



Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Industrial

## Análisis del ciclo de vida (ACV) del proceso de fabricación de una batería de Zn/Aire

TRABAJO FIN DE MÁSTER  
MÁSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Miguel de Jesús Mercado Hernández

Director: Antonio J. Fernández Romero

:

Cartagena, diciembre de 2020



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



# AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer en primer lugar a Dios por estar siempre presente en todo momento y circunstancia, en especial durante este periodo de estudios que implicó un reto doble por la pandemia del Corona Virus.

Gracias a mis padres Miguel y Ramona, mis hermanos Miqueas y Milka y toda mi familia por el apoyo que me dan cada día para seguir luchando a través de la distancia.

Al equipo administrativo y docente de la UPCT en especial a mis tutores Antonio J. Fernández Romero y Antonio Urbina por su apoyo, atención y su docilidad en cada uno de los requerimientos.

Por último, quisiera agradecer el apoyo financiero por parte de mi país República Dominicana a través del Ministerio de Educación Superior Ciencia y Tecnología República Dominicana Mescyt y de mi empresa Cooperativa Vega Real.

# Índice

Resumen .....	6
Abstract .....	7
1. Introducción .....	8
2. Objetivo.....	9
3. Situación energética actual .....	9
3.1. Esquema de consumo energético actual .....	10
3.2. Huella ecológica .....	11
3.3. Avances recientes en transformación energética .....	12
3.4 Consumo eléctrico actual y posible escenario.....	13
<b>4. Baterías de Zn/Aire.....</b>	<b>14</b>
4.1.1. Componentes de la batería Zn/Aire .....	15
4.1.1.2. El electrolito.....	16
4.1.1.3. Electrodo de Aire.....	17
4.1.1.4. Membrana .....	17
4.2. Reacciones químicas.....	17
5. Metodología .....	19
5.1. Análisis de Ciclo de Vida .....	19
5.2. Open LCA.....	23
5.3. Vinculación de la base de datos .....	24
5.4. Inserción de Método LCIA .....	25
5.5. Entorno LCA con base de datos .....	25
5.6. Inserción de componentes.....	26
5.7. Realización de diagrama .....	28
6. Resultados y discusión .....	29
7. Comparación con estudios previos .....	36
8. Conclusión .....	37
9. Referencias bibliográficas .....	38
10. Anexos Sobre Open LCA.....	40
11. Proceso de descarga de Open LCA.....	40

