización para la verificación del modelo, la referencia utilizada para estos costos los consideraba dentro de “Otros”. No se consideran costos de transporte durante la verificación ya que están en la comercialización.

Ahora bien, si se desea considerar el impacto medioambiental del transporte.

Considerando que se transportan a los Estados Unidos los *packs* de baterías, éstos recorren una distancia de 5.410 [millas náuticas] o 9.260[km] (1 milla náutica =1,852 km) entre el puerto de Antofagasta y el puerto de Long Beach en U.S.A. [18].

Se eligió el puerto de Antofagasta por su cercanía con el salar de atacama y ya que la ciudad de Antofagasta puede ser considerada para realizar la producción de baterías.

El puerto de “Long Beach” en el estado de California es escogido como receptor de las baterías, pues se considera que U.S.A. es el receptor de la producción de baterías en la verificación del modelo y este es el puerto de mayores importaciones en U.S.A. en el océano pacifico de este país.

Los las emisiones de dióxido de carbono, de los medios de transportes considerados son de 0,04[g O₂/kg/km] para barcos y para camiones son de 0,15 [gCO₂/kg/km]. (Se consideraron las peores estimaciones expuestas en la Sección 2.5, obtenidas en [11], para los respectivos medios de transportes).

Durante la verificación, no se considera la existencia de diferentes referencias para los distintos materiales, con diferentes distancias desde sus puntos de extracción, sin embargo, se espera que este punto realmente muestre relevancia al llevar el análisis a un caso real.

También en esta hoja se muestran variaciones mensuales del precio del transporte, pero en este caso su valor se considera constante e igual a cero para todos los meses (es decir no se considera el costo del transporte) y no se considera relevante el mostrarlo en una ilustración.

Ilustración 32: Este set de datos indica las características de productos que son parte de la cadena productiva, estas características están contenidas en las 6 etapas y son útiles identificar y caracterizar el transporte de productos entre las actividades

| Producto: | Masa por unidad [kg]: | Etapas de origen: | Actividad de origen: | Lugar de origen: | Etapas que requiere: | Actividad que requiere: | Lugar de Llegada: | Producto que lo requiere: |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------------------|------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------------|
| Packs | 165,24 | 4 | Producción packs | Antofagasta | 6 | Comercialización packs | U.S.A. | Pack comercializado |
| Celdas | 0,082 | 3 | Producción Celdas | Antofagasta | 4 | Producción packs | Antofagasta | Packs |
| Materiales adaptados celdas | 0,082 | 2 | Adaptación de materiales celdas | Antofagasta | 3 | Producción Celdas | Antofagasta | Celdas |
| Materiales adaptados packs | 47 | 2 | Adaptación de materiales packs | Antofagasta | 4 | Producción packs | Antofagasta | Packs |
| Materiales celdas | 0,082 | 1 | Obtención de materiales para la celda | Varios | 2 | Adaptación de materiales celdas | Antofagasta | Materiales adaptados celdas |
| Materiales packs | 47 | 1 | Obtención de materiales para el pack | Varios | 2 | Adaptación de materiales packs | Antofagasta | Materiales adaptados packs |

Ilustración 33: La distancia recorrida, el precio (por km y kg), el impacto medioambiental (por km y kg), el comportamiento del precio del transporte y la variación mensual del precio de transporte, son entradas al modelo, describen los costos e impactos medioambientales, de los medios de transporte, para los productos entre las actividades. Los parámetros por unidad: el precio y el impacto medioambiental, por producto transportado; son salidas del modelo.

| Producto: | Medio de transporte: | Distancia a recorrer [km] | Precio del transporte, según masa y distancia a recorrer [US\$/kg/km] | Impacto medioambiental, según masa y distancia a recorrer [g CO2 /kg/km] | Costo actual [US\$/unidad]: | Impacto medioambiental, según masa [gCO2 /unidad] | Comportamiento del precio: | variación del precio mensual: |
|-----------------------------|----------------------|---------------------------|---|--|-----------------------------|---|----------------------------|-------------------------------|
| Packs | Barcos | 9260,0 | 0 | 0,040 | 0 | 61204,896 | Constante | 0 |
| Celdas | Inexistente | 0,0 | 0 | 0,000 | 0 | 0 | Constante | 0 |
| Materiales adaptados celdas | Inexistente | 0,0 | 0 | 0,000 | 0 | 0 | Constante | 0 |
| Materiales adaptados packs | Inexistente | 0,0 | 0 | 0,000 | 0 | 0 | Constante | 0 |
| Materiales celdas | Camiones | 0,0 | 0 | 0,150 | 0 | 0 | Constante | 0 |
| Materiales packs | Camiones | 0,0 | 0 | 0,150 | 0 | 0 | Constante | 0 |

Como se puede observar entre las ilustraciones anteriores, se considera el impacto medioambiental del transporte desde el puerto de Antofagasta hasta el puerto de Long Beach, el cual coincide con la multiplicación de la masa de los packs, por la distancia recorrida por las emisiones por kilómetro y kilogramo, transportado.

Antes de llenar las entradas, se debe ejecutar la macro “información_transporte”, la cual llena los datos de la Ilustración 32, luego se debe llenar las entradas y ejecuta la macro “precios_transporte” para obtener los valores por unidad, su evolución y el impacto medioambiental por unidad.

Como se puede apreciar en la Ilustración 33, la información ingresada al modelo en esta hoja es:

- La distancia entre los puertos de Antofagasta y Long Beach, puertos que conectan la actividad realizada en la etapa 4 y la 6.
- Que no existe transporte entre las etapas 1, 2, 3 y 4, ya que todas se consideran en Antofagasta.
- Los costos e impactos medioambientales de transporte de acuerdo a la masa del producto y la distancia recorrida.

Hoja 11: Costos

En esta hoja, se tienen como salidas los costos resultantes mes a mes de cada actividad y el transporte a la actividad siguiente, dada la demanda de diferentes productos, lo que se observa entre la Ilustración 34 y la Ilustración 35. Se comprueba, que estos valores corresponden dividiendo los costos con la demanda y obteniendo los costos de la realización de las distintas actividades. También se comprueba, que los valores actuales de las diferentes etapas, así como la suma de los valores de de las actividades mes a mes corresponden.

Los resultados de esta hoja, se obtienen al ejecutar la macro “Costos”.

Hoja 12: Ingresos

En esta hoja, lo primero que se debe realizar es la ejecución de la macro “retrasos_en_pagos”, esta genera una lista con los productos que se venden en las actividades realizadas en la etapa de comercialización y prepara las casillas para ingresar el retardo en los pagos correspondiente a cada mes para sus ventas.

Durante la verificación, se toma un retardo de un mes para los pagos en todos los meses que dura el proyecto.

Luego de llenar estos datos, se ejecuta la macro “ingresos”, la cual calcula los ingresos actualizados a cada mes de compra para las actividades en la etapa de comercialización, los ingresos totales mes a mes y el valor actual para cada actividad en la comercialización de su serie de pagos.

Se comprueba que los resultados de los ingresos son correctos, actualizando los valores al momento de venta (multiplicando por: $1 + \text{tasa de descuento mensual}$) y dividiéndolos por la cantidad vendida cada mes, lo que genera los precios de venta como se espera.

Las entradas en esta etapa, se muestran mes a mes en la Ilustración 36 y las salidas en la Ilustración 37.

Otra comprobación realizada es al valor actual, mediante Excel se calcula el valor actual de la serie de pagos, el cual coincide con el entregado por la macro.

Ilustración 34: Se muestran las relaciones de origen y destino de los distintos productos, para identificarlos

| Producto: | Actividad productora: | Etapas productora: | Producto que lo requiere: | Actividad que requiere: | Etapas que requiere: |
|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Pack comercializado | Comercialización packs | 6 | | | |
| Packs | Producción packs | 4 | Pack comercializado | Comercialización packs | 6 |
| Celdas | Producción Celdas | 3 | Packs | Producción packs | 4 |
| Materiales adaptados celdas | Adaptación de materiales celdas | 2 | Celdas | Producción Celdas | 3 |
| Materiales adaptados packs | Adaptación de materiales packs | 2 | Packs | Producción packs | 4 |
| Materiales celdas | Obtención de materiales para la celda | 1 | Materiales adaptados celdas | Adaptación de materiales celdas | 2 |
| Materiales packs | Obtención de materiales para el pack | 1 | Materiales adaptados packs | Adaptación de materiales packs | 2 |

Ilustración 35: Costos mes a mes de los distintos productos y actividades, más sus valores actuales.

| Producto: | Valores actuales: [US\$] | Costos: | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | mes 0: | mes 1: | mes 13: | mes 25: | mes 37: | mes 49: | mes 61: |
| Pack comercializado | 258792498,9 | 0 | 2508686,95 | 3487282,19 | 4611008,08 | 5618629,45 | 6439654,27 | 7393369,97 |
| Packs | 12782380,63 | 0 | 123910,05 | 172245,21 | 227748,72 | 277517,55 | 318069,93 | 365176,23 |
| Celdas | 34693670,54 | 0 | 336314,1321 | 467504,2539 | 618150,8691 | 753232,3821 | 863298,8001 | 991153,5759 |
| Materiales adaptados celdas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Materiales adaptados packs | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Materiales celdas | 1100957811 | 0 | 10672484,78 | 14835630,02 | 19616201,38 | 23902834,78 | 27395647,18 | 31452949,62 |
| Materiales packs | 194578526,9 | 0 | 1886208,5 | 2621985,7 | 3466882,4 | 4224483,5 | 4841788,1 | 5558859,1 |
| | Totales: | 0 | 15527604,41 | 21584647,37 | 28539991,45 | 34776697,66 | 39858458,28 | 45761508,5 |

Ilustración 36: En esta ilustración de la hoja 12, se muestra el producto comercializado y los retrasos esperados en sus pagos.

| | | | Retrasos [meses]: | | | | | | |
|---------------------|------------------------|----------|-------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Producto: | Actividad productora: | Cliente: | mes 0: | mes 1: | mes 13: | mes 25: | mes 37: | mes 49: | mes 61: |
| Pack comercializado | Comercialización packs | Cliente1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Ilustración 37: En la hoja 12 también se muestran los ingresos actualizados mes a mes de la comercialización (considerando los retrasos mostrados en la Ilustración 36)

| | | | Valores actuales: | Ingresos: | | | | | | |
|---------------------|------------------------|----------|-------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Producto: | Actividad productora: | Cliente: | [US\$] | mes 0: | mes 1: | mes 13: | mes 25: | mes 37: | mes 49: | mes 61: |
| Pack comercializado | Comercialización packs | Cliente1 | 2070059882 | 0 | 20066780 | 27894483 | 36883074 | 44942954 | 51510264 | 59138957 |
| | | | Totales: | 0 | 20066780 | 27894483 | 36883074 | 44942954 | 51510264 | 59138957 |

Hoja 13: Impacto medioambiental

Los resultados en esta hoja se observan al ejecutar la macro “*impacto_medioambiental*”.

Las salidas en esta hoja son los impactos medioambientales, medidos en masa de CO_2 emitidos de cada actividad: mes a mes y totales hasta el horizonte de evaluación del proyecto, más su suma. Se muestran en la Ilustración 38.

Sin embargo, el único impacto medioambiental considerado, en la verificación, es el correspondiente al transporte de los *packs*. Para comprobar que los resultados fuesen correctos se dividió el impacto medioambiental mes a mes entre las actividades producción y comercialización de *packs*, por la cantidad de *packs* comercializados, lo que coincidió como es de esperarse con el impacto medioambiental de transportar cada *pack*. También se comprobó que la suma de los impactos mes a mes de la actividad corresponde con el impacto de la actividad y que esto es igual al total.

Hoja 14: Flujo de caja

En esta hoja, se tienen las siguientes entradas:

El porcentaje de impuestos que paga la compañía, se considera un 19%

Las características de un crédito, que durante la verificación se considera inexistente, pero las entradas que presenta son la cantidad de dinero financiada, su interés anual y su número de cuotas

Al ejecutar la macro “*flujo_caja*”, se comprueba que la tasa mensual coincide con la esperada $t_m = (1 + t_a)^{\frac{1}{12}} - 1$, además se ignora el efecto del crédito pues no se considera en la verificación.

Se observa, que los valores de ingresos y costos coinciden con los expuestos en las hojas de dichos nombres, lo cual es esperado. La utilidad antes de impuestos, coincide con los ingresos menos los costos (no hay crédito), los impuestos se calculan sobre las utilidades antes de impuestos. Al descontar los impuestos a las utilidades antes de impuestos se obtienen las utilidades después de impuestos. Los flujos de caja, se consideran como las utilidades después de impuestos. A los flujos de caja de cada mes, se les calcula el valor actual para luego determinar el VAN del proyecto.

Las entradas en esta hoja se muestran en la Ilustración 39, las cuales son el valor del financiamiento bancario, su interés anual, su número de cuotas y los impuestos, se deben llenar antes de ejecutar la macro “*flujo_caja*”. Los resultados del flujo de caja son los que se muestran en la Ilustración 40 y las variables no mencionadas de la Ilustración 39.

Ilustración 38: Se puede observar que sólo se tiene el impacto medioambiental entre las actividades de producción y comercialización de *packs*, este se debe al transporte pues sólo en este punto se considero las emisiones de gases de efecto invernadero

| Impacto medioambiental resultante: | Impacto medioambiental resultante: | Impactos: | | | | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Producto: | [g CO2] | mes 0: | mes 1: | mes 13: | mes 25: | mes 37: | mes 49: | mes 61: |
| Pack comercializado | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Packs | 5324091493 | 0 | 37028962 | 51473318 | 68059844 | 82932634 | 95051203 | 109128330 |
| Celdas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Materiales adaptados celdas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Materiales adaptados packs | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Materiales celdas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Materiales packs | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total: | 5324091493 | | | | | | | |

En la hoja 13, también se muestran las relaciones expuestas en la Ilustración 34, pero no se expone en las características de esta hoja, por considerarse redundante.

Ilustración 39: Muestra los impuestos pagados y las características del crédito, en este caso se considera que no se pide crédito y que se debe pagar un 19% de impuestos.

| | | |
|---------------------------|-------|--------|
| Financiamiento bancario: | \$ - | [US\$] |
| Tasa de Interés anual: | 12% | |
| Tasa de interés mensual: | 0,95% | |
| n° de cuotas (mensuales): | 30 | |
| Valor de cada cuota: | \$ - | [US\$] |
| Impuestos: | 19% | |

Ilustración 40: Muestra los valores actuales de cada flujo y VAN del proyecto considerado

| Mes | mes 0: | mes 1: | mes 13: | mes 25: | mes 37: | mes 49: | mes 61: |
|---------------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Ingresos por ventas [US\$]: | 0 | 20066780 | 27894483 | 36883074 | 44942954 | 51510264 | 59138957 |
| Costos [US\$]: | 0 | 15527604 | 21584647 | 28539991 | 34776698 | 39858458 | 45761508 |
| Gasto Financiero (intereses) [US\$]: | | 0 | 0 | 0 | | | |
| Utilidad antes de impuestos [US\$]: | 0 | 4539176 | 6309836 | 8343082 | 10166257 | 11651806 | 13377449 |
| Impuestos [US\$]: | 0 | 862443 | 1198869 | 1585186 | 1931589 | 2213843 | 2541715 |
| Utilidad después de impuestos [US\$]: | 0 | 3676732 | 5110967 | 6757897 | 8234668 | 9437963 | 10835734 |
| Préstamo [US\$]: | 0 | | | | | | |
| Amortizaciones [US\$]: | | 0 | 0 | 0 | | | |
| Flujos de caja: | 0 | 3676732 | 5110967 | 6757897 | 8234668 | 9437963 | 10835734 |
| Valores actuales [US\$]: | 0 | 3647646 | 4609576 | 5540855 | 6137883 | 6395259 | 6674911 |
| VAN [US\$]: | 379286545 | | | | | | |

No se considera que estos valores representen necesariamente la realidad, pero los resultados del modelo son consistentes con la información entregada.

Capítulo 4: Estudio del proceso de fabricación de baterías de litio-ión en Chile

4.1. Características constructivas del caso en que se basa el estudio:

Los casos estudiados, no consideran la producción de vehículos ni la comercialización de celdas por falta de información, aunque el modelo podría representarlos. El impacto medioambiental que se considera, es sólo el del transporte de las materias primas y las baterías terminadas, no se considera el de las distintas actividades involucradas, aunque el modelo podría considerar la huella de carbono de actividades y su instalación, si se dispusiera de la información adecuada.

En la Sección 2.7.II, se describe el caso presente en el documentó: “*Factors Determining the Manufacturing Costs of Lithium - ion Batteries for PHEVs*” [3]. En él se encuentran información y estimaciones útiles, para evaluar el caso de fabricar baterías para PHEV.

A continuación, se muestran las características del sistema que se desea modelar.

I. Características de las baterías y su planta productora

En esta sección, se expone la información extraída desde [3] y otras referencias, para el caso que se estudia y las estimaciones hechas, que describen el sistema que se está modelando. Los parámetros de los *packs* con que se trabaja se muestran en la Tabla 16 y las características de la planta en la Tabla 17.

Tabla 16: Parámetros del *pack* de baterías [3]

| | | |
|-----------------------------|-------|-------|
| Energía almacenada: | 10,2 | [kWh] |
| Potencia: | 50 | [kW] |
| Capacidad: | 50 | [Ah] |
| Número de celdas: | 96 | |
| Masa: | 82 | [kg] |
| Volumen: | 52 | [L] |
| Rango esperado de vehículo: | 32,99 | [km] |

Tabla 17: Rendimientos y capacidades productivas de la planta (anuales) [3]

| | | |
|---|------------|-------------------|
| Packs producidos: | 100.000 | |
| Rendimiento de la producción de celdas: | 97 | [%] |
| Rendimiento de los materiales excepto por el electrolito: | 95 | [%] |
| Rendimiento del electrolito: | 90 | [%] |
| Número de celdas necesarias para ajustar el rendimiento: | 9.896.907 | |
| Área de los electrodos: | 10.114.827 | [m ²] |
| Masa del material activo del electrodo positivo: | 2.083.559 | [kg] |
| Masa del material activo del electrodo negativo: | 1.387.543 | [kg] |

Considerando las masas de los materiales activos de los electrodos y el área de los electrodos, dividiendo estos parámetros por el número de celdas fabricadas y multiplicándolos por el rendimiento de fabricarlas los materiales correspondientes, se calcula la cantidad de material activo de los electrodos y área de éstos por celda, mostrados en la tabla siguiente:

Tabla 18: Área y masa de electrodos por celda

| | | |
|--|---------|-------------------|
| Área de electrodos: | 0,97092 | [m ²] |
| Masa de material activo cátodo (NCA): | 200,0 | [g] |
| Masa de material activo ánodo (Grafito): | 133,2 | [g] |

Se puede observar, que las láminas de aluminio y cobre utilizadas para el cátodo y el ánodo, tienen grosores mostrados en la Tabla 19.

Tabla 19: Grosos de láminas de aluminio y cobre para los electrodos [3]

| | | |
|-------------------------------------|----|------|
| Grueso lámina aluminio para cátodo: | 20 | [μm] |
| Grueso lámina de cobre para ánodo: | 12 | [μm] |

Considerando las áreas de los electrodos y los grosores de las láminas, se puede calcular el volumen y luego la masa de cada lámina por celda, sabiendo las densidades del cobre y aluminio (en [19]). En la Tabla 20 se muestran las masas de los electrodos.

Tabla 20: Masa de láminas de aluminio y cobre para los electrodos, por celda

| | | |
|---|-------|-----|
| Masa lámina de aluminio para cátodo (densidad 2700 kg/m ³ [19]): | 52,4 | [g] |
| Masa lámina de cobre para ánodo (densidad 8960 kg/m ³ [19]): | 104,4 | [g] |

Se dispone de la densidad y el grueso del separador, lo que permite calcular su masa por celda, mostradas a continuación:

Tabla 21: Características de separador

| | | |
|-----------------|-------|----------------------|
| Grueso [3]: | 25 | [μm] |
| Densidad [3]: | 1,00 | [g/cm ³] |
| Masa por celda: | 24,27 | [g] |

Para calcular las cantidades de aglutinantes en los electrodos y carbón negro por celda, se utilizan los porcentajes de la masa de estos elementos en comparación a los de estos materiales añadidos a los electrodos, como se muestra a continuación:

Tabla 22: Masa de componentes de electrodos por celda, exceptuando láminas (porcentajes desde [3])

| | | | |
|-------------------------|-----|-------|-----|
| Material activo cátodo: | 84% | 200,0 | [g] |
| Aglutinante cátodo: | 8% | 19,0 | [g] |
| Carbón negro cátodo: | 8% | 19,0 | [g] |
| Material activo ánodo: | 92% | 133,2 | [g] |
| Aglutinante ánodo: | 8% | 11,6 | [g] |
| Carbón negro ánodo: | 0% | 0 | [g] |

Las fracciones mostradas en la tabla anterior, corresponden a las masas de las componentes de los electrodos, así como del separador. Estos elementos aportan con un volumen vacío, que será utilizado por el electrolito. Para calcular el volumen vacío, se consideran las densidades mostradas en la Tabla 23.

Tabla 23: Densidades de materiales activos, carbón negro, aglutinante y separador [3]

| | | |
|---------------------------------|-------|----------------------|
| Material activo cátodo: | 4,78 | [g/cm ³] |
| Carbón negro cátodo: | 1,825 | [g/cm ³] |
| Material activo ánodo: | 2,24 | [g/cm ³] |
| Carbón negro ánodo: | 1,95 | [g/cm ³] |
| Aglutinante (ambos electrodos): | 1,77 | [g/cm ³] |
| Separador: | 1 | [g/cm ³] |

Utilizando éstas densidades, se puede calcular el volumen utilizado por estos componentes dado que conocemos sus masas, se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24: Volumen de materiales activos, carbón negro, aglutinante y separador

| | | |
|---------------------------------|-------|--------------------|
| Volumen material activo cátodo: | 41,84 | [cm ³] |
| Volumen carbón negro cátodo: | 10,44 | [cm ³] |
| Aglutinante cátodo: | 10,76 | [cm ³] |
| Material activo ánodo: | 59,46 | [cm ³] |
| Aglutinante ánodo | 6,54 | [cm ³] |
| Separador: | 24,27 | [cm ³] |

Con lo anterior, se puede calcular el volumen vacío aportado por los materiales de ambos electrodos y el separador, dado que se conoce su porcentaje en [3]. El volumen aportado por los distintos elementos se muestra a continuación:

Tabla 25: Volumen vacío aportado por materiales de electrodos y separador [3]

| | | |
|--|-------|--------------------|
| Volumen aportado por cátodo (32% volumen vacío): | 20,17 | [cm ³] |
| Volumen aportado por ánodo (34% volumen vacío): | 22,44 | [cm ³] |
| Separador (40% volumen vacío): | 9,71 | [cm ³] |
| Total de volumen vacío: | 52,32 | [cm ³] |

En [6], se explicita que es conveniente que las baterías de litio-ion, tengan un volumen de electrolito de entre 1,25 y 1,65 veces el volumen vacío aportado por los electrodos y el separador. Como no se sabe cuál es la cantidad apropiada en nuestro caso, se utiliza el promedio, un

volumen de 1,45 veces el volumen vacío. El volumen de electrolito determinado se muestra en la Tabla 26.

Tabla 26: Volumen de electrolito en la celda

| | | |
|------------------------|--------|--------------------|
| Volumen de electrolito | 75,864 | [cm ³] |
|------------------------|--------|--------------------|

Considerando la densidad del electrolito aportada por [3], se puede calcular la masa de electrolito necesaria para llenar el volumen vacío en los electrodos y el separador de la celda. La masa de electrolito determinada se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27: Masa de electrolito

| | | |
|--|---------|-----|
| Masa de electrolito (1,2 [g/cm ³] [3]) | 91,0368 | [g] |
|--|---------|-----|

Los detalles que se tienen en la referencia [3], sobre la construcción de las celdas, no son suficientes para estimar todos los materiales utilizados en su construcción. Para complementar la masa de las componentes de una celda, se utiliza la distribución de materiales para celdas de alta densidad de energía (100 Ah), expuesta en la referencia [7]. En [7], también se poseen los datos para celdas de alta densidad de potencia (10Ah), pero sus características físicas son incompatibles con el caso analizado. Si se considera, que el porcentaje de la masa de los elementos ya determinados es el 89,57% de la masa de una celda típica de alta densidad de energía y el 64,64% de una celda típica de alta densidad de potencia, la masa de los elementos ya estudiados es de 655,0[g] y si se considerará celdas de alta densidad de potencia, se sobrepasan los 82 [kg] del pack.

No se poseen muchos detalles sobre los elementos restantes, son terminales, contenedor, tapa, ventilación, conexiones y otros. Para simplificar el problema, se los considera de aluminio (basados en que es un material típico para el contenedor) y se los agrupa en “contenedor, tapa y otros”. Estos elementos conforman un 10,4% de las masas de celdas de alta densidad de energía. Ahora la masa de los elementos vistos es de 655,0[g], si consideramos que los demás elementos de la celda son el 10,4% de su masa se puede calcular su masa con la siguiente ecuación:

Ec. 2: Masa de otros elementos a nivel de celda

$$m_{otros} = \frac{10,4\%}{89,6\%} * 655,0[g] = 76,29 [g]$$

Con esto la masa resultante de cada celda es de 731,27[g]. Luego, los elementos faltantes a nivel de pack, se calculan como 82 [kg]-96*0,73127[kg]=11,7977 [kg].

Con los cálculos finales, se construye la siguiente tabla en que se caracterizan las masas de las componentes en las baterías evaluadas.

Tabla 28: Masa de las componentes a nivel de celda y *pack* para baterías consideradas (de 82 [kg])

| Componente | Masa de materiales: [kg] |
|---|--------------------------|
| A nivel de celda: | |
| Material activo del cátodo | 0,2000 |
| Aglutinante cátodo (PVDF, Polifluoruro de vinilideno) | 0,0190 |
| Colector de corriente cátodo (Aluminio) | 0,0524 |
| Carbón (cátodo) | 0,0190 |
| Material activo del ánodo (grafito) | 0,1332 |
| Aglutinante ánodo (PVDF, Polifluoruro de vinilideno) | 0,0116 |
| Colector de corriente ánodo (Cobre) | 0,1044 |
| Separador | 0,0243 |
| Electrolito | 0,0910 |
| Contenedor, tapa y otros: | 0,0763 |
| Total por celda: | 0,7313 |
| A nivel de <i>pack</i> : | |
| 96 celdas: | 70,2023 |
| Otros elementos a nivel de <i>pack</i> : | 11,7977 |
| Total por <i>pack</i>: | 82,0000 |

II. Caracterización del transporte:

Para comparar el impacto medioambiental de producir baterías de ión de litio en Chile, con producirlas en otro país, se compara el impacto medioambiental de transportar las materias primas desde sus distintos orígenes hasta el puerto de Antofagasta y el transporte de las baterías desde este puerto al de Long Beach en los Estados Unidos. Se realiza el mismo procedimiento pero con la producción en China en lugar de Chile. No se dispone de la huella de carbono de realizar las actividades involucradas en la producción, por lo que ese punto no se considera.

En el transporte a Antofagasta, se consideran tanto los recorridos terrestres con emisiones de dióxido de carbono de 105 [gCO₂/km/ton], como marinos con una huella de 25 [gCO₂/km/ton], siendo éstos los promedios de los valores máximos y mínimos para estos tipos de transportes observados en la Sección 2.5. Si el transporte, considera recorridos terrestres en camiones y marítimos en barcos, se realiza una ponderación de las emisiones vistas, de acuerdo a la distancia recorrida en cada medio.

Las distancias terrestres recorridas, se han obtenido de “Google earth” y las recorridas entre puertos con el uso de la referencia [18].

Los costos del transporte, para el caso de fabricar las baterías en Chile, se obtuvieron mediante la búsqueda directa del valor del transporte de los productos de acuerdo a su volumen y masa en [20]. Esto no es posible, para importaciones de cobalto desde Cuba y transportes nacionales (de carbonato de litio, cobre y del separador), pues estos recorridos no se encuentran en la referencia.

Para el cobalto de origen cubano, se considero el valor por km por kg de transportarlo desde China (Jinchuan Nonferrous Metals Corp., Jinchang, Gansu), utilizando la misma referencia.

Para el carbonato de litio, se supone que se transporta desde el salar de atacama, pero su precio de transporte, por km por kg se calcula como si se importara desde el Salar del Hombre Muerto (Minera del Altiplano S.A., provincia de Salta, Argentina).

Para el cobre, se supone que se transporta desde la mina mantos blancos en Chile, pero para obtener el precio del transporte considera el precio de traerlo desde la mina “Bajo de La Alumbraera”, en el departamento del Belén, provincia de Catamarca, Argentina (Minera Alumbraera Ltd.).

Para el separador, se considera la obtención del separador desde la refinería Aconcagua, ubicada en Concón, se observa el costo del transporte por kg por km de la importación desde una refinería en la ciudad de Sergipe, en el estado de Aracaju, en Brasil (Petróleo Brasileiro S.A.).

Los lugares de origen de grafito, níquel, cobalto, aluminio y carbón negro, se encontraron en distintas publicaciones del Servicio Geológico de los Estados Unidos [21].

En la Tabla 29, se muestran características de los recorridos de las materias primas para la fabricación de las baterías. En la Tabla 30, se muestra la información para las baterías terminadas. En las tablas Tabla 31 y Tabla 32, se expone la misma información útil para el cálculo del impacto medioambiental del transporte, pero para la fabricación China, con el objetivo de permitir una comparación del impacto medioambiental del transporte.

Tabla 29: Transporte de materias primas a Antofagasta

| Producto: | Origen: | Puerto: | Distancia recorrida por tierra [km] | Distancia recorrida por mar [km] | Distancia recorrida total [km] | Impacto medioambiental por tonelada [gCO ₂ /ton] | Impacto medioambiental por tonelada por kilómetro [gCO ₂ /km/ton] | Precio del transporte: [US\$/kg/km] |
|---|--|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|--|-------------------------------------|
| Grafito, Nacional de Grafite Ltda. | Brasil: Itapeperica, Minas Gerais State, (mina), | N.A. | 4114 | 0 | 4114 | 431970 | 105 | 0,003875 |
| Li₂CO₃ SQM | Salar de atacama | N.A. | 282 | 0 | 282 | 29610 | 105 | 0,006842 |
| Ni, Companhia Niquel Tocantín | Brasil: Minera: Niquelândia, Goiás State, (planta) | N.A. | 4253 | 0 | 4253 | 446565 | 105 | 0,003748 |
| Co, Metals Enterprise S.A. | Cuba: Moa, Holguin Province (mina) | Puerto de moa | 5,5 | 6532 | 6537,5 | 163877,5 | 25,07 | 0,001299 |
| Al, Aluminio Argentino S.A.I.C. (fundición) | En argentina, Puerto Madryn, Chubut Province (fundición) | N.A. | 2600 | 0 | 2600 | 273000 | 105 | 0,002170 |
| Polifluoruro De Vinilideno, Zibo Yichi International Trading Co.,Ltd | Shandong, China | Qingdao, China | 0 | 31248,8 | 31248,8 | 781220 | 25 | 0,001408 |
| Cobre, Empresa Minera de Mantos Blancos | Mantos Blancos, SX-EW plant, Region II, Chile | N.A. | 42,4 | 0 | 42,4 | 4452 | 105 | 0,005049 |
| Electrolito Novolyte Technologies | Novolyte Technologies, Baton Rouge, Louisiana, U.S.A. | Nueva Orleans | 131,32 | 7.878,41 | 8009,73 | 210749 | 26,31 | 0,003036 |
| Carbón Negro, Productos Petroquímicos, S.A. (planta) | Calí, Valle del Cauca Departments, Colombia, planta | Buenaventura (Valle del Cauca) | 56 | 4104 | 4160 | 108480 | 26,08 | 0,002590 |
| Polietileno o polipropileno, Planta Refinadora de Petróleo Aconcagua | Planta Refinadora de Petróleo Aconcagua ubicada en la localidad de Concón (V Región) Enap Chile. | N.A. | 1285 | 0 | 1285 | 134925 | 105 | 0,002743 |

Tabla 30: Transporte de packs a Long Beach desde Antofagasta

| Producto: | Origen: | Destino: | Distancia recorrida por tierra [km] | Distancia recorrida por mar [km] | Distancia recorrida total [km] | Impacto medioambiental por tonelada [gCO ₂ /ton] | Impacto medioambiental por tonelada por kilómetro [gCO ₂ /km/ton] | Precio del transporte: [US\$/kg/km] |
|-----------------|-------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|--|-------------------------------------|
| Batería: | Antofagasta | Long Beach, california, USA | 0 | 10019,32 | 10019,32 | 250483 | 25 | 0,002291286 |

Para evaluar la producción en China, se decide utilizar como lugar de fabricación el puerto de ShenZhen, pues en este puerto, se observa el despacho de varias materias primas comerciadas por China.

Tabla 31: transporte de materias primas a ShenZhen

| Producto: | Origen: | Puerto: | Distancia recorrida por tierra [km] | Distancia recorrida por mar [km] | distancia recorrida total [km] | Impacto medioambiental por tonelada [gCO ₂ /ton] | Impacto medioambiental por tonelada por kilómetro [gCO ₂ /km/ton] |
|--|---|------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|--|
| Grafito, Linyi Gelon New Battery Materials Co., Ltd. | Shandong, China (Comercio, minas aun más lejos) | N.A. | 1889 | 0,00 | 1889,00 | 198345,00 | 105,00 |
| Li2CO3, SQM | Salar de atacama | Antofagasta | 282 | 29015,28 | 29297,28 | 754992,10 | 25,77 |
| Ni, Taiwan Nickel Refinery | Kaohsiung, taiwan (planta) | puerto de Kaohsiung | 15,8 | 803,77 | 819,57 | 21753,20 | 26,54 |
| Co, Jinchuan Nonferrous Metals Corp. | Jinchang, Gansu, China (planta, minas más lejanas) | N.A. | 2857 | 0,00 | 2857,00 | 299985,00 | 105,00 |
| Al, Jinchuan Nonferrous Metals Corp. | Pingguo, Guangxi, China (planta) | N.A. | 852 | 0,00 | 852,00 | 89460,00 | 105,00 |
| Polifluoruro de vinilideno, Zibo Yichi International Trading Co., Ltd. | Shandong China | N.A. | 1889 | 0,00 | 1889,00 | 198345,00 | 105,00 |
| Cobre, Empresa Minera de Mantos Blancos, | Mantos Blancos open pit mine, SX-EW plant, Region II, Chile | Antofagasta | 42,4 | 29015,28 | 29057,68 | 729834,10 | 25,12 |
| Electrolito, Beijing Chuangya Technology Co., Ltd. (CYT) | Beijing China | N.A. | 2287 | 0,00 | 2287,00 | 240135,00 | 105,00 |
| Carbón Negro, Xstrata plc. | Oeste de Mackay, Queensland (Mina) | Port of Hay Point, Australia | 298 | 7885,82 | 8183,82 | 228435,40 | 27,91 |
| Polietileno o polipropileno, Zibo Yichi International Trading Co., Ltd. | Anhui China (Mainland) | N.A. | 1263 | 0,00 | 1263,00 | 132615,00 | 105,00 |

Tabla 32: Transporte de materias primas a Long Beach desde ShenZhen

| Producto: | Origen: | Destino: | Distancia recorrida por tierra [km] | Distancia recorrida por mar [km] | Distancia recorrida total [km] | Impacto medioambiental por tonelada [gCO ₂ /ton] | Impacto medioambiental por tonelada por kilómetro [gCO ₂ /km/ton] |
|-----------------|-----------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|--|
| Batería: | ShenZhen, China | Long Beach, california, USA | 0 | 34126,804 | 34126,80 | 853170,10 | 25,00 |

III. Características económicas:

En [3] y en la Sección 2.7.II, se aprecian las características, los costos de inversión y los costos fijos para la planta productora de baterías, correspondientes a estimaciones de dichos parámetros. En base a ellos, se define el caso de estudio. Las cantidades de materiales por baterías se definen en la Sección 4.1.I.

Se supone, en la referencia que la planta es capaz de producir 100.000 baterías al año, con años de 300 días de operación continua. Los equipos se deprecian a 8 años y la planta a 20 años.