12.	Proceso de Configuración de Open LCA .....	42
13.	Utilización de Open LCA .....	45

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Uso Energético en 2016 y proyección a 2050 (Fuente: Irena Global Energy Transformation-A Roadmap to 2050) .....	9
<b>Figura 2.</b> Uso estimado energético de Estados Unidos en 2019 (Fuente: AEO, 2019) .....	10
<b>Figura 3.</b> Huella ecológica 2019 (NFO, 2019) .....	11
<b>Figura 4.</b> Camino de la transición energética (Fuente: Irena Global Energy Transformation-A Roadmap to 2050) .....	12
<b>Figura 5.</b> Consumo eléctrico actual y proyección a 2050(Fuente: Irena Global Energy Transformation-A Roadmap to 2050) .....	13
<b>Figura 6.</b> Sistema de integración de renovables y sistemas de almacenamiento (Fuente: Lu et al 2009) .....	14
<b>Figura 7.</b> Esquema de la estructura Zn/Aire (Fuente: Santos et al 2016) .....	15
<b>Figura 8.</b> Estructura de Electrodo de Aire (Fuente: Santos et al 2016) .....	17
<b>Figura 9.</b> Proceso de Análisis de Ciclo de Vida (Fuente: <a href="https://www.nueva-iso-14001.com/2018/04/ciclo-de-vida-requisito-de-la-iso-14001/">https://www.nueva-iso-14001.com/2018/04/ciclo-de-vida-requisito-de-la-iso-14001/</a> ) .....	20
<b>Figura 10.</b> Etapas contenidas en un LCA (Fuente: M.C. McManus 2012) .....	21
<b>Figura 11.</b> Proceso generalizado de una unidad (Fuente: Sullivan et al, 2012) .....	22
<b>Figura 12.</b> Plataforma Open LCA (Fuente: Open LCA 1.10.2) .....	23
<b>Figura 13.</b> Selección de base de datos .....	24
<b>Figura 14.</b> Aplicación de Método LCIA .....	25
<b>Figura 15.</b> Base de Datos.....	26
<b>Figura 16.</b> Inserción de datos en OpenLCA.....	27
<b>Figura 17.</b> Diagrama obtenido.....	28
<b>Figura 18.</b> Configuración para cálculos.....	29
<b>Figura 19.</b> Impactos del sistema.....	31
<b>Figura 20.</b> Impactos del sistema.....	31
<b>Figura 21.</b> Configuración para cálculos.....	32
<b>Figura 22.</b> Impactos del sistema.....	34
<b>Figura 23.</b> Impactos del sistema.....	34
<b>Figura 24.</b> Página principal de Open LCA.....	40
<b>Figura 25.</b> Sección de descargar de OpenLCA.....	40
<b>Figura 26.</b> Indicar plataforma deseada.....	41
<b>Figura 27.</b> Indicar el idioma de la plataforma deseado.....	41
<b>Figura 28.</b> Aceptar términos y presionar dos veces siguiente y luego instalar.....	41
<b>Figura 29.</b> Pantalla inserción de base de datos.....	42
<b>Figura 30.</b> Proceso de instalación de base datos .....	42
<b>Figura 31.</b> Descargamos la base de datos.....	43
<b>Figura 32.</b> Inserción de la base de datos.....	43
<b>Figura 33.</b> Descarga e inserción del método de impacto.....	44
<b>Figura 34.</b> Descarga e inserción del método de impacto.....	44
<b>Figura 35.</b> Vista plana de la plataforma.....	45
<b>Figura 36.</b> Creación de categoría.....	46
<b>Figura 37.</b> Creación de proceso e inserción de datos.....	46
<b>Figura 38.</b> Realización de los flujos.....	47
<b>Figura 39.</b> Realización de sistemas.....	48
<b>Figura 40.</b> Sistema realizado.....	48
<b>Figura 41.</b> Propiedades de cálculo.....	49



## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Huella ecológica 2019 (Fuente: Network Footprint Organization NFO Huella Ecológica) .....	12
<b>Tabla 2.</b> Parámetros típicos de una batería de Zn/Aire (Fuente: Lu et al 2016).....	15
<b>Tabla 3.</b> Características del Zinc (Fuente: <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Zinc">https://es.wikipedia.org/wiki/Zinc</a> ) .....	16
<b>Tabla 4.</b> Características del KOH (Fuente: <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3xido_de_potasio">https://es.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3xido_de_potasio</a> ).....	16
<b>Tabla 5.</b> Componentes de la batería Zn/Aire (Fuente: Santos et al 2016) .....	27
<b>Tabla 6.</b> Id del proceso.....	29
<b>Tabla 7.</b> Configuración para cálculos.....	30
<b>Tabla 8.</b> Impacto del sistema.....	30
<b>Tabla 9.</b> Id del proceso.....	32
<b>Tabla 10.</b> Configuración para cálculos.....	33
<b>Tabla 11.</b> Impactos del sistema.....	33



## Resumen

El uso cada vez más frecuente de nuevas tecnologías portátiles y el interés reciente hacia la obtención de vehículos eléctricos competitivos han alentado a importantes grupos de investigación mundiales para conseguir nuevos tipos de baterías con prestaciones superiores a los ya existentes. Estas nuevas baterías deben responder a uno o varios de los siguientes hitos:

- Alta capacidad y energía específica.
- Nivel de potencia suficiente.
- Elevado número de ciclos de carga y descarga.
- Alta eficiencia coulombica y energética.
- Bajo coste de fabricación y de mantenimiento.
- Mínimo impacto medioambiental durante su fabricación y uso.

En el laboratorio de Materiales Avanzados para la Producción y Almacenamiento de Energía se está investigando en un nuevo tipo de baterías compuestas con un electrodo negativo de Zinc (Zn). Los resultados obtenidos hasta el momento permiten ser optimistas en cuanto a sus buenas propiedades, entre las que destacan su alta recargabilidad y eficiencias energética y coulombica.

Por otra parte, es conocida la menor toxicidad de los materiales que componen los electrodos de Zinc, en comparación con otras alternativas que contengan Litio o Plomo, así como sus precios moderados.

Ante estas evidencias, este Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo el llevar a cabo un análisis de ciclo de vida (ACV) de una batería diseñada y probada en el laboratorio. Se pretende llevar a cabo un estudio ACV de una batería de Zn/Aire, en el que se incluya el impacto que tiene sobre el medioambiente los materiales usados en la fabricación de la batería, desde la extracción minera de los mismos hasta la terminación de la manufactura de dicha batería. Además, se evaluará el consumo energético durante todo el proceso de fabricación. Por último, este trabajo se completará con el del coste económico de la fabricación de la batería, así como del gasto por número de ciclos. Para ello se usará un software libre, como OpenLCA, con acceso a bases de datos como Ecoinvent.

## **Abstract**

The increasing use of new portable technologies and the recent interest in obtaining competitive electric vehicles have encouraged major global research groups to obtain new types of batteries with superior performance compared to existing ones. These new batteries must comply to one or more of the following requirements:

- High capacity and specific energy.
- Sufficient power level.
- High number of charge and discharge cycles.
- High coulombic and energy efficiency.
- Low manufacturing and maintenance cost.
- Minimum environmental impact during its manufacture and use.

In the Advanced Materials for Energy Production and Storage laboratory, new types of batteries based in zinc negative electrode are being investigated. The results obtained so far allow us to be optimistic regarding its good properties, among which its high rechargeability and energy and coulombic efficiencies stand out.

On the other hand, the lower toxicity of the materials that make up the Zinc electrodes, when compared to other alternatives such as Lithium or Lead, as well as their moderate prices, are known.

Given these evidence, this Final Master's Project aims to carry out a battery life cycle assessment (LCA) designed and tested in the laboratory. It is intended that the student carry out a LCA study of a Zn/Air battery, which includes the impact that the materials used in the manufacture of the battery have on the environment, from the mining extraction until the completion of the manufacture of the battery. In addition, energy consumption will be evaluated throughout the manufacturing process. Finally, this work will be completed with the economic cost of manufacturing the battery, as well as the cost per number of cycles. For this, free software will be used, such as OpenLCA, with access to databases such as Ecoinvent.

# 1. Introducción

El mundo se encuentra inmerso en una importante transición energética. La sociedad es consciente de que debemos migrar hacia modelos de consumo energético más razonables si queremos asegurar la sostenibilidad del planeta.

Tal como lo establece el objetivo 7 de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) y los lineamientos establecidos en diversos congresos mundiales sobre energía y sostenibilidad, se hace muy necesaria la descarbonización de las economías y el aseguramiento de la calidad energética. Para lograr esta descarbonización es necesario migrar a sistemas de energía limpia que sean respetuosos con el medio ambiente, sin embargo, esta energía debe ser fiable y segura. Uno de los métodos de fiabilidad energética más empleados es el almacenamiento mediante sistemas de baterías para su uso posterior.

En este TFM se realizó un análisis de ciclo de vida de la batería de Zn/Aire que ha sido diseñada y probada en el laboratorio de investigación de Materiales avanzados para la generación y almacenamiento de energía la UPCT.

Conscientes que la demanda energética será mayor los próximos años y por ende será necesaria la implementación de más y mejores sistemas de almacenamiento energético, realizamos este análisis sobre esta batería para identificar todo el procesos de su ciclo de vida y las repercusiones que tiene a nivel económico y medioambiental.