En base a que se tienen estimaciones de los precios de las baterías hasta el año 2020 (8 años desde el 2012). Se utiliza un horizonte de evaluación de 8 años para el proyecto, con 12 meses por año.

La planta de la referencia produce 100.000 bancos de baterías anuales, con años de 300 días, luego se considera que la planta modelada produce 10.000 *packs* mensuales, ya que se trabaja en meses.

Se utiliza tasa de descuento del 10% anual, designada por el DFL1 (Decreto Con Fuerza De Ley N° 1, Comisión Nacional De Energía, septiembre 1982), para el sector eléctrico en Chile [22].

Se consideran impuestos a las utilidades del 19% a lo largo de todo el proyecto, frente a la incertidumbre de posibles variaciones (actualmente son del 18,5%, era del 20% (2011) y del 17% (2004-2010). Se espera que bajen al 17% el 2013, según [23]).

i. Costos de inversión:

Los costos de edificios, terrenos y servicios públicos se reducen un 40% desde US\$43.000.000 a US\$25.800.000, para sensibilizarlos a Chile.

Ya que en la planta se consideran 20 años y en los equipos 8 años de operación continua en años de 300 días, es necesario calcular sus mensualidades, para conocer el valor correspondiente al tener una vida útil de 8 años, con 12 meses de trabajo al año, hasta el horizonte de evaluación.

Desarrolló:

Tasa mensual: 0,7974% (10% anual)

Utilizando la Ec. 11, en el Anexo EI, cada cuota es de:

$$C_{\text{planta}} = \text{US\$}25.800.000 * \frac{0,7974\%}{1 - \frac{1}{(1+0,7974\%)^{10*20}}} = \text{US\$} 258.533,39$$

$$C_{\text{equipos}} = \text{US\$}191.000.000 * \frac{0,7974\%}{1 - \frac{1}{(1+0,7974\%)^{10*8}}} = \text{US\$} 3.238.645,67$$

Considerando, que sólo nos interesa el valor actual de las 97 cuotas, para los 12 meses de los 8 primeros años más un mes (modelo comienza en el mes cero), hasta el horizonte de evaluación. Se busca el valor actual a partir de la Ec. 9 en el Anexo EI, pero utilizada de forma inversa:

$$VA_{\text{planta}} = \text{US\$} 258.533,39 * \left[1 + \frac{1}{0,7974\%} \left(1 - \frac{1}{(1+0,7974\%)^{96}} \right) \right] = \text{US\$}17.555.150,72$$

$$VA_{\text{equipos}} = \text{US\$ } 3.238.645,67 * \left[1 + \frac{1}{0,7974\%} \left(1 - \frac{1}{(1+0,7974\%)^6} \right) \right] = \text{US\$ } 219.913.230,03$$

Luego se tiene la Tabla 33, para los costos de inversión considerados.

Tabla 33: Costos de inversión

| | | |
|---|----------------|--------|
| Costos de equipamiento: | 219.913.230,03 | [US\$] |
| Edificios, terrenos y servicios públicos: | 17.555.150,72 | [US\$] |
| Costos de comenzar el funcionamiento: | 86.000.000 | [US\$] |
| Capital de trabajo: | 58.000.000 | [US\$] |
| Total: | 381.468.380,75 | [US\$] |

Los costos de comenzar el funcionamiento y del capital de trabajo, se consideran iguales que en la referencia [3], debido a que no se dispone información que permita modificarlos. El resto, se ajusto de acuerdo a la capacidad de la planta considerada. En el caso del costo de edificios, terrenos y servicios públicos, además se sensibilizo al su valor para Chile, lo cual no pudo hacerse con los otros casos, debido a que no se dispone de información que lo permita.

ii. Costos fijos:

En la Tabla 34, se muestran los costos fijos considerados para el proyecto.

Tabla 34: Costos fijos, por cada pack de capacidad del proyecto

| | | |
|--|-----|--------|
| Costos de ventas, patentes y administración: | 132 | [US\$] |
| Investigación y desarrollo: | 130 | [US\$] |
| Total considerados: | 262 | [US\$] |

La depreciación no se considerará como un gasto en el modelo implementado, debido a que no se considerará su beneficio contable, siendo una representación exigente en ese sentido.

iii. Ingresos:

Las utilidades, son una salida del modelo construido. Se utiliza un enfoque descendente para el cálculo del costo, el precio para los *packs* de baterías es una entrada dada por el mercado para el modelo. Mientras que para el documento [3], el costo es una salida, por lo que utilizan un enfoque ascendente para su cálculo.

Se consideran sólo por venta de *packs*, en la referencia [17], se encuentra el valor en la actualidad de las baterías de ión-litio, de aproximadamente 450 [US\$/kWh] (2012), con un comportamiento de decrecimiento anual compuesto, de tasa aproximada del 7,5%. Con esta consideración, el año 2020 el valor de las baterías está alrededor de los 250 [US\$/kWh].

iv. Costos variables:

Los costos variables, considerados en el documento [3], son distintos de los considerados en el caso estudiado, esto se debe a que se busco el costo de cada materia prima independientemente y se consideraron otros procesos añadidos a los de la referencia. Ojo que es probable falta algunas materias primas, aquellas que no es posible determinar su utilización en las baterías, con la información de la que se dispone (por ejemplo los solventes de los materiales activos).

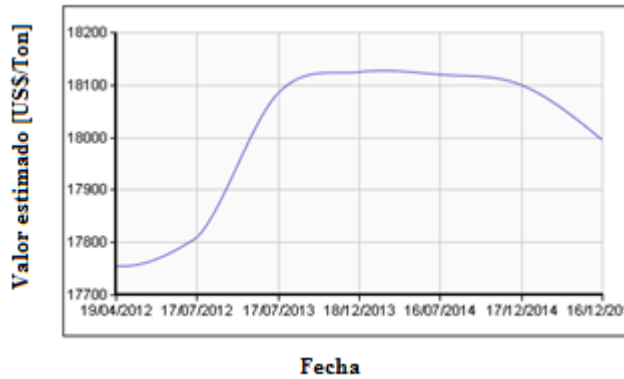
Información de Materias Primas:

A continuación, se expone información encontrada en [24], referente a los valores de distintas materias primas.

Para el níquel:

Según la LME [24] (7-4-2012), su valor muestra variaciones esperadas los próximos años entre los US\$ 17.700 por tonelada y los US\$ 18.200 por tonelada, como se muestra en el Grafico 1.

Grafico 1: Precios estimados por tonelada de níquel (7 de mayo de 2012) [24]



Para ser conservador, se considera un costo de US\$ 18,1 por kg constante.

Para el cobalto:

Según la LME, su valor se ha reducido desde el 2011 (aproximadamente 38[US\$/kg]) [24] el 7/4/2012 y se espera que continúe disminuyendo durante los próximos meses (no hay estimaciones más allá de 15 meses), pero para ser cautelosos respecto a posibles futuras variaciones, se considera un costo de US\$32 por kg constante (valor intermedio entre sus precios máximos y mínimos desde el 2011, además es un precio mayor que el actual).

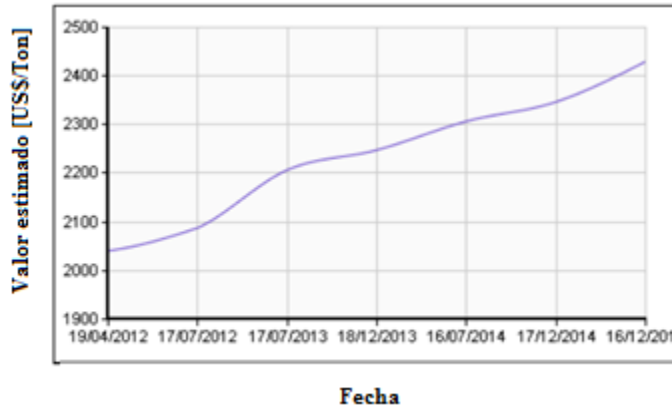
Grafico 2: Valores de los últimos 2 años por tonelada de cobalto [24]



Para el aluminio:

El aluminio, muestra un crecimiento aparentemente constante en los precios esperados para los próximos 3 años, entre los 2000 y 2500 US\$ por tonelada [24] (7-4-2012).

Grafico 3: Precios estimados por tonelada de aluminio (7 de mayo de 2012) [24]

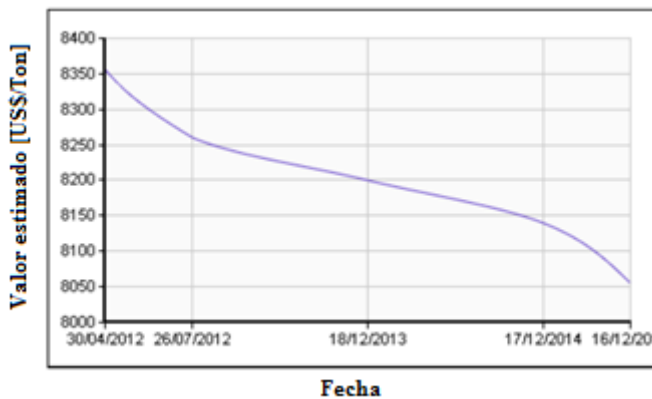


Sin embargo, ha mostrado grandes variaciones durante los años, pero por simplicidad se asume que su costo es de US\$ 2,00 en la actualidad con un crecimiento de $US\$ (2450-2000)/(2015-2012) = US\$ 150$ por tonelada, lo que corresponde al 7,5% anual estimado del valor considerado actual. Por simplicidad se considera que el valor de US\$2,00 aumenta un 7,5% anual hasta el horizonte de evaluación del proyecto.

Para el cobre:

El cobre, actualmente tiene un valor de US\$ 8,3 por kg, pero se prevé que su valor decazca en los próximos años [24] (7-5-2012).

Grafico 4: Precios estimados por tonelada de cobre, 7 de mayo de 2012 [24]



Se estima un decrecimiento de: $US\$(8350-8050)/(2015-2012) = US\100 constante al año por tonelada, correspondiente al 1,2% de su valor actual al año.

Costos de Materias Primas:

Para todas las mercancías se considera un valor de seguro de transporte del 2% del valor de la mercancía y un valor de derechos de aduana del 6% si se importan (sobre su valor CIF, valor del producto, más seguro y transporte) [25]. El lugar en que se considera la planta instalada es en el puerto de Antofagasta.

A nivel de celda:

- Material activo del ánodo: Grafito, en la referencia [4] se menciona que es posible alcanzar los 30 [US\$/kg], el país más cercano en el que se produce grafito es Brasil y el costo asociado a su importación es de 15,94 [US\$/kg], el precio que se paga por este producto es finalmente de 24,47 [US\$/kg]. Lo que genera un costo de 6,57 [US\$/celda].
- Material activo cátodo: tiene diversas componentes, litio, níquel cobalto y aluminio. Se tiene las siguientes masas molares en los distintos elementos, en la Tabla 35, de [26].

Tabla 35: Masas molares de átomos [26]

| | | |
|----|-------|---------|
| Li | 6,94 | (g/mol) |
| Ni | 58,69 | (g/mol) |
| Co | 58,93 | (g/mol) |
| Al | 26,98 | (g/mol) |
| C | 12,01 | (g/mol) |
| O | 16,00 | (g/mol) |

Con éstas, se pueden calcular las masas molares de compuestos, cuyas masas molares resultantes se exponen en la Tabla 36.

Tabla 36: Masas moleculares de carbonato de litio y NCA

| | | |
|--|-------|---------|
| Li ₂ CO ₃ | 73,89 | (g/mol) |
| LiNi _{0,8} Co _{0,15} Al _{0,05} O ₂ | 96,08 | (g/mol) |

Evaluando sus valores molares, el material $LiNi_{0,8}Co_{0,15}Al_{0,05}O_2$, tiene un 7,22% de su masa en litio, 48,87% en níquel, 9,20% en cobalto, 1,40% en aluminio y 33,30% en oxígeno.

El níquel, cobalto y Aluminio se pueden comprar de forma independiente. El litio se adquiere en el compuesto Li_2CO_3 , carbonato de litio, el cual consta de un 18,79% de litio en su masa. No se considera la obtención de oxígeno como un costo adicional.

- Carbonato de litio (Li_2CO_3): Se ha encontrado, a un precio mínimo de 6,00 [US\$/kg] en [27], se considera que se obtiene del salar de atacama, con un costo de 1,93 [US\$/kg] por transporte, lo que resulta en un precio final de 7,93 [US\$/kg], con las consideraciones anteriores, se necesita una masa de 76,90 [g] ($2,00 \cdot 7,22\% / 18,79\%$) de carbonato de litio por celda. Esto genera, un costo de 0,62 [US\$/celda],
- Níquel (Ni): Se encuentra en Brasil, se ha estimado un precio de 18,10[US\$/kg], el valor de su transporte es de 15,94 [US\$/kg], lo que genera un valor de

36,47 [US\$/kg] y dado que se requieren 97,74[g] ($2,00 \cdot 48,87\%$) de Ni en la celda, se produce un costo de 3,56[US\$/celda],

- Cobalto (Co): El lugar más cercano en el que se produce, es Cuba, su valor estimado es de 32 [US\$/kg], su transporte se ha considerado de un costo de 8,50 [US\$/kg], con lo que resulta con un precio final de 43,6 [US\$/kg], pero sólo se requiere una masa de 18,40[g] ($2,00 \cdot 9,20\%$), por celda lo que se traduce en un costo de 0,80[US\$/Celda],
- Aluminio (Al): Se encuentra a un valor de 2,00 [US\$/kg], también es posible importarlo desde Brasil, con un costo de 5,64 [US\$/kg], lo que genera un costo de este metal de 8,14 [US\$/kg], dado que cada celda requiere 2,81 [g] ($2,00 \cdot 1,40\%$) de este material en su cátodo se cuesta 0,02[US\$/celda].

El precio de la elaboración del material activo y sus componentes adicionales, se consideran más adelante.

- Lámina de aluminio: Si bien se podría comprar directamente a un productor de China, su elaboración se considera de forma nacional y se decide considerar el importar el aluminio desde Brasil, del mismo modo que se hace con el aluminio del cátodo, su precio por kg será de US\$0,43 por celda, (sin contar la fabricación de la lámina),
- Aglutinante, PVDF en ambos electrodos: el menor costo al que ha sido encontrado es de 14 [US\$/kg] [28], en China, el costo de su transporte es de 44,01[US\$/kg] lo que genera un valor resultante de 59,63[US\$/kg], la masa total que se requiere de PVDF entre ambos electrodos es de 30,63 [g] por celda, lo que produce un costo de 1,89 [US\$/celda],
- Lámina de cobre: Se podría comprar terminada desde China, pero se prefiere considerar el elaborar en Chile. El valor al que se encuentra el cobre es actualmente de 8,3[US\$/kg], el costo de transporte es de US\$0,21 por kg, al considerar la masa necesaria por celda de 104,4[g], se obtiene un costo de 0,89[US\$/celda],
- Separador: De polietileno o polipropileno, se considera que se puede producir en Chile (Concón), el costo que se ha encontrado es de 80[US\$/kg] ($2[\text{US}/\text{m}^2]$, con láminas de 25[μm])) en [29], para la obtención de separador, su transporte desde Concón costaría 3,52[US\$/kg], lo que genera un costo de 85,12[US\$/kg] considerando que las celdas utilizan 24,27[g], el costo de separador por celda es de 2,07[US\$/celda],
- Electrolito: La referencia [1] muestra el fabricante Estadounidense de electrolito “Novolyte Technologies”, el cual manufactura electrolito en Baton Rouge, Louisiana. La importación desde este proveedor muestra un costo de US\$ 24,32 por kg, y en la referencia [30], se puede encontrar un precio de electrolito de 20[US\$/kg], considerando que se requieren 91,0 [g], el gasto en electrolito es de 4,32 [US\$/celda],
- Carbón negro: Acetileno negro, se puede encontrar desde 2,5[US\$/kg] [28], se considera que se produce en Colombia, con un costo de transporte de 10,78[US\$/kg], tiene un costo final de 14,12[US\$/kg], considerando que la celda utiliza 19,05 [g] el costo de acetileno negro por cada celda es de 0,27[US\$/celda]
- Contenedor, tapa y otros: A nivel de celda, se estiman sus costos de materias primas, basándose en que se espera que estén hechos de aluminio. Del mismo modo que en

los demás componentes de aluminio, con una masa de 76,3[g] por celda, tiene un costo de 0,62[US\$/celda].

A nivel de pack:

Para calcular el costo en otros elementos a nivel de *pack*, se observa [3], en el cual se considera un costo de 292 [US\$] por *pack*, en materiales para módulos y baterías, estos elementos se tratan a un nivel básico, no incluyen el sistema de manejo de baterías, ni componentes mecánicos muy sofisticados, pues sus costos son mucho mayores, como se muestra en [30].

Dado que los materiales específicos utilizados en este nivel pueden ser diversos, aunque los módulos se sabe que típicamente son plásticos, su contenedor varía según el vehículo en que es utilizado, debido a que se desconoce la proporción y composición exacta, no se considera su transporte.

Costos de elaboración:

A continuación, se expresan los costos de elaborar los productos encontrados en [3].

Tabla 37: Costos de elaboración [3]

| | | |
|---------------------------------------|--------|--------------|
| Procesamiento de los electrodos: | 72 | [US\$/pack] |
| | 0,7500 | [US\$/celda] |
| Ensamblaje de las celdas: | 40 | [US\$/pack] |
| | 0,4167 | [US\$/celda] |
| Carga y control de calidad de celdas: | 12 | [US\$/pack] |
| | 0,1250 | [US\$/celda] |
| Ensamblaje de módulos y <i>pack</i> : | 20 | [US\$/pack] |
| Recepción de materiales y transporte: | 10 | [US\$/pack] |
| Costos generales variables: | 97 | [US\$/pack] |

A estos costos de elaboración, es necesario agregar el de elaboración de 4 productos, que en el documento en [3] no están considerados, se trata de ser conservador en estas consideraciones, debido a la falta de buenas estimaciones:

- Elaboración de láminas de cobre: se desconoce el costo de implementarla en Chile, sin embargo, se ha visto que las láminas tienen un costo de entre 11,8 y 25 [US\$/kg] en China [28], para láminas de distintos espesores, se sabe que gracias a la producción masiva en China alcanzarán costos menores que en Chile, pero para amortiguar este efecto no se descuenta el valor de transportar a china el cobre. Se considera que en Chile su elaboración cuesta 12 [US\$/kg] y el costo del cobre como materia prima de forma independiente. Cada ánodo requiere 0,1044 [kg] de cobre, luego se tiene un costo en laminar de 1,25 [US\$/celda]
- Del mismo modo que para las láminas de cobre, el laminar el aluminio se considera como su valor de compra a China, se ha visto con valores de entre 8 y 10 [US\$/kg] [28], pero dado que en Chile nuevamente no se alcanzan los costo de China, no se descuenta el valor de transportar el aluminio a China, se considera de 8 [US\$/kg]. Considerando que cada celda utiliza 52,4 [g] de aluminio en la lámina de su cátodo, se gastan 0,42[US/celda] en laminar el aluminio.
- Se considera la fabricación de contenedor, tapa y otros. En la referencia [1] se encuentra una lista con costos para estos materiales, para una planta con una

capacidad de producir 100.000 packs anuales, de capacidad 25 [kWh]. El costo que tienen estos materiales es de US\$1425 por pack. Considerando estos valores proporcionales a la energía que almacenan las baterías, los packs de 10,2 [kWh] que están siendo evaluados, tendrán un costo en fabricación de contenedor, tapa y otros de US\$581,40 por pack. Tomando en cuenta que se trata de packs de 96 celdas, US\$6,06 por celda. No se descuenta el valor de su materia prima considerada (aluminio), porque es de un valor considerablemente menor y se desea mantener estimaciones conservadoras.

- En la referencia [30], se puede encontrar un valor de material activo de cátodo de 33 [US\$/kg], se utiliza esta referencia debido a la falta de una mejor, pero se debe tener presente que fue construida con un tipo de baterías distinta de las NCA. Dado el elevado valor de las componentes ya consideradas del material activo, conociendo su porcentaje de la masa de material activo, se descuenta su valor (pero no el de su transporte, recordando que las baterías NCA tienen materiales particularmente caros):

$$33 - 6,00 * 7,22\% - 18,1 * 48,87\% - 32 * 9,20\% - 2 * 1,40\% = 20,75 [\text{US}\$/\text{kg}]$$

Este valor estimado (20,75[US\$/kg]), es considerado para el de elaboración de material activo y contiene: la obtención de elementos adicionales necesarios y la fabricación del material activo. El transporte de los elementos adicionales necesarios no se considera, ni sus costos, de forma independiente de la elaboración, pues no se dispone de una división más detallada de estos costos. En futuras evaluaciones, se debe obtener información más detallada, acerca de estos elementos. La masa del material activo del cátodo es de 0,20 [kg/celda], luego el gasto en elaboración del material activo es estimado en 4,15 [US\$/celda].

Con la información expuesta, se construye la siguiente tabla:

Tabla 38: Costos variables iniciales considerados por celda y *pack*:

| A nivel de celda | Costo [US\$] |
|---|-----------------|
| Costos de materias primas: | |
| Grafito: | 6,57 |
| Carbonato de litio | 0,62 |
| Níquel | 3,56 |
| Cobalto | 0,80 |
| Aluminio para cátodo | 0,02 |
| Aluminio para lámina de cátodo | 0,43 |
| PVDF | 1,89 |
| Cobre para lámina de ánodo | 0,91 |
| Separador | 2,07 |
| Electrolito | 4,32 |
| Carbón negro | 0,27 |
| Aluminio para contenedor, tapa y otros: | 0,62 |
| Costos de elaboración: | |
| Elaboración de material activo cátodo | 4,15 |
| Procesamiento de los electrodos | 0,75 |
| Ensamblaje de las celdas | 0,42 |
| Carga y control de calidad de celdas | 0,13 |
| Elaboración de láminas de cobre | 1,25 |
| Elaboración de láminas de aluminio | 0,42 |
| Fabricación de contenedor, tapa y otros | 6,06 |
| Total por celda | 35,26 |
| A nivel de <i>pack</i> : | |
| Costos de materias primas: | |
| 96 celdas: | 3.384,96 |
| Elementos a nivel de <i>pack</i> | 292,00 |
| Costos de elaboración: | |
| Ensamblaje de módulos y contenedores | 20 |
| Recepción de materiales y transporte | 10 |
| Costos generales variables | 97 |
| Total por <i>pack</i> | 3.803,96 |

4.2. Incorporación del caso descrito para Chile al modelo

I. Puntos generales

El horizonte de evaluación del proyecto es de 8 años, debido que se tienen estimaciones del valor de las baterías desde la actualidad (2012) hasta el año 2020, en [17] (El modelo comienza en el mes cero, por lo que con 8 años de horizonte de evaluación, se tienen 96 meses más uno adicional, el mes cero).

Se utiliza tasa de descuento del 10%, designada por el D.F.L.1, para el sector eléctrico en Chile [22].

La demanda mensual que se satisface es de 10.000 baterías mensuales a partir del mes 12 desde el comienzo del proyecto, en el mes cero se considera la fabricación de 1 *pack* (para tener una referencia de los costos por *pack*).

Costos de inversión:

Los costos de inversión totales utilizados en este modelo, son de US\$ 381.468.380,75 y se considera dividido de forma igual, entre las etapas de adaptación de materias primas, fabricación de celdas, fabricación de *packs* y comercialización del modelo.

Costos fijos:

Son de US\$262 por *pack*, corresponde a gasto de investigación, desarrollo, ventas y patentes. Son de US\$262 por *pack* de capacidad de la planta anualmente, se está considerando que la planta produce 120.000 *packs* al año, lo que genera US\$ 31.440.000 al año para mantener la consistencia, calculando el valor actual a esta cifra con una tasa de descuento de un 10% anual, considerando 8 pagos, al final de cada año, lo que genera un valor actual de US\$167.730.079,66 para los costos fijos.

Los costos fijos se consideran del mismo modo que los de inversión, en un único número, correspondiente a la suma actualizada de sus valores: US\$ 549.198.460,41.

II. Incorporación de la información al modelo:

Cada uno de los puntos mostrados a continuación, representa una hoja con entradas al modelo.

Entre las Secciones 4.1.I.ii (obtención de materias primas) y 4.1.I.vii (costos de comercialización), se tienen los costos de todas las etapas del proyecto, no se considera el impacto medioambiental de sus actividades, aunque el modelo implementado lo permitiría (si se conocieran) y se considera una vida útil de todas las actividades de 97 meses, equivalente a la duración considerada del proyecto. Los costos de inversión y fijos, se dividen entre las etapas de adaptación de materias primas, fabricación de celdas, fabricación de *packs* y comercialización. Los rendimientos de las distintas actividades, si no se conocen se consideran del 100%, el de los materiales se considera en su obtención.

i. Consideración del horizonte de evaluación y la tasa de descuento al modelo:

Como se explico, la tasa de descuento del modelo utilizado es del 10% anual y se utiliza un horizonte de evaluación de 8 años (96 meses más el mes cero).

ii. Obtención de materias primas

En esta etapa se considera los costos de la obtención de de las distintas materias primas, más los seguros para su transporte (2%), considerado en todos los productos.

En la Tabla 39, se observa el detalle de los costos de de cada una de las materias primas por unidad, para las actividades de obtención de cada una de las materias primas, de acuerdo al nivel de integración en las celdas o *packs*. En la Tabla 40, se muestran los nombres de los productores de las materias primas compradas y su ubicación. En la Tabla 41, se muestra las actividades y etapas que ocupan los productos de las distintas actividades y también se observa, cuantos productos requieren las actividades siguientes por cada uno de sus productos.

iii. Adaptación de materias primas

En esta etapa se consideran las siguientes actividades:

- El procesamiento de los electrodos: 0,7500 [US\$/celda], la masa total de los electrodos es de 0,5397[kg].
- La fabricación de lámina de cobre para el ánodo: Para la lámina de cobre se considera que la celda requiere 0,1044 kg de cobre y que el costo de su elaboración es de 1,25 [US\$/celda].
- La fabricación de lámina de aluminio para el cátodo: Se considera que cada lámina de aluminio tiene una masa de 0,0524 [kg] y un costo de fabricación de 0,42 [US\$/celda].
- La fabricación del material activo de cátodo, cuyo costo es de 4,15 [US\$/celda], los materiales adicionales necesarios para esta actividad se desconocen, por lo que no se consideran, en etapas más avanzadas del proyecto deben considerarse. No se considera, la fabricación del material activo de ánodo (grafito), sino que su importación.
- La fabricación de contenedor, tapa y otros: Estos elementos son necesarios para la fabricación de celdas, su costo es estimado en 6,06[US\$/celda] y su masa de 0,0763[kg].

Como el procesamiento de los electrodos, requiere tanto de las láminas de aluminio y cobre, como los materiales activos de ambos electrodos, se considerará un nuevo proceso llamado fabricación de electrodos que incluye: los costos de fabricar las 2 láminas, más la fabricación del material activo del cátodo y procesar los electrodos, con un costo total de 6,57 [US\$/par de electrodos].

La Tabla 42, muestra las características de los productos de las actividades descritas en esta sección. La Tabla 43, muestra que quien realiza la producción de las materias adaptadas es el proyecto, mostrando esta como una de las actividades que incluye. La inversión y gastos fijos actualizados, corresponde a una distribución igual, de la inversión y costos fijos totales, entre las etapas de adaptación de materias primas, fabricación de celdas, fabricación de *packs* y comercialización; para luego dividirla en sus actividades. La Tabla 44, muestra quienes utilizan las materias primas adaptadas.

Tabla 39: Características de cada materia prima

| Actividad: | Producto | | | | | |
|---|---|---------------------------------|---|----------------------------|------------------------------|-------------|
| | Nombre: | Masa por unidad: [kg/unidad] | Costo actual por producto: [US\$/unidad] | Comportamiento del costo: | Variación mensual del costo: | Rendimiento |
| Obtención de grafito | Grafito | 0,13320 | 4,07592 | Constante | 0,00% | 95,00% |
| Obtención de carbonato de litio | Carbonato de litio | 0,07685 | 0,47032 | Constante | 0,00% | 95,00% |
| Obtención de níquel | Níquel | 0,09774 | 1,80448 | Constante | 0,00% | 95,00% |
| Obtención de cobalto | Cobalto | 0,01840 | 0,60058 | Constante | 0,00% | 95,00% |
| Obtención de aluminio para material activo cátodo | Aluminio para material activo cátodo | 0,00280 | 0,00571 | De crecimiento constante | 0,63% | 95,00% |
| Obtención de aglutinante | Aglutinante (PVDF) | 0,03063 | 0,43740 | Constante | 0,00% | 95,00% |
| Obtención de carbón negro | Carbón negro | 0,01905 | 0,04857 | Constante | 0,00% | 95,00% |
| Obtención de aluminio para lámina de cátodo | Aluminio para lámina de cátodo | 0,05240 | 0,10690 | De crecimiento constante | 0,63% | 95,00% |
| Obtención de cobre para lámina de ánodo | Cobre para lámina de ánodo | 0,10440 | 0,88385 | De decrecimiento constante | -0,10% | 95,00% |
| Obtención de separador | Polietileno o polipropileno para separador | 0,02427 | 1,98068 | Constante | 0,00% | 95,00% |
| Obtención de electrolito | Electrolito de sal de litio y solvente orgánico | 0,09104 | 1,85715 | Constante | 0,00% | 90,00% |
| Obtención de aluminio para contenedor, tapa y otros para la celda | Aluminio para contenedor, tapa, terminales y otros | 0,07629 | 0,15562 | De crecimiento constante | 0,63% | 95,00% |
| Obtención elementos a nivel de pack: | Contenedores, empaquetamiento y electrónica a nivel de pack | 11,79767 | 292 | Constante | 0,00% | 100,00% |

Tabla 40: Características de cada productor de materias primas

| | Productor: | |
|---|--|---|
| Actividad: | Nombre: | Ubicación: |
| | | |
| Obtención de grafito | Nacional de Grafite Ltda. | Itapecerica, Minas Gerais State, Brasil |
| Obtención de carbonato de litio | SQM | Salar de Atacama |
| Obtención de níquel | Companhia Niquel Tocantin | Niquelândia, Goiás State, Brasil |
| Obtención de cobalto | Metals Enterprise S.A. | Moa, Holguin Province, Cuba |
| Obtención de aluminio para material activo cátodo | Aluminio Argentino S.A.I.C. (fundición) | Puerto Madryn, Provincia de Chubut, Argentina |
| Obtención de aglutinante | ZIBO YICHI INTERNATIONAL TRADING CO.,LTD | Shandong China |
| Obtención de carbón negro | Productos Petroquímicos, S.A. (planta) | Calí, Valle del Cauca, Colombia |
| Obtención de aluminio para lámina de cátodo | Aluminio Argentino S.A.I.C. (fundición) | Puerto Madryn, Provincia de Chubut, Argentina |
| Obtención de cobre para lámina de ánodo | Empresa Minera de Mantos Blancos | Mantos Blancos, mina, planta, Región II |
| Obtención de separador | Planta Refinadora de Petróleo Aconcagua | Localidad de Concón (V Región) Enap Chile |
| Obtención de electrolito | Novolyte Technologies | Baton Rouge, Louisiana |
| Obtención de aluminio para contenedor, tapa y otros para la celda | Aluminio Argentino S.A.I.C. (fundición) | Puerto Madryn, Provincia de Chubut, Argentina |
| Obtención elementos a nivel de pack: | Indeterminado | Indeterminado |

Tabla 41: Utilización de los productos en actividades siguiente

| Actividad: | Utilización: | | | |
|---|--------------------------|--|---------|---|
| | Producto: | Actividad: | Etapas: | Cantidad necesaria [unidades/unidad] |
| Obtención de grafito | Electrodos | Fabricación de electrodos | 2 | 1 |
| Obtención de Carbonato de litio | Electrodos | Fabricación de electrodos | 2 | 1 |
| Obtención de níquel | Electrodos | Fabricación de electrodos | 2 | 1 |
| Obtención de Cobalto | Electrodos | Fabricación de electrodos | 2 | 1 |
| Obtención de Aluminio para material activo cátodo | Electrodos | Fabricación de electrodos | 2 | 1 |
| Obtención de Aglutinante | Electrodos | Fabricación de electrodos | 2 | 1 |
| Obtención de carbón negro | Electrodos | Fabricación de electrodos | 2 | 1 |
| Obtención de Aluminio para lámina de cátodo | Electrodos | Fabricación de electrodos | 2 | 1 |
| Obtención de Cobre para lámina de ánodo | Electrodos | Fabricación de electrodos | 2 | 1 |
| Obtención de Separador | Celdas | Ensamblaje, carga y control de celdas | 3 | 1 |
| Obtención de Electrolito | Celdas | Ensamblaje, carga y control de celdas | 3 | 1 |
| Obtención de contenedor, tapa y otros para la celda | Contenedor, tapa y otros | Fabricación de contenedor, tapa y otros, para la celda | 2 | 1 |
| Obtención elementos a nivel de pack: | Packs | Ensamblaje de módulos y packs | 4 | 1 |

Tabla 42: Productos y actividades en adaptación de materias primas

| Actividad: | Producto: | | | | | |
|--|--------------------------|------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------|
| | Nombre: | Masa por unidad: | Costo actual por producto: | Comportamiento del costo: | Variación mensual del costo: | Rendimiento |
| | | [kg/unidad] | [US\$/unidad] | | | |
| Fabricación de electrodos: | Electrodos | 0,53968 | 6,57 | Constante | 0,00% | 100,00% |
| Fabricación de contenedor, tapa y otros, para la celda | Contenedor, tapa y otros | 0,07629 | 6,06 | Constante | 0,00% | 100,00% |

Tabla 43: Productores de materias primas adaptadas

| Actividad: | Productor: | | |
|--|------------|-------------|--|
| | Nombre: | Ubicación: | Inversión y gastos fijos actualizados: |
| | | | [US\$] |
| Fabricación de electrodos: | Proyecto | Antofagasta | 68.649.807,55 |
| Fabricación de contenedor, tapa y otros, para la celda | Proyecto | Antofagasta | 68.649.807,55 |

Tabla 44: Utilización de materias primas adaptadas

| Actividad: | Utilización: | | | |
|--|--------------|---------------------------------------|---------|--------------------|
| | Producto: | Actividad: | Etapas: | Cantidad necesaria |
| | | | | [unidades/unidad] |
| Fabricación de electrodos: | Celdas | Ensamblaje, carga y control de celdas | 3 | 1 |
| Fabricación de contenedor, tapa y otros, para la celda | Celdas | Ensamblaje, carga y control de celdas | 3 | 1 |

iv. Fabricación de celdas:

Las actividades consideradas en esta etapa son: el ensamblaje de las celdas, con un costo de 0,4167 [US\$/celda], también la carga y su control de calidad, con un costo de 0,1250 [US\$/celda]. Se consideran como sólo una actividad, la producción de celdas, cada celda se considera de una masa de 0,7313 [kg]. Considera $\frac{1}{4}$ del total de costos fijos y de inversión.

Ensamblaje, carga y control de celdas:

- Nombre del producto: Celdas
- Masa por unidad: 0,7313 [kg]
- Costo actual por producto: $0,4167 + 0,1250 = 0,5417$ [US\$/celda]
- Comportamiento del costo: Constante
- Rendimiento: 97%

Productor:

- Nombre: Proyecto
- Ubicación: Antofagasta
- Inversión y gastos fijos actualizados:
- $US\$ 549.198.460,41/4 = US\$ 137.299.615,10$.
- Vida útil: 97 meses

Utilización:

- Producto: packs
- Actividad: Ensamblaje, carga y control de celdas
- Etapa: 4
- Cantidad necesaria: 96 [celdas / pack]

v. Fabricación de packs:

Considera el ensamblaje de módulos y bancos de baterías, con un costo de US\$ 20 por pack, la masa total del pack es de 82 [kg] y su volumen 52 [L]. Considera $\frac{1}{4}$ del total de costos fijos y de inversión.

Ensamblaje de módulos y packs:

- Nombre: packs
- Masa por unidad: 82 [kg]
- Costo actual por producto: 20 [US\$/pack]
- Comportamiento del costo: Constante
- Rendimiento: 100%

Productor:

- Nombre: Proyecto
- Ubicación: Antofagasta

- Inversión y gastos fijos actualizados:
- US\$ 549.198.460,41/4= US\$ 137.299.615,10.
- Vida útil: 97 meses
- Impacto medioambiental de instalación: no se considera, 0.

Utilización:

- Producto: Pack comercializado
- Actividad: Comercialización packs
- Etapa: 6
- Cantidad necesaria: 1 [pack/pack comercializado]

vi. Fabricación de vehículos:

No considera actividades.

vii. Costos de comercialización:

Sus costos consideran 2 ítems, Recepción de materiales y transporte: 10[US\$/pack] y Costos generales variables: 97 [US\$/pack]. Considera ¼ del total de costos fijos y de inversión.

Comercialización packs:

- Nombre: Pack comercializado
- Impacto medioambiental por producto: indeterminado, considerado 0
- Costo actual por producto: 107 [US\$/pack]
- Comportamiento del costo: Constante
- Rendimiento: 100%

Cliente:

- Nombre: cliente1
- Ubicación: Long Beach, U.S.A.
- Inversión y gastos fijos actualizados:
- US\$ 549.198.460,41/4= US\$ 137.299.615,10.
- Vida útil: 97 meses

viii. Ingresos de comercialización:

Se consideran ingresos por venta de baterías, desde un valor del *pack* de US\$4590 (tomando en cuenta que actualmente el kWh cuesta US\$450). Los valores del kWh considerados, fueron tomados del documento [17], donde también se observa el comportamiento del precio de las baterías, el cual es de decrecimiento compuesto con una tasa del 7,5% anual, para describir este comportamiento, el modelo considera un decrecimiento exponencial del valor de las baterías, con la tasa dada.

Comercialización packs:

- Nombre: Pack comercializado

- Masa por unidad: 82 [kg]
- Impacto medioambiental por producto: indeterminado, considerado 0
- Costo actual por producto: 4590 [US\$/pack]
- Comportamiento del costo: De decrecimiento exponencial
- Variación mensual del costo: $=-0,006475737 \text{ mensual}=(1-0,075)^{(1/12)}-1$
- Cliente: Cliente1

ix. Incorporación de la demanda al modelo:

Se desconoce cuánto tardara la implementación de la planta, así como si habrán restricciones en su capacidad productiva desde el comienzo del proyecto, por lo que se considera que se es capaz de tener la planta en su máxima capacidad productiva desde un año después del comienzo del proyecto, el crecimiento de la demanda de vehículos es mayor que la capacidad productiva de la planta, pero se debe considerar que la competencia podría producir dificultades en este sentido.

La planta considera, que trabaja fabricando 10.000 baterías mensuales desde el mes 12 del proyecto, más 1 en el mes cero.

x. Incorporación del transporte al modelo:

Los costos del transporte, considerados por kilometro y kilogramo, se exponen en la Sección 4.1.II. Para todas las mercancías, se considera un valor de derechos de aduana del 6% de su valor CIF [25], si se importan.

Se consideran transportes, entre los distintos puntos donde se obtienen materias primas y el puerto de Antofagasta, además de transportes de baterías terminadas entre este puerto y el de Long Beach en los Estados Unidos.

Para evaluar el impacto medioambiental, se compara el efecto medioambiental de la producción China con la Chilena al vender a un cliente de U.S.A. Los transportes involucrados en la producción China y Chilena se describen en la Sección 4.1.II.

Se considera un impacto medioambiental de 25 [gCO₂/km/ton] para transporte marítimo y de 105 [gCO₂/km/ton] para transporte terrestre (el promedio entre los valores máximos y mínimos de los respectivos medios expuestos en la Sección 2.5, obtenidos en la referencia [11], suponiendo que el transporte marítimo se realiza en barcos y el terrestre en camiones). También, se considera una ponderación correspondiente de ellos si son mixtos. La distancia recorrida se obtuvo, de Google Earht para recorridos terrestres y de [18] para recorridos marítimos.

xi. Incorporación de retrasos en pagos al modelo:

Por simplicidad, se considera de sólo un mes para todas las ventas.

xii. Incorporación de impuestos al modelo:

Se consideran impuestos a las utilidades del 19%.

4.3. Resultados y estudio de casos

I. Evaluación económica:

Para evaluar económicamente el proyecto, se construyen varios casos, el primero es en el que se han implementado las descripciones hechas en las Secciones 4.1 y 4.2. Este caso es el más conservador, a medida que se construyen nuevos casos, disminuye la exigencia del modelo.

Cabe destacar que la información con que se describió los casos, utiliza diversas referencias, que aportan información de distintas fechas y se hicieron consideraciones que pueden cambiar según las características de las baterías, la planta, la ubicación, los proveedores de las materias primas o sencillamente no cumplirse (por ejemplo; se ha estimado predicciones de valores de materias primas, que podrían estar equivocadas).

De las consideraciones hechas e información utilizada dependen los resultados, por lo que los resultados expuestos a continuación, no son necesariamente acordes a la realidad.

Caso I: Base

El VAN del proyecto es: US -946.654.687,14. Con las consideraciones hechas, el VAN del proyecto resulta negativo, ya que los costos estimados de producir baterías son mayores que los valores estimados para venderlas. Este valor actual del proyecto, implica que claramente no es factible realizarlo, con las condiciones que se ha evaluado.

El costo de las baterías es inicialmente de US\$4.857,31 (476,20 [US\$/kWh], considerando que las mensualidades de los costos fijos y de inversión, se dividen en 10.000 baterías), lo que está por sobre del valor de venta de baterías considerado inicialmente de US\$4590 (450 [US\$/kWh]).

Para describir los costos de este caso, se elabora las siguientes tablas. También es necesario tener presente que el valor actual de los costos fijos e inversión considerados, es de US\$ 549.198.460,41.

Tabla 45: Costos a nivel de banco de baterías (en el instante inicial del proyecto)

| Actividad | Costo | |
|--|---------------|--------------|
| | [US\$/pack] | [US\$/kWh] |
| Comercialización <i>packs</i> (recepción y transporte de materiales, más costos generales variables) | 107,00 | 10,49 |
| Ensamblaje de módulos y <i>packs</i> | 20,00 | 1,96 |
| Obtención elementos a nivel de <i>pack</i> : | 292,00 | 28,63 |
| Total: | 419,00 | 41,08 |

Tabla 46: Costos nivel de celda (en el instante inicial del proyecto)

| Actividad (las “obtenciones” incluyen costos de transporte) | Costo | |
|---|--------------|---------------|
| | [US\$/celda] | [US\$/kWh] |
| Ensamblaje, carga y control de celdas | 0,54 | 5,10 |
| Fabricación de electrodos | 6,57 | 61,84 |
| Fabricación de contenedor, tapa y otros, para la celda | 6,06 | 57,04 |
| Obtención de grafito | 6,57 | 61,85 |
| Obtención de carbonato de litio | 0,62 | 5,82 |
| Obtención de níquel | 3,56 | 33,55 |
| Obtención de cobalto | 0,80 | 7,55 |
| Obtención de aluminio para material activo cátodo | 0,02 | 0,21 |
| Obtención de aglutinante | 1,89 | 17,81 |
| Obtención de carbón negro | 0,27 | 2,53 |
| Obtención de aluminio para lámina de cátodo | 0,43 | 4,01 |
| Obtención de cobre para lámina de ánodo | 0,91 | 8,52 |
| Obtención de separador | 2,07 | 19,45 |
| Obtención de electrolito | 4,32 | 40,62 |
| Obtención de aluminio para contenedor, tapa y otros para la celda | 0,62 | 5,85 |
| Total: | 35,25 | 331,74 |

Tabla 47: Costos de materias primas a nivel de celda (obtención, sin transporte, ni derechos de aduana, también en el instante inicial del proyecto)

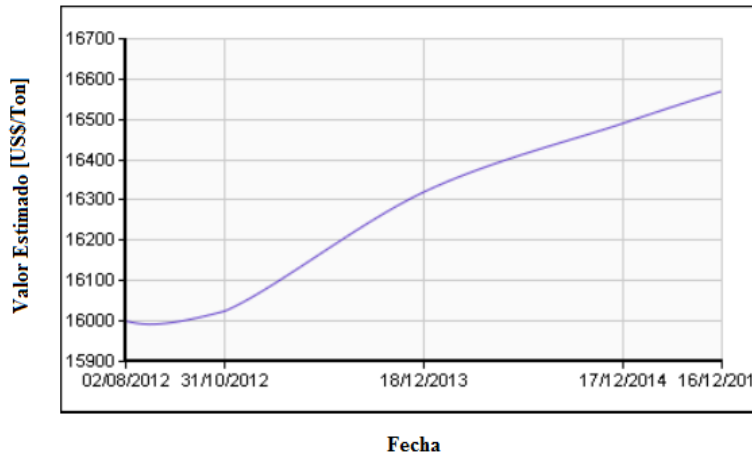
| Materia prima | Costo | |
|--|--------------|---------------|
| | [US\$/celda] | [US\$/kWh] |
| Grafito | 4,08 | 38,36 |
| Carbonato de litio | 0,47 | 4,43 |
| Níquel | 1,80 | 16,98 |
| Cobalto | 0,60 | 5,65 |
| Aluminio para material activo cátodo | 0,01 | 0,05 |
| Aglutinante (PVDF) | 0,44 | 4,12 |
| Carbón negro | 0,05 | 0,46 |
| Aluminio para lámina de cátodo | 0,11 | 1,01 |
| Cobre para lámina de ánodo | 0,88 | 8,32 |
| Polietileno o polipropileno para separador | 1,98 | 18,64 |
| Electrolito de sal de litio y solvente orgánico | 1,86 | 17,48 |
| Aluminio para contenedor, tapa, terminales y otros | 0,16 | 1,46 |
| Total: | 12,43 | 116,96 |

Caso II: Observando menores costos

Se han visto menores costos, que los expuestos previamente. En [28], es posible encontrar electrolito a un valor mínimo de 10 [US\$/kg] y el separador se encuentra a un precio mínimo de 0,35 [US\$/m²] (14 [US\$/kg], suponiendo láminas de 25[μ m]). En la referencia [30], se encuentra un costo estimado de 20 [US\$/kg], para el material activo del ánodo.

Observando el valor del níquel en [24] el 31-7-2012, se considera de un valor de 16 [US\$/kg], con un crecimiento constante de un 0,12% $((16500-16030)/16000/24)$ mensual.

Grafico 5: Precios estimados por tonelada de níquel (31 de Julio de 2012) [24]



Si es posible alcanzar estos precios para los proveedores, o alcanzar los precios mediante la producción de estos elementos dentro del proyecto. Las baterías alcanzan inicialmente un costo de US\$ 4.405,55 (431,92 [US\$/kWh], considerando las mensualidades divididas en 10.000 baterías), un valor menor que el considerado para las ventas de las baterías. Sin embargo, este valor no decrece, mientras que el valor de la venta de las baterías sí, lo que implica que el proyecto aun no es rentable y su VAN es de US\$ -697.877.524,65.

Caso III: ¿Qué se necesita para que el proyecto sea rentable?

Frente al hecho de que los costos actuales estimados de de las baterías sean menores que su valor de venta, pero que no ocurra esto en el futuro, se desea saber que consideración se necesita modificar, para lograr que el proyecto sea rentable, dadas las condiciones que se conocen.

Al buscar que consideraciones sobre costos significativos que se pueden modificar, se han encontrado 2, la primera es el ritmo de decrecimiento de los costos del proceso productivo, del cual no se ha encontrado una cifra conocida, está sujeta a la tecnología, el aprendizaje, la investigación y el desarrollo tecnológico del que se disponga. La segunda es el valor del costo del transporte, si bien se han encontrado en [20], no se han realizado conversaciones con los proveedores del transporte que puedan orientar a los beneficios que esta acción pueda generar.

Se obtiene que el proceso es rentable, cuando el ritmo de disminución de costos de todas las actividades de adaptación de materias primas, fabricación de celdas, fabricación de bancos de baterías y comercialización, es de un 20% de decrecimiento exponencial anual y se considera que los costos de transportes se reducen a un 52%, de los encontrados, realizando conversaciones con las empresas transportistas.

Para lograr rentabilidad del proyecto, es necesario ser muy exigente respecto de obtener bajos costos, debido al rápido decrecimiento de los precios de las baterías de ión-litio, esperados en el mercado internacional, en [17] se encuentra que los precios actuales rodean los 450[US\$/kWh] y se espera que para el 2020 sean cercanos a los 250 [US\$/kWh], con tasa de decrecimiento anual compuesto del 7,5% [17].

II. Evaluación de impacto medioambiental:

Para evaluar el impacto medioambiental del proyecto, se compara la producción de gases de efecto invernadero por parte del transporte de materias primas y *packs* de baterías, para la producción Chilena con la producción China. Ya que no se dispone de información suficiente, para comparar el impacto de las actividades productivas desarrolladas en las diferentes etapas.

Se tiene los las emisiones de dióxido de carbono, para el transporte de las distintas materias primas y bancos de baterías terminados que han sido considerados, tomando en cuenta emisiones de 0,025 [gCO₂/km/kg] para el transporte marítimo y de 0,105 [gCO₂/kg/km] para el transporte terrestre.

Caso I: Producción Chilena

Este caso considera las Tabla 29 y Tabla 30, en las que se define los lugares de partida y llegada considerados para los diferentes productos. Sus resultados se exponen en la Tabla 48.

Tabla 48: Impacto medioambiental del transporte de los distintos productos para la producción Chilena, hasta el horizonte de evaluación del proyecto

| Material transportado | Emisiones de gases de efecto invernadero [g CO ₂] | Porcentaje |
|--|---|----------------|
| A nivel de celda: | | |
| Grafito | 5.095.106.470,26 | 14,77% |
| Carbonato de litio | 201.499.639,26 | 0,58% |
| Níquel | 3.865.026.437,47 | 11,21% |
| Cobalto | 267.041.839,70 | 0,77% |
| Aluminio para material activo cátodo | 67.688.693,38 | 0,20% |
| Aglutinante (PVDF) | 2.118.941.815,42 | 6,14% |
| Carbón negro | 182.997.751,06 | 0,53% |
| Aluminio para lámina de cátodo | 1.266.745.547,52 | 3,67% |
| Cobre para lámina de ánodo | 41.157.700,90 | 0,12% |
| Polietileno o polipropileno para separador | 290.008.906,03 | 0,84% |
| Electrolito de sal de litio y solvente orgánico | 1.793.214.561,41 | 5,20% |
| Aluminio para contenedor, tapa, terminales y otros | 1.844.195.145,60 | 5,35% |
| Total a nivel de celda: | 17.033.624.508,01 | 49,38% |
| A nivel de <i>packs</i> | | |
| Comercialización de baterías | 17.458.685.639,61 | 50,62 |
| Materiales para módulos y <i>packs</i> | Indeterminado | Indeterminado |
| Total: | 34.492.310.147,61 | 100,00% |

Caso II: Producción China

Para este caso se consideran las Tabla 31 y Tabla 32. No se considera la evaluación económica, sino que sólo la medioambiental del transporte, pero se considera el proyecto de iguales características. Sus resultados se exponen en la Tabla 49.

Tabla 49: Impacto medioambiental del transporte de los distintos productos para la producción China,

| Material transportado | Emissiones de gases de efecto invernadero [g CO ₂] | Porcentaje |
|--|--|----------------|
| A nivel de celda: | | |
| Grafito | 2.339.488.605,33 | 2,97% |
| Carbonato de litio | 5.137.804.630,87 | 6,53% |
| Níquel | 188.258.571,31 | 0,24% |
| Cobalto | 488.779.311,06 | 0,62% |
| Aluminio para material activo cátodo | 22.181.064,14 | 0,03% |
| Aglutinante (PVDF) | 537.980.996,88 | 0,68% |
| Carbón negro | 385.266.049,76 | 0,49% |
| Aluminio para lámina de cátodo | 415.102.771,73 | 0,53% |
| Cobre para lámina de ánodo | 6.748.022.514,51 | 8,58% |
| Polietileno o polipropileno para separador | 285.043.773,01 | 0,36% |
| Electrolito de sal de litio y solvente orgánico | 2.043.379.328,94 | 2,60% |
| Aluminio para contenedor, tapa, terminales y otros | 604.328.563,10 | 0,77% |
| Total a nivel de celda: | 19.195.636.180,62 | 24,40% |
| A nivel de <i>packs</i> | | |
| Comercialización de baterías | 59.466.025.929,95 | 75,60% |
| Materiales para módulos y <i>packs</i> | Indeterminado | Indeterminado |
| Total | 78.661.662.110,57 | 100,00% |

De los resultados en las tablas mostradas, para los impactos medioambientales se puede decir que: es de gran relevancia la posición geográfica de la planta que se desea construir respecto de los posibles clientes, se puede observar que si el cliente se encuentra en Long Beach, en los Estados Unidos, el principal componente del impacto medioambiental del transporte de los productos, es el de las baterías terminadas, para plantas ubicadas en China o Chile, debido a la distancia que separa a los países y la masa de las baterías. Esto hace pensar, que medioambientalmente es recomendable producir las baterías en el entorno, del lugar donde serán utilizadas.

Para China, se puede observar que parte importante del impacto de producir las baterías corresponde a la importación de carbonato de litio y cobre, materiales en los que Chile es el mayor productor mundial.

Para la importación de materiales a Chile, las materias primas que causan mayor impacto son grafito y níquel provenientes de Brasil, aluminio proveniente de Argentina, aglutinante importado desde China y electrolito proveniente desde los Estados Unidos.

Finalmente, dadas las consideraciones vistas, para reducir el impacto medioambiental si se desea satisfacer una demanda estadounidense es más conveniente fabricar baterías en Chile que en China, en lo que se refiere al impacto medioambiental del transporte. Pero probablemente, sea aun más conveniente el fabricarlas en los Estados Unidos, en el aspecto mencionado.

Capítulo 5: Conclusiones y trabajo futuro

5.1. Conclusiones:

Se cumple el objetivo general de este trabajo, ya que se ha desarrollado un modelo computacional que representa el proceso de fabricación de baterías de ión de litio, partiendo por la obtención de sus materias primas y terminando en la producción de vehículos eléctricos o híbridos, lo que permite obtener su valor actual neto y su huella de carbono. Sin embargo, ha sido construido de forma tal que no es necesario implementar el proceso completo en el modelo. Los resultados que se obtienen terminan con la venta de baterías para PHEVs, no de vehículos, pues evaluar esto, requiere información de la que no se dispone. Tampoco se obtiene la huella de carbono del proyecto completo, sino que sólo del transporte de: materias primas de cantidades conocidas y baterías terminadas, pues no se dispone de información suficiente para evaluar el impacto medioambiental del proyecto completo.

El modelo calcula los valores actuales de los costos de cada una de las actividades y del transporte de los productos, además de la huella de carbono del transporte, desde el inicio, hasta el horizonte de evaluación del proyecto. Lo anterior, sumado al conocimiento del costo de cada producto envuelto en el proceso productivo y la emisión de gases de efecto invernadero debida al transporte de cada producto, permite tener una idea de qué factores son más relevantes para las consecuencias económicas y medioambientales del transporte en el proyecto.

Durante este trabajo, se ha recolectado información, comprendido el proceso de fabricación de baterías de ión de litio y comprendido su mercado, para construir el modelo de dicho proceso.

En la verificación del modelo implementado como herramienta computacional, se utilizó información con estimaciones del año 2000, mezclada con información contemporánea, por lo que sus resultados no representan necesariamente la realidad actual. Sin embargo, el desarrollo propuesto permiten observar qué es posible evaluar un proyecto de fabricación de baterías de ión de litio y que sus resultados son consistentes, lo que verifica el modelo.

Los resultados finales que se tienen, se basan en los casos analizados en el Capítulo 4, corresponden a la elaboración de baterías, con cátodo de material activo NCA y ánodo de grafito, para PHEV, en este se puede observar que el proceso es económicamente rentable si se cumplen condiciones establecidas y no lo es si se cumplen otras, según los casos vistos. Las consideraciones tomadas pertenecen a distintas referencias y fechas. En el caso I, evaluando el proyecto con las consideraciones más conservadoras, el resultado no era rentable. En el caso II, se consideraron los menores costos de las materias primas encontrados, con los que se logro reducir las pérdidas del proyecto, pero aun no era rentable. Para el caso III, se buscaron consideraciones sobre el transporte y decrecimiento de los costos de los procesos productivos, que permitieran que el proyecto sea rentable, se alcanzo rentabilidad cuando los procesos productivos tienen un decrecimiento exponencial de sus costos, del 20% anual y el costo del transporte es de un 52% de los encontrados (en sitios de empresas de correo). Es importante tener

en cuenta que el proyecto evaluado considera baterías con cátodos de NCA, las cuales son de un costo particularmente elevado, debido a la necesidad de níquel y cobalto [4]. También se debe tener presente, que para obtener el valor de realizar la producción de láminas de aluminio, cobre, contenedor, tapa y otros elementos a nivel de celda, se consideró el costo de estos productos en el extranjero. Lo anterior, sin descontarles el valor de sus materias primas, cuya importación se considera independientemente, debido a la falta de buenas estimaciones y que la producción de las láminas se sabe que es China (por tanto, más barata que en Chile). Otro punto es la fabricación de material activo del cátodo, donde para estimar su valor se utiliza el costo de un material activo de referencia, descontándole el costo de las componentes del material activo importadas (y conocidas) debido a su alto valor. Sin embargo, no se descuenta su transporte, recordando que las componentes de las baterías NCA son particularmente caras.

Durante el desarrollo del modelo, se observó que es importante considerar los efectos de: las áreas de investigación y desarrollo sobre los costos de las actividades realizadas, los lugares de origen de las materias primas, los costos del transporte, variaciones de los costos de las materias primas, los costos de inversión y la capacidad de la planta instalada.

También se observa, qué sería útil para tener rentabilidad del proyecto el disponer de acuerdos sobre los precios con los proveedores de materias primas, los transportistas y los clientes y o beneficios por parte del gobierno. Para tener una mayor seguridad sobre los resultados del proyecto, de lo contrario la incertidumbre puede causar el descarte de un proyecto.

En los casos vistos, al comparar la emisión de gases de efecto invernadero, del transporte de materiales y baterías, entre la producción Chilena y China, para un Cliente Estadounidense, se observa que: Las emisiones de gases de efecto invernadero, de la importación de materias primas, muestran ser cercanas entre la producción Chilena y la producción China. Sin embargo, el envío de bancos de baterías terminados, desde Chile hasta U.S.A. tiene considerablemente menos emisiones que desde China. Esto se debe a la menor distancia que recorren las baterías terminadas desde Chile. El impacto medioambiental debido al transporte, para el caso analizado en que se fabrican baterías de ión de litio en Chile, muestra ser menor que el impacto medioambiental debido al transporte, en el caso estudiado en que se fabrican baterías en China.

Finalmente, respecto de las consecuencias medioambientales, se puede decir que es conveniente que el productor de baterías este en las cercanía con el consumidor, debido a que el transporte de las baterías terminadas, es considerablemente más contaminante respecto de la distancia recorrida, que el de la importación de materias primas, debido a que su masa es mayor que la de las materias primas, por unidad transportada.

Considerando, que los Estados Unidos fabrican baterías e incentivan su fabricación de forma importante [1], no se considera que la fabricación en Chile sea necesariamente la más adecuada medioambientalmente. Por otro lado, puede que sea más adecuada que los fabricantes existentes, para el consumo Chileno y Latinoamericano.

En los Estados Unidos de América, se ofrecen grandes facilidades económicas a fabricantes relacionados con la manufactura de baterías, por parte de su departamento de energía, mediante fondos, créditos de bajos intereses e incentivos tributarios, que llegan al orden de miles de millones de dólares [1]. Esto dificulta la opción de competir con los Estados Unidos, en la producción de baterías.

5.2. Trabajo futuro:

Basados en las conclusiones, se propone que se genere un equipo multidisciplinario, que realice las siguientes actividades:

1. Investigar, los posibles mercados de baterías presentes en Chile y Latinoamérica, además de las características necesarias para las baterías en dichos mercados (ej. baterías para sistemas de riego, baterías para motocicletas, baterías para vehículos convencionales que puedan ser reemplazadas, baterías para instrumentación en minería, etc.).
2. En paralelo a la actividad anterior, investigar los costos fabricar o ensamblar cada tipo de batería, con diferentes características de la planta productora y las baterías. Para luego, construir un modelo computacional que permita obtener los costos de producir las baterías de los distintos tipos, de acuerdo a las características del mercado que se desea satisfacer.
3. Analizar los costos de satisfacer los mercados presentes en Latinoamérica con el modelo construido, en relación a los precios que los clientes están dispuestos a pagar. Para luego, determinar si el proyecto es rentable.

Anexos

Anexo A : El litio

Corresponde al tercer elemento de la tabla periódica, de símbolo Li, tiene número atómico 3, pertenece al grupo de los metales alcalinos y es el más liviano de todos los elementos sólidos, con una densidad de: $0.534[\text{g}/\text{cm}^3]$ [31].

En Chile, el litio es extraído principalmente por 2 compañías SQM (Sociedad Químico y Minera de Chile) y Rockwood Lithium [27]. Para extraer el litio, es necesario acopiar salmuera proveniente de salares en posas donde se evapora agua para aumentar la concentración de materiales en la solución. Esta solución es enviada a plantas en las que se producen carbonato de litio e hidróxido de litio. Estos productos son enviados a diversos lugares fuera de Chile, para la producción de litio metálico y otros derivados, de acuerdo a especificaciones definidas [32].

El salar de Atacama ofrece una alta concentración de litio en la salmuera, es el segundo mayor depósito de litio a nivel mundial y tiene la mayor tasa de evaporación a nivel mundial. Por lo anterior, la extracción de litio desde este salar es barata y de poco consumo energético. Sin embargo, la mayor cantidad de litio se encuentra en el salar Uyuni, Bolivia [29].

Anexo B : Acumulador reversible

Otra forma de llamar a las baterías, es acumulador reversible, en la referencia [33], donde se encuentra la información expuesta a continuación, se las nombra acumuladores reversibles, por lo que se ha mantenido su designación.

Los acumuladores reversibles, son dispositivos capaces de entregar energía eléctrica a un circuito eléctrico exterior, a partir de energía contenida en sustancias químicas en su interior y de acumular energía química en su interior, a partir de energía eléctrica suministrada desde un circuito exterior.

En todos los acumuladores reversibles, siempre existe un circuito eléctrico interior y otro exterior. El circuito eléctrico interior, está compuesto por: la sustancia activa del polo positivo (cátodo), el electrolito y la sustancia activa del polo negativo (ánodo). Mientras que el circuito eléctrico exterior, está compuesto por: los conductores que soportan y contienen los materiales activos de los polos, los bornes de conexión eléctrica al circuito exterior, el cableado exterior y los consumos.

El electrolito, es una solución cuyas moléculas al disolverse se disocian, en iones negativos y positivos. Al aplicar, un campo eléctrico a la solución, los iones disueltos se mueven en la dirección del campo de acuerdo a su polaridad, estableciendo una corriente eléctrica. El electrolito es conductor de electricidad, gracias a los iones, al moverse los iones en el electrolito colisionan con moléculas del solvente y entre sí, lo que produce pérdidas de energía que se representan mediante una resistencia equivalente.

Durante la descarga, la sustancia activa del polo negativo se combina con la del electrolito, formando sustancias de un menor nivel energético que las sustancias originales, los átomos de la superficie de contacto se ionizan, formando iones positivos. En este proceso, los electrones de valencia del electrodo se dirigen hacia su interior. Los iones positivos formados se orientan para combinarse con los iones negativos del electrolito, formando una barrera de potencial. De igual manera, la sustancia activa del polo positivo, formará compuestos de menor nivel energético que las sustancias originales, al estar en contacto con el electrolito sus átomos superficiales se ionizarán, formando iones negativos, extrayendo electrones de valencia del circuito exterior, difundiendo huecos hacia el interior del material activo. Los iones negativos formados se orientan para combinarse con los iones positivos del electrolito, formando así otra barrera de potencial (pero de polaridad opuesta que la antes vista). Para la carga ocurre el proceso contrario.

Debido a que el nivel energético de las sustancias creadas es menor que el de las originales, estas reacciones liberan energía, pero las barreras de potencial creadas en ambos electrodos impiden que se produzcan, a menos que se incorpore un circuito eléctrico exterior.

Anexo C : Baterías de ión – litio

I. Características de las baterías de ión - litio:

En [34], se pueden encontrar las siguientes características de las baterías de ión de litio:

- Debido a los materiales en que se construyen las baterías de litio, éstas tienen una alta densidad de energía, lo que implica que son livianas para la cantidad de energía que pueden almacenar.
- Tienen una baja tasa de auto-descarga, lo que significa que mantienen su carga por largos periodos de tiempo. (auto-descarga: causada por el flujo de electrones en la batería a pesar de no tener un consumo conectado).
- No tienen efecto memoria: esto significa que no tienen que ser completamente descargadas o cargadas, para mantener su capacidad de carga completa.
- Tienen un largo ciclo de vida, lo que significa que pueden ser cargadas y descargadas muchas veces, sin un notorio deterioro de su capacidad.
- Su vida de servicio disminuye con la edad, esto significa que su capacidad disminuye gradualmente con el tiempo, debido a un incremento en su resistencia interna, lo cual hace el problema más pronunciado en aplicaciones de alta corriente.
- Son sensibles a las altas temperaturas, almacenamiento u operación en altas temperaturas causa una degradación mucho más rápida.
- Pueden dañarse severamente debido a descargas profundas, es decir, al descargar las baterías bajo un umbral dado por el fabricante. Esto encarece su valor pues produce la necesidad de circuitos para controlarlas.
- Dependiendo del tipo de baterías de litio, existen aquellas que posibilitan la combustión debido a las reacciones químicas en ellas.

Debido a sus características, las baterías de litio actualmente son uno de los tipos de mayor desarrollo y proyección.

II. Las baterías de ión de litio y los vehículos eléctricos

En [35], se encuentran las siguientes características de los vehículos eléctricos e híbridos y baterías de litio:

Los vehículos eléctricos (EV), se mueven gracias a la tracción proveniente de motores eléctricos. Su potencia proviene de una fuente de energía eléctrica.

En los vehículos híbridos (HEV), se utiliza la máquina a combustión interna para producir la energía tanto para la máquina eléctrica como para la batería. Según su conexión los HEV se dividen en 2 tipos:

- En el caso de HEV serie, toda la tracción proviene del motor eléctrico, el cual a su vez es alimentado por la batería, la cual es cargada desde el motor a combustión interna.
- En el caso de HEV paralelo, la potencia usada para mover el vehículo proviene tanto directamente el motor a combustión interna como del eléctrico. La batería es cargada

con la máquina eléctrica funcionando como generador tomando potencia desde la transmisión, producida por el motor a combustión interna.

Ambos tipos de HEV permiten regeneración de energía durante frenado y desaceleración, momento en que la máquina eléctrica es utilizada como generador.

Los HEV emiten CO₂ a la atmósfera, para reducir este efecto se tienen variantes que se pueden conectar a la red eléctrica, “Plug-in HEV” o PHEV, que permiten la carga de la batería con una referencia externa al vehículo, reduciendo este problema.

Las baterías están formadas por un conjunto de celdas, conectadas en serie o paralelo, de acuerdo a su diseño. Cada celda debe tener monitoreo y control de: temperatura, voltaje y corriente. Los parámetros medidos son generalmente los siguientes:

Estado de carga (“State of Charge” SoC): mide la condición de carga de la batería, según las características de su tensión y corrientes.

Estado de salud (“State of Health” SoH): estima la condición de envejecimiento de la batería, la ecuación para medirla es la siguiente:

Ec. 3: SoH

$$SoH = \frac{\text{Capacidad Nominal} - \text{Pérdida de capacidad}}{\text{Capacidad Nominal}}$$

La pérdida de capacidad puede ser una magnitud compleja de estimar.

En [2] se encuentran las características que hacen relevantes a las baterías de ión de litio para la utilización en vehículos eléctricos e híbridos y las limitaciones que deben superar, expuestas a continuación.

Los vehículos eléctricos, han cobrado relevancia debido a que permiten una reducción de las emisiones de CO₂ a la hidrógeno (siempre y cuando no se emita más CO₂, para cargarlos en la generación de electricidad [36]). Sin embargo, tienen una dificultad: necesitan formas económicas en volumen y masa para almacenar energía. Es allí donde cobran relevancia las baterías de ión de litio. Son mejores en este ámbito que las de NiMH y sus costos se reducen más rápidamente con la producción masiva. Otro punto a favor de las baterías de ión de litio, es que sus materiales pueden ser diversos, lo que permite particularmente una mayor reducción de costos por sustitución de materiales.

Para masificar su utilización, deben satisfacer limitaciones enumeradas a continuación:

1. La energía que deben ser capaces de almacenar, este término usualmente se expresa como densidad de energía, por unidad de volumen (Wh/l) o energía específica, por unidad de masa (Wh/Kg). Esta categoría es importante porque define la autonomía del vehículo, dependiendo sólo de las baterías. La densidad de energía es más importante para EV y PHEV que para HEV, debido a que estos últimos utilizan las baterías para recuperar la energía del frenado y proveer potencia adicional al acelerar.
2. La potencia que deben ser capaces de entregar, del mismo modo la potencia se expresa por unidades de volumen o masa, como densidad de potencia (W/l) o potencia específica (W/Kg). Es importante porque se traduce en la fuerza motriz que acelera el vehículo. La densidad de potencia es más importante para HEV que para PHEV y EV, debido a que estos últimos tienen baterías de mayor tamaño, lo que permite que aun se entregue una potencia adecuada con baterías de menor densidad de potencia.

3. Su vida útil debe ser lo suficientemente alta, en dos ámbitos, el número de ciclos de carga y descarga, así como su vida de servicio sin alcanzar este límite. Se espera que las baterías duren 15 años o 150.000 millas, lo que se traduce en miles de ciclos de carga-descarga, según la aplicación y el uso.
4. La seguridad de su utilización debe ser adecuada, el embalamiento térmico de una batería de un computador portátil puede ser peligroso, pero las consecuencias del mismo suceso para una batería de un vehículo eléctrico pueden ser fatales.
5. El costo de la batería, debe permitirle al vehículo eléctrico competir con los tradicionales vehículos a combustión interna.

De las limitaciones recién nombradas, la que más dificulta el ingreso al mercado masivo de los vehículos eléctricos con baterías de ión de litio es el precio. Sin embargo, su éxito puede ser favorablemente sensible a la volatilidad de los valores del combustible fósil.

Otro punto que se debe tener en cuenta, es que la energía que las baterías son capaces de almacenar, es más importantes para PHEV y EVs que para HEVs. Los HEVs utilizan pequeñas baterías para entregar aceleración complementaria y para recuperar energía durante el frenado (y cuando se evita que el vehículo se acelere en descensos). A la vez que PHEVs y EVs deben permitir una mayor autonomía sólo con energía almacenada en las baterías.

La potencia, es especialmente importante para HEVs, pues éstos tienen baterías de menores dimensiones, lo que genera que necesiten baterías de mayores densidades de potencia.

Independiente de la química de la celda, se puede optimizar la densidad de energía o potencia. Al aumentar la cantidad de material activo en los electrodos, se aumenta la densidad de energía de la celda y el grueso de los electrodos. Esto aumenta la impedancia interna de la celda, lo que disminuye su densidad de potencia.

Lo recién enunciado, resulta en que es posible utilizar el mismo tipo de baterías (respecto de materiales y empaquetamiento), con distintas cantidades de materiales activos para distintos objetivos, sea alta densidad de potencia (para HEVs) o alta densidad de energía (PHEVs o EVs).

En la referencia [1], se expone la capacidad para cada tipo de vehículos:

Tabla 50: Capacidades de vehículos [1]

| Vehículo | Capacidad | |
|-------------------|-----------|-------|
| HEV: | 1 a 2 | [kWh] |
| PHEV: | 5 a 15 | [kWh] |
| EV (nissan leaf): | 24 | [kWh] |

III. Competencia de las baterías de ión - litio:

Existen dos tecnologías de almacenamiento de energía capaces de competir con las baterías de ión de litio, éstas son las celdas de hidrógeno y los ultra-capacitores. Éstas son descritas en [2].

En el caso de celdas de hidrógeno, éstas permiten el almacenamiento de energía en forma de hidrógeno, al igual que un vehículo a combustible convencional requiere que se recargue el combustible por lo que requiere una infraestructura que permita la generación, el transporte y la distribución de hidrógeno. Las formas de mantener el hidrógeno en los vehículos también comprenden a tecnologías que deben ser perfeccionadas. Esta forma de almacenamiento de energía carece de la habilidad de recargarse durante el frenado y los descensos en que se controla

la velocidad, por lo que se complementa con la utilización de baterías para aprovechar la energía de éstas instancias.

Los ultra-capacitores, almacenan energía en forma de electrones acumulados electrostáticamente. Son elementos muy eficientes, se pueden cargar y descargar rápidamente, pueden funcionar a extremas temperaturas y no se degradan con los ciclos de uso. Esto implica que tienen una alta densidad de potencia. Sin embargo, no tienen una buena densidad de energía, es por esta razón que se los considera apropiados para su uso en conjunto con baterías de ión de litio de alta densidad de energía. En EV o PHEV, el utilizar este conjunto dejando las absorciones de potencia desde el frenado regenerativo y las entregas de potencia durante aceleraciones al ultra-capacitor, permite liberar la batería de variaciones bruscas de corriente, aumentando su vida útil.

Tomando en cuenta lo escrito recién, estas tecnologías pueden ser muy bien complementarias al uso de baterías de ión de litio en vehículos eléctricos e híbridos.

Anexo D : Proyecciones de demanda de vehículos eléctricos en los Estados Unidos:

Es la referencia [37], se obtiene las predicciones de la demanda en los Estados Unidos de América, según 2 estudios y los distintos escenarios descritos a continuación:

- I. En el informe “*The Comeback of the Electric Car*” de enero del 2009, por parte de “Boston Consulting Group” se plantean 3 escenarios, para las ventas de vehículos eléctricos al año 2020.
 1. En el primer escenario el combustible mantiene su precio a niveles bajos (US\$60 el barril) y la industria automotriz no es vista como una causa del calentamiento global.
 2. En el segundo escenario el combustible sube a US\$150 el barril, existe un desarrollo adicional en la industria de los vehículos eléctricos y se mantiene una preocupación por el cambio climático.
 3. El tercer escenario plantea que las emisiones de CO_2 pasan a ser un asunto urgente, por lo que el gobierno estadounidense interviene aumentando de forma radical la penetración de los vehículos eléctricos.

A continuación, se muestra una tabla con las ventas proyectadas de acuerdo a las descripciones recién realizadas.

Tabla 51: Proyecciones BCG de ventas de vehículos eléctricos que utilizan baterías (BEV) en los Estados Unidos de América

| | | Escenario 1 | Escenarios 2 | Escenario 3 |
|---|----------------------------|-------------|--------------|-------------|
| Vehículos eléctricos puros (EV) | Ventas: | 62.110 | 399.500 | 1.035.000 |
| EV | Penetración en el mercado: | <1% | 1,90% | 5,00% |
| Vehículos híbridos con conexión para alimentación (PHEV) | Ventas: | 62.100 | 621.000 | 1.035.000 |
| PHEV | Penetración en el mercado: | <1% | 3,00% | 5,00% |
| Vehículos híbridos (HEV) | Ventas: | 3.726.000 | 5.382.000 | 6.624.000 |
| HEV | Penetración en el mercado: | 18,00% | 26,00% | 32,00% |
| Total: | Ventas: | 3.850.210 | 6.402.500 | 8.694.000 |
| Total: | Penetración en el mercado: | 18,00% | 30,90% | 42,00% |

II. En junio del 2008, “Deutsche Bank”, publicó un informe con estimaciones de ventas de vehículos eléctricos y baterías de ión de litio, entre los años 2015 y 2020, proyectando un crecimiento lineal en estos años, posiblemente sin considerar descensos del precio del combustible ocurridos después del 2008, asumieron además el costo de la batería en aproximadamente US\$ 11.000, de unos 25 [kWh] y que tanto el gobierno como los modelos de comercio favorecerían el desarrollo del mercado de EVs. Si bien las ventas de EVs proyectadas en este informe son similares a las del segundo escenario del informe mencionado antes, la penetración de los vehículos eléctricos en el mercado es mucho mayor.

Tabla 52: Proyecciones Deutsche Bank de ventas BEV, entre los años 2015 y 2020 en los Estados Unidos de América

| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ventas de EV | 188.000 | 230.000 | 312.000 | 359.000 | 406.000 | 414.000 |
| Penetración en el mercado de EV | 1,00% | 1,20% | 1,60% | 1,80% | 2,00% | 2,00% |
| Ventas de BEV | 4.129.000 | 5.361.000 | 6.444.000 | 7.967.000 | 9.142.000 | 10.154.000 |
| Penetración en el mercado de BEV | 22,00% | 28,00% | 33,00% | 44,00% | 45,00% | 49,00% |

Anexo E : Evaluación de proyectos

Entre las Secciones Anexo EI y Anexo EIV, la información es extraída desde la referencia [38]. Para la Sección Anexo EV, se utiliza la referencia [39].

I. Matemática financiera

Para poder evaluar de forma financiera este proyecto, así como cualquier otro es necesario tener ciertas nociones de matemática financiera que permitan su caracterización y comparación.

Primer principio financiero: Dado que el dinero puede invertirse, para generar un valor de dinero mayor en un futuro, “un dólar hoy, vale más que un dólar mañana”. De este efecto se define r , la tasa de descuento que representa el costo de oportunidad de invertir el dinero en una alternativa de negocio.

Interés simple: interés ganado o pagado, calculado sobre un capital constante en el tiempo al término de la transacción.

Ec. 4: interés simple

$$C_n = C_0(1 + n * i)$$

n es el número de cobros e i es la tasa de interés

Interés compuesto: en este caso se considera que el interés ganado sobre el capital, si a él se añade al original para una serie de pagos

Ec. 5: interés compuesto

$$C_n = C_0(1 + i)^n$$

n : es el número de cobros e i es la tasa de interés

Valor futuro es el valor alcanzado por un capital al final de periodo mientras que, el valor actual es el valor equivalente hoy de un capital a recibir al luego de un periodo.

Si se recibe C_n al final de n cobros, se calcula su valor actual descontando los cobros futuros esperados a la tasa de descuento definida por una alternativa comparable.

Ec. 6: Cálculo de valor actual para una cuota después de n cobros

$$VA = \frac{C_n}{(1+r)^n}$$

Valor actualizado neto: medida del valor neto en la actualidad de flujos de caja futuros.

Ec. 7: Cálculo de valor actualizado neto o valor actual neto

$$VAN = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

Las inversiones pueden realizarse en distintos activos, estos pueden ser:

- Tangibles o físicos, como lo son la maquinaria y los edificios,
- Intangibles, como patentes y marcas,
- Financieros, como acciones o bonos.

Al invertir, se busca encontrar activos cuyo valor supere su costo, por tanto es necesario valorar correctamente los activos. Incorporando el tema del riesgo a la inversión, se puede observar que aquellos negocios que presenten mayor riesgo tendrán que ofrecer una mayor rentabilidad para ser atractivos a los inversionistas.

De múltiples maneras, es posible enfrentarse a tener que realizar una serie de pagos iguales denominados anualidades, al referirse a pagos anuales, con una determinada tasa de descuento o de interés para calcular su valor presente. De forma inversa dado un valor presente es posible calcular el valor de cada cuota. Lo mismo puede realizarse para la relación entre valor final con una serie de pagos.

Se definen entonces como: equivalencias financieras, el valor actual de una serie de pagos, el valor final de una serie de pagos y la misma serie de pagos.

Casos que son utilizados en el trabajo son los siguientes:

- i. Para representar el costo de inversión en un activo, desde el momento en que se compra el activo, mes 0, hasta la cuota $N=n-1$, donde n es su vida útil. Las cuotas se consideran todas iguales a C y la tasa de descuento a r . Se pueden calcular las cuotas y el valor actual, el uno respecto del otro como sigue:

Ec. 8: Valor actual de una serie de pagos

$$VA = \sum_{i=0}^N \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

Desarrollo:

$$VA \left([1+r] - 1 \right) = \sum_{i=0}^N \frac{C_i}{(1+r)^{i-1}} - \sum_{i=0}^N \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

$$VA(r) = (C) * \left[\sum_{i=0}^N \frac{1}{(1+r)^{i-1}} - \sum_{i=0}^N \frac{1}{(1+r)^i} \right]$$

$$VA(r) = (C) * \left[(1+r) - 1 + 1 - \frac{1}{1+r} + \frac{1}{1+r} - \dots + \frac{1}{(1+r)^{N-1}} - \frac{1}{(1+r)^N} \right]$$

$$VA * r = C * \left[(1+r) - \frac{1}{(1+r)^N} \right]$$

$$VA = C * \left[1 + \frac{1}{r} \left(1 - \frac{1}{(1+r)^N} \right) \right]$$

Ec. 9: Valor de cada cuota para una inversión

$$C = \frac{VA}{\left[1 + \frac{1}{r} \left(1 - \frac{1}{(1+r)^N} \right) \right]}$$

- ii. Para calcular las cuotas de un crédito, dado que la deuda adquirida en el crédito es D , con tasa de interés r , se realizan N pagos iguales a C desde el primer mes hasta el mes N .

Ec. 10: Deuda en función de las cuotas

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

Desarrollo:

$$D([1+r]-1) = \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{(1+r)^{i-1}} - \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

$$D([1+r]-1) = \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{(1+r)^{i-1}} - \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

$$D(r) = (C) * \left[1 - \frac{1}{1+r} + \frac{1}{1+r} - \frac{1}{(1+r)^2} \dots + \frac{1}{(1+r)^{N-1}} - \frac{1}{(1+r)^N} \right]$$

$$D * r = C * \left[1 - \frac{1}{(1+r)^N} \right]$$

$$D = \frac{C}{r} * \left[1 - \frac{1}{(1+r)^N} \right]$$

Ec. 11: Valor de cada cuota para una deuda

$$C = D * \frac{r}{\left[1 - \frac{1}{(1+r)^N} \right]}$$

II. Indicadores para la evaluación de proyectos

Para poder ordenar proyectos, según conveniencia para un inversionista o para optimizar decisiones tomadas en un proyecto, se definen indicadores que lo permiten. Las variables necesarias para definir los indicadores son:

- Los flujos de caja del proyecto “ F_t ”: Utilidad del proyecto en el periodo t para quien está evaluando el proyecto.
- La tasa de descuento o costo de oportunidad del capital “ r ”: corresponde a la rentabilidad esperada por el mejor uso alternativo del capital, para un mismo nivel de riesgo (más riesgo implica exigir más rentabilidad, como premio o compensación por riesgo). Las rentabilidades exigidas en definitiva son diferentes para cada inversionista y finalmente el mercado es quien determina un la rentabilidad que se exige a cada nivel de riesgo (existe precio por riesgo).
- El horizonte de evaluación: Periodo en que termina la evaluación del proyecto.

Existen diversos indicadores para la evaluación económica de proyectos, sin embargo, en el modelo sólo se utiliza el VAN, por lo que este se describe a continuación.

Valor actual neto (VAN):

Este indicador, mide el aporte económico de un proyecto a inversionistas. En consecuencia, depende de los flujos de caja estimados y la tasa de descuento aplicada.

Ec. 12: Valor actualizado neto

$$VAN = \sum_{t=1}^N \frac{FC_t}{(1+r)^t}$$

FC_t : Flujo de caja en el periodo t

r : Tasa de descuento

N : Número de periodos hasta el horizonte de evaluación.

Si el VAN del proyecto es mayor que cero, es conveniente realizarlo, si es igual a cero es indiferente y si es menor que cero no conviene realizarlo, respecto de la alternativa implícita en la tasa de descuento.

El VAN debe calcularse con valores esperados para los flujos de caja y una tasa de descuento acorde al nivel de riesgo. Se caracteriza por: considerar el tiempo y el riesgo, cada proyecto tiene un valor y existe un criterio para aceptarlo, es posible hacer ranking de proyectos y permite comparar proyectos de diferentes niveles de riesgo.

III. Los flujos de caja

La elaboración de un flujo de caja de un proyecto, permite ordenar la información y obtener indicadores económicos del proyecto.

Un flujo de caja se compone de 3 partes:

- i. Flujos de inversiones,
- ii. Ingresos de operación o beneficios,
- iii. Costos de operación.

Éstas partes se basan en un set de parámetros estimados, cuyo nivel de precisión aumentará a medida se investiga y desarrolla el proyecto.

Se entiende por costo, al valor de cualquier recurso económico utilizado en el proyecto y por beneficio a cualquier efecto del proyecto que genere ingresos o ahorro de costos.

El flujo de caja neto, es la diferencia entre los ingresos y egresos de caja que genera el proyecto (depende de la persona que evalúa).

El flujo de caja, puede evaluar que se utilice distintos niveles de financiamiento con deuda o sin deuda. También es posible, construir flujos de caja que sólo consideren ingresos y costos incrementales, olvidándose de los costos irrecuperables.

Ec. 13: Flujo de caja incremental

$$F.C. \text{ incremental del proyecto} = F.C. \text{ con proyecto} - F.C. \text{ sin proyecto}$$

Dentro de sus consideraciones se encuentran:

- Horizonte de evaluación: Se determina por las características del proyecto y por necesidades o intereses de los inversionistas.
- El momento en que ocurren los flujos: Los ingresos y egresos de un proyecto pueden ocurrir en distintos días, meses, años o de forma continua. Por simplicidad se considera que ocurren en un determinado instante.
- Los flujos pueden considerarse en moneda nominal o real: Debe existir consistencia entre la tasa de descuento que se utiliza y el tipo de moneda.
- Principio del devengado: Independientemente del momento en que ocurren los flujos de dinero, contablemente se considera a los ingresos y egresos en el momento en que se incurre en ellos. Tiene las consecuencias:
 - i. Se produce depreciación: es la disminución del valor de un activo. La depreciación no es un gasto, pero tributariamente se considera como si lo fuese, afecta el flujo de caja de los impuestos.
 - ii. Los ingresos por ventas, costos por ventas y gastos por periodo no necesariamente coinciden con los ingresos y egresos de efectivo.
- Valor libro: Valor inicial de un activo menos la depreciación acumulada

- Ganancia de capital: Diferencia entre el valor de venta y el valor libro de un activo.

Sintetizando entonces:

Ec. 14: Flujo de caja

$$F.C. = F.C. Operativo + F.C. de Capitales$$

Ec. 15: Flujo de caja operativo

$$F.C. Operativo = Utilidad Contable + gastos que no son flujo de efectivo$$

Ec. 16: Flujo de caja de capitales

$$F.C. de Capitales = - Inversión + Valor residual$$

- Financiamiento de un proyecto: desde un punto de vista contable y tributario, sólo los intereses son considerados gastos deducibles de impuestos, el flujo del préstamo y las posteriores amortizaciones no son deducibles de impuestos.

Estructura del flujo de caja:

Dentro de los elementos que componen la estructura del flujo de caja se encuentran:

- Ingresos por ventas: Ingresos por venta de bienes o servicios.
- Intereses por depósitos: Ganancias obtenidas por depósitos bancarios.
- Otros ingresos: Rentas por inversiones, arriendos, etc.
- Costos fijos: Aquellos que no dependen del nivel de producción.
- Costos variables: Aquellos que dependen del nivel de producción.
- Gastos financieros: Intereses por deuda.

IV. Costos

i. Enfoques de estimación de costos

Se pueden clasificar de 2 maneras:

- a. Enfoque ascendente o “*bottom up*”: En este enfoque se identifican los componentes del costo, se valorizan y se suman, para obtener los costos directos. Luego, se agrega el margen de utilidad deseado y los costos indirectos para obtener el precio de venta del producto. Considera el precio como una variable de salida.
- b. Enfoque descendente o “*Top down*”: Este enfoque considera el precio como una variable de entrada, el precio es el de mercado y en base a él se estiman los costos. Lo anterior implica que este enfoque se aplica mejor en las primeras etapas del proyecto.

ii. Clasificación

- a. Según el área que consume: De este modo los costos se pueden clasificar de 4 maneras:
 1. Producción: son aquellos que se generan al transformar materias primas en productos terminados.

2. Distribución: Aquellos que se producen por llevar el producto o servicio hasta el consumidor final.
 3. Administración: Costos generados en áreas administrativas de la empresa
 4. Financiamiento: Generados por el uso de recursos de capital.
- b. Según su identificación con la producción: Se divide de 2 formas: los directos son aquellos que pueden identificarse con un producto o servicio y los indirectos son aquellos que no se pueden asignar a un producto o servicio de forma sencilla, ya que se conocen de forma global para la empresa completa o un conjunto de productos.
 - c. Según su el momento en que se calculan: Pueden ser tanto históricos los cuales son aquellos generados en un periodo anterior, como proyectados que son calculan en base a métodos estadísticos y son utilizados para elaborar presupuestos.
 - d. Según su grado de control: Se pueden dividir en dos, aquellos que son controlables, en los que la organización puede decidir si incurrir o no y aquellos que son no controlables, son gastos en los que la organización tiene poco o nulo control.
 - e. Según su periodicidad: pueden ser recurrentes o no, según si se repiten o no.
 - f. Según tipo y momento de desembolso: En esta clasificación se tienen los siguientes tipos:
 1. Efectivo: Son aquellos que generan una salida de efectivo y dan origen al flujo de caja.
 2. Contable o libro: Son aquellos que se reflejan en la contabilidad de la empresa pero no generan flujos de efectivo.
 3. De oportunidad: Corresponde al costo por la posibilidad de invertir los recursos en la mejor alternativa rechazada. Se debe a que los recursos son limitados.
 4. Hundido: Costos que ocurrió en el pasado y no afecta los costos e ingresos futuros, por lo que no se debe tomar en cuenta para decidir. Ej.: el costo de investigar si es rentable realizarlo o no, el proyecto conviene según como es evaluado, pero el costo de la investigación ya se gasto.
 - g. Según su comportamiento: Pueden considerarse 5 tipos de comportamientos de los costos:
 1. Fijos: Aquellos que no se afectan según el nivel de producción en un determinado rango de capacidad y plazo.
 2. Variables: Son aquellos asociados al nivel de operación, es decir que varían de acuerdo a la cantidad de producción.
 3. Semi-variables: Se componen por una parte fija y una variable. Se dividen en 2 tipos:
 - i. Mixtos: Tienen la partida en un punto fijo básico y a partir de este se comienzan a incrementar.
 - ii. Escalonados: Son aquellos que permanecen constantes hasta cierto punto, luego crecen hasta un nivel siguiente donde ocurre lo mismo.

4. Escalonados: Son aquellos en que los costos no cambian a medida aumenta la producción, hasta cierto punto, luego aumentan a un nuevo nivel en el que ocurre lo mismo sucesivamente.
- h. Costo marginal: Costo de producir una unidad adicional de producto.
- i. Costo estándar: Costo de referencia de un proceso o producto
- j. Costo de ciclo de vida: Se refiere, a todos los costos incurridos durante el transcurso de un proyecto. A grandes rasgos el ciclo de vida de un proyecto se divide en 2 etapas, la primera de “adquisición y construcción” y la segunda de “operación”. El costo del ciclo de vida, hace explícitos los efectos relacionados de los distintos costos durante el proyecto.

V. Estimaciones

La estimación tiene el fin de desarrollar proyecciones de flujos de efectivo, en ningún caso de generar datos exactos, lo que es prácticamente imposible.

Las estimaciones utilizadas en un proyecto pueden variar su nivel de precisión, este aumenta mientras, se pasa de planeación y evaluación inicial del proyecto a diseño preliminar o conceptual y luego a ingeniería de detalle o construcción del proyecto.

El nivel de detalle y precisión de las estimaciones dependen del tiempo, la capacidad disponible, la dificultad de estimar los conceptos, los métodos o técnicas empleadas y la sensibilidad de los resultados a factores particulares de las estimaciones.

Las estimaciones siempre tienen un error, pero estos pueden minimizarse si la información utilizada es confiable y los métodos adecuados.

i. Fuentes de datos para su estimación

- a. Contabilidad: Es un conjunto de procedimientos para mantener un registro del detalle de las transacciones monetarias. Los Datos generados por la contabilidad son la fuente principal de información para el análisis económico. Sin embargo, es probable que esta información no esté expuesta de forma apropiada para su uso en forma directa y sin ajustes. Esto se debe a diferentes motivos:
 1. Que las categorías en que se divide las componentes de la contabilidad son rígidas, pueden ser apropiadas para el análisis de decisiones de operativas y resúmenes financieros, pero raramente apropiadas para las necesidades del análisis económico y la toma de decisiones en el diseño de ingeniería y las alternativas al proyecto.
 2. La información es expuesta en la contabilidad tiende a basarse en filosofías muy conservadoras, para evitar despreciar el valor de las obligaciones y sobrevalorar los activos.
 3. Es frecuente que tengan precisión ilusoria.
- b. Otras fuentes de información dentro de la empresa: Típicamente las empresas poseen personas y registros, que son una buena fuente de información para realizar estimaciones. Ejemplos de buenas fuentes para un análisis económico son las áreas de ingeniería, ventas, producción, calidad, compras y personal.

- c. Otras fuentes externas a la empresa: Existen fuentes fuera de la compañía que pueden aportar información útil, pueden ser; contactos personales o diversas fuentes de información pública.
- d. Investigación y desarrollo: Es la única alternativa, si no se dispone de información por parte de otras fuentes. Un ejemplo es el desarrollo de una planta piloto y la conducción de pruebas de mercado. Por lo general son actividades caras que podrían no tener éxito, por lo que generalmente sólo se realiza si las fuentes mencionadas previamente son inadecuadas y las decisiones que se deben tomar muy importantes.

ii. Técnicas de estimación

A continuación, se exponen técnicas de estimación, para estimaciones de orden de magnitud y en muchos casos de semidetalle o presupuesto. Útiles en las primeras etapas de un proyecto, a nivel conceptual o preliminar. Sin embargo, también pueden ser útiles en la etapa de diseño detallado del proyecto, con la finalidad de reducir en número de estimaciones.

Índices: Número adimensional, que indica los costos o precios han variado con respecto a un año base. Permiten desarrollar estimaciones presentes y futuras de costos y precios, a partir de datos históricos. Los índices se rigen por la Ec. 17, también denominada técnica de la razón, ésta relaciona los precios o costos estimados en diversos momentos, con sus índices.

Ec. 17: Técnica de la razón

$$C_n = C_k \left(\frac{I_n}{I_k} \right)$$

Siendo C_k , el costo o precio conocido en un año de referencia k . C_n , es el costo o precio estimado en el año n . I_k , es el valor del índice en el año k . I_n , es el valor del índice en el año n .

Un índice, puede crearse para uno o varios artículos, un índice compuesto, se crea promediando las razones de los costos de una serie de artículos seleccionados, en un año en particular, respecto del costo en un año de referencia. Quien desarrolla un índice, puede asignar ponderaciones diferentes a los valores de costos de distintos artículos, de acuerdo a su contribución al costo total.

Técnica unitaria: Esta técnica implica el uso de un “factor por unidad”. Tales como: costo de mantenimiento por hora, ingresos por milla, costo de combustible por kilowatt-hora generado, ingresos por cliente atendido, ahorros totales por 500 horas de operación, etc. Al multiplicar los factores, por la unidad apropiada, se obtiene una estimación del costo total, los ingresos totales, ahorros totales, etc.

Técnica del factor: Extensión del método unitario, en la que se suma el producto de varias componentes, a componentes estimadas en forma directa. Esto se muestra en la Ec. 18.

Ec. 18: Técnica del factor

$$C = \sum_d C_d + \sum_m f_m U_m$$

Donde C es el costo que se desea estimar, C_d es el costo de la componente d estimado de forma directa, f_m es el costo por unidad de la componente m y U_m el número de unidades de la componente m .

Anexo F : Simulación utilizada

I. Simulación de sistemas basada en eventos discretos

Es el modelar sistemas, en los cuales las variables de estado cambian en instantes particulares en el tiempo (discreto). Los modelos de simulación son analizados de forma numérica no analítica, por lo que se dice que el modelo se “ejecutan” en lugar de “resolverse” [8].

La simulación basada en eventos discretos, permite que el sistema cambie su estado en instantes particulares, cada intervalos de duración variable. Emulando saltos en el tiempo evitando esperas o ejecuciones innecesarias [40].

Las siguientes definiciones, extraídas de la referencia [8], son útiles en este tipo de simulación.

- Sistema: Es un grupo de objetos relacionados por interacciones o interdependencias con el fin de llevar a cavo un propósito.
- Entidades: Objetos de interés en el sistema.
- Atributo: Es una propiedad de una entidad.
- Actividad: Representa un periodo de tiempo de extensión específica.
- Estado de un sistema: Colección de variables que contienen toda la información necesaria para describir el sistema en cualquier momento, de acuerdo a los objetivos del estudio.
- Eventos: son incidentes instantáneos que cambian el estado del sistema, una salida o la ocurrencia de otros eventos.
- Modelo: Representación de un sistema con el propósito de estudiarlo.

II. Simulación en planillas de calculo

Las planillas de cálculo en Excel y macros, permiten modelar las consecuencias de un proceso productivo, basado en operaciones que utilizan a las características del proceso y los elementos que interactúan en él.

i. Macros

En referencia a las macros se explican sus características, conceptos y funciones a continuación, extraídos de la referencia [41]:

Las macros, son conjuntos de instrucciones que se utilizan para automatizar acciones. Para utilizarlas, es necesario entender algunos conceptos de programación orientada a objetos.

- Objeto y clases: los objetos en programación orientada a objetos hacen referencia a elementos específicos dentro de una clase. Por ejemplo: un objeto puede ser una celda dentro de una hoja de cálculo o la una hoja de cálculo en particular, mientras que a la clase celda pertenecen todas las celdas existentes en el documento, así como a la clase hoja pertenecen todas las hojas del documento.
- Propiedades: Son características de los objetos, éstas propiedades se definen en la clase y particularizan para cada objeto, puede o no ser modificable.

- Métodos: cualquier proceso que implica un comportamiento de un objeto, se define en una clase para manifestarse en cualquiera de sus objetos.
- Conjuntos: Grupos de objetos del mismo tipo.
- Objetos de objetos: Es normal que existan objetos que son propiedades de otros objetos. Por ejemplo un rango de celdas en una hoja, es una propiedad de la hoja, pero también es un objeto.

Decir programación orientada a objetos no es lo mismo que decir programación basada en objetos, en la primera el programador es quien construye las clases a las que pertenecen los objetos que se utilizan, mientras que en la segunda el programador utiliza objetos pertenecientes a clases preexistentes, como ocurre en nuestro caso en la aplicación Excel. Esto nos permite que no sea necesario conocer la implementación de las clases sino que sólo sus propiedades y métodos para utilizarlos correctamente.

ii. Objetos en Macros

Los objetos presentes utilizados en este trabajo se exponen a continuación:

- “Sheets”: Objeto que corresponde al conjunto de las hojas de cálculo, así como “Sheets(1)” corresponde a la hoja de cálculo 1.
- “Range”: Objeto correspondiente a una celda o un rango de celdas. Un objeto “Range”, es una propiedad del objeto “Sheets(n)” con el que se esté trabajando.
- “Cells”: Objeto correspondiente a un conjunto de celdas. Del mismo modo que el objeto “Range”, es una propiedad de un objeto hoja de cálculo.
- “Rows” y “Columns”: propiedades del objeto hoja de cálculo que a su vez es un objeto que contiene un conjunto de filas y columnas respectivamente.

iii. Trabajo en Visual Basic

Para construir macros en Excel, se utiliza el editor de Visual Basic presente en este *software*. Para utilizar este editor en opciones de Excel se activa la tabla de desarrollador, en esta tabla para ingresar al editor se presiona el botón Visual Basic. También en la tabla de desarrollador, presionando macros, es posible seleccionar y correr las distintas macros construidas.

En el editor de Visual Basic, se debe crear un módulo en el que se escribirán las instrucciones, que formaran procedimientos y funciones que realizaran diferentes acciones.

Un procedimiento es un bloque de instrucciones encargado de llevar a cabo una tarea específica. Para iniciar un procedimiento se escribe en el módulo “Sub Nombre_procedimiento()” y para terminarlo se escribe “End Sub”.

Una función se inicia en un módulo de la forma “function nombre_función (entrada)” y se termina con la línea “End Function”.

Bibliografía

| | |
|------|--|
| [1] | Marcy Lowe; Saori Tokuoka; Tali Trigg; Gary Gereffi. Investigación. «Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: The U.S. Value Chain,», Universidad de Duke, 2010. |
| [2] | David L. Anderson; Dr. Dalia Patiño-Echeverri, asesor. Investigación. «An Evaluation of Current and Future Costs for Lithium-ion Batteries for use in Electrified Vehicle Powertrain,», Universidad de Duke, 2009. |
| [3] | P. A. Nelson, D. J. Santini, J. Barnes. Artículo. «Factors Determining the Manufacturing Costs of Lithium-Ion Batteries for PHEVs,», Laboratorio Nacional de Argonne, 2009. |
| [4] | elementenergy; Axion; EaStCHEM. Investigación. «Cost and performance of EV batteries Final report for The Committee on Climate Change,» Cambridge, 2012. |
| [5] | Masaki Yoshio; Ralph J. Brodd; Akiya Kozawa. Libro. «Lithium-Ion Batteries Science and Technologies, » New York: Springer Science+Business Media, 2009. |
| [6] | T. Kumeuchi. Patente 20100062332. «Lithium Ion Secondary Battery». Japón (Sendai-Shi, JP), 11-3-2010. |
| [7] | Linda Gaines; Roy Cuenca. Investigación. "Costs of Lithium-Ion Batteries for Vehicles," , Laboratorio Nacional de Argonne, 2000. |
| [8] | Jerry Banks; John S. Carson II; Barry L. Nelson; David M. Nicol. Libro. "Discrete-Event System Simulation", Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. |
| [9] | Anu Maria. Artículo. «Introduction to Modeling and Simulation,» de <i>Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference</i> ed. S. Andradóttir, K. J. Healy, D. H. Withers, and B. L. Nelson, Binghamton, 1997. |
| [10] | International Energy Agency. Publicación. «Co2 Emissions From Fuel Combustion High Lights,» 2011. |
| [11] | Notgemeinschaft Der Flughafen-Anlieger Hamburg E.V. Página en internet. «Klimakiller Flugzeuge,» Holitzberg 120 - 22417 Hamburg - Telefax: 040/530 51 250, [En línea]. fluglaerm.de/hamburg/klima.htm . |
| [12] | International Energy Agency. Publicación. "Key World Energy Statics", 2011. |
| [13] | Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. Publicación. «Reportes de Emisión para los Sistemas Eléctricos,» 2011. [En línea]. http://huelladecarbono.minenergia.cl/descargas_FE.html . |
| [14] | Claudio Burgos, Estudiante de la carrera Ing. civil electricista, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile. Informe. «Proyecto: Construcción Caja Banco de Baterías de EOLIAN 2 para WSC,» Santiago, 2011. |
| [15] | Cotización a proveedor de baterías. LEO ENERGY PTE LTD, Singapur, 2011. |
| [16] | PikeResearch. Investigación «Executive Summary: Electric Vehicle Batteries Lithium Ion Batteries for Plug-in Hybrid and Battery Electric Vehicles: Market Analysis and Forecasts,» 2009. [En línea]. https://www.pikeresearch.com/wp-content/uploads/2009/12/EVB-09-Executive-Summary.pdf . |
| [17] | Paul Sankey; David T. Clark; Silvio Micheloto. Investigación. «The End of the Oil Age 2011 and beyond: a reality,» Banco Deutsche, 2010. |
| [18] | Ports.com. Sitio en internet. [En línea]. http://ports.com/ . 2010. |
| [19] | Lenntech (consorcio de tratamiento de agua y aire). Página en internet. «Elementos químicos ordenados por su densidad,» [En línea]. http://www.lenntech.es/tabla-peiodica/densidad.htm . |
| [20] | TNT Holding B.V. (empresa de correos). Sitio en internet. «Tnt Lit Cargo,» [En línea]. http://www.tnt.com/express/es_cl/site/home.html . |
| [21] | Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S. Geological Survey, USGS), 2012. Publicaciones. "Mineral Facilities of Asia and the Pacific" y "Mineral Facilities of Latin America and Canada" [En línea]. http://www.usgs.gov/ . |
| [22] | Comisión Nacional de Energía, [En línea]. Publicación. "Decreto con fuerza de ley n° 1". http://www.cne.cl/images/stories/normativas/otros%20niveles/electricidad/DOC02_-_DFL_N1.pdf . |
| [23] | Servicio de impuestos internos. Publicación. «Impuesto de Primera Categoría (Impuesto a las Utilidades),» [En línea]. http://www.sii.cl/portales/inversionistas/imp_chile/impuesto_primera.htm . |

| | |
|------|--|
| [24] | Bolsa de metales de londres. Sitio en internet. «London Metal Exchange,» [En línea]. http://www.lme.com . |
| [25] | Servicio nacional de aduanas. Sitio de preguntas frecuentes. «Preguntas Frecuentes Importaciones,» 2012. [En línea]. http://www.aduana.cl/prontus_aduana/site/artic/20070228/pags/20070228161116.html . |
| [26] | Lenntech (consorcio de tratamiento de agua y aire). Publicación. «Elementos químicos ordenados por su masa atómica,» [En línea]. http://www.lenntech.es/periodica/masa/masa-atomica.htm . |
| [27] | Comisión Chilena del cobre. Investigación. «Antecedentes para una Política Pública en Minerales Estratégicos: Litio,» Dirección de estudios y políticas Públicas, 2009. |
| [28] | Alibaba.com, Inc. o afiliados. Sitio de ventas de productos chinos [En línea]. http://www.alibaba.com/ . |
| [29] | Meridian International Research. Investigación. «The trouble with Lithium 2 Under the Microscope,» Martainville, Francia, 2008. |
| [30] | Rod Lache; Dan Galves; Patrick Nolan. Investigación. «Electric Cars: Plugged In 2,» Banco Deutsche, 2009. |
| [31] | Pedro Pavlovic; Felipe Vergara; Gustavo Lagos. Libro. "El litio un nuevo recurso para Chile", Santiago: Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas, 1986. |
| [32] | SQM. Sitio en internet con el proceso de producción de carbonato de litio. «Proceso Litio,» [En línea]. http://www.sqm.com/aspx/AcercaDe/ProcesoProduccion.aspx?Scp=Proceso&Val=2 . |
| [33] | Ernesto Bianchi Souter. Documento. «Elementos de electroquímica: electrolisis y acumuladores reversibles,» 2010. |
| [34] | Bhaskar Saha; Kai Goebel. Artículo. «Modeling Li-ion Battery Capacity Depletion in a Particle Filtering Framework,» de <i>Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society</i> , San Diego, CA. USA, 2009. |
| [35] | CHENG, K.W.E. Artículo. «Recent Development on Electric Vehicles,» de <i>International Conference on Power Electronics Systems and Applications, Hong Kong</i> , 2009. |
| [36] | S. Blumsack, C. Samaras y P. Hines. Artículo. «Long-Term Electric System Investments to Support Plug-in Hybrid Electric Vehicles,» IEEE, 2008. |
| [37] | J. S. Cunningham. Investigación. «An Analysis of Battery Electric Vehicle Production Projections,» <i>Massachusetts Institute of Technology</i> , Cambridge, 2009. |
| [38] | Andres Kettlun L. & Igor Riquelme V. Catedras de "IN42A-1 Evaluación de Proyectos", Santiago: Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile, 2009. |
| [39] | William G. Sullivan; Elin M. Wicks; James T. Luxhoj. Libro. "Ingeniería económica de DeGarmo, Duodécima edición", Ciudad de México: Pearson Educación de México, 2004. |
| [40] | E. Correa y S. Rivas. Publicación. «Estrategias del Manejo del Tiempo en Simulación Dinámica,» Centro de Investigación de Operaciones y Modelos Matemáticos (CIOMMA), Caracas, 2010. |
| [41] | cybercursos.net. Publicación. «Macros en MS Excell» http://www.cybercursos.net . |

Material complementario

En el disco presente en esta página, se puede encontrar el modelo implementado en la verificación y los casos descritos en el capítulo 4, además de una copia de este informe.