## 2. Objetivo

Este Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo llevar a cabo un análisis de ciclo de vida de una batería de Zn/Aire diseñada y probada en el laboratorio de investigación de la UPCT. En este estudio se incluirá el impacto que tiene sobre el medioambiente los materiales usados en la fabricación de la batería, desde la extracción minera de los mismos hasta la terminación de la manufactura de dicha batería. Además, se evaluará el consumo energético durante todo el proceso de fabricación.

## 3. Situación energética actual

Según lo expresado por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) en su informe anual sobre la transición energética, indica que en el año 2016 la energía final consumida ascendía a la cantidad de 395 EJ (395  $10^{18}$ J). De esta energía más de la mitad provino de fuentes contaminantes como el petróleo y el carbón. (IRENA, 2019)

El 19% de esa energía final consumida provino de electricidad, pero en el mismo informe se expresa que esa electricidad provenía de fuentes contaminantes también.

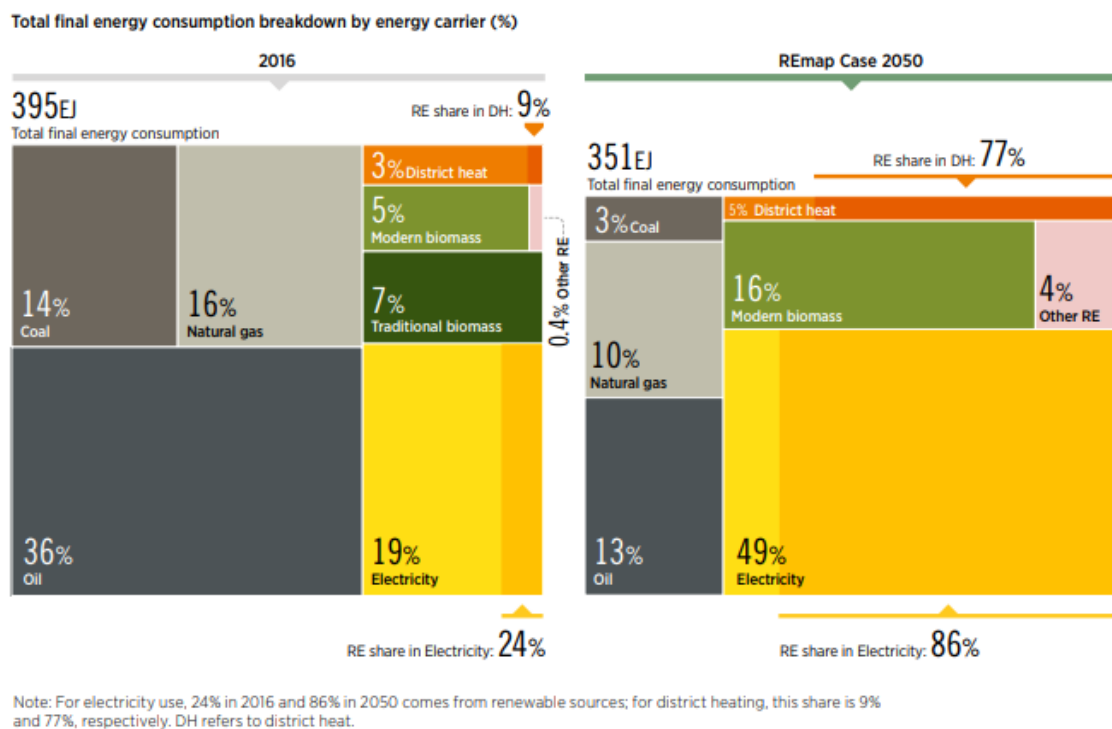


Figura 1. Uso Energético en 2016 y proyección a 2050 (IRENA, 2019)

El escenario propuesto para 2050 propone una reducción de consumo hasta los 351 EJ (351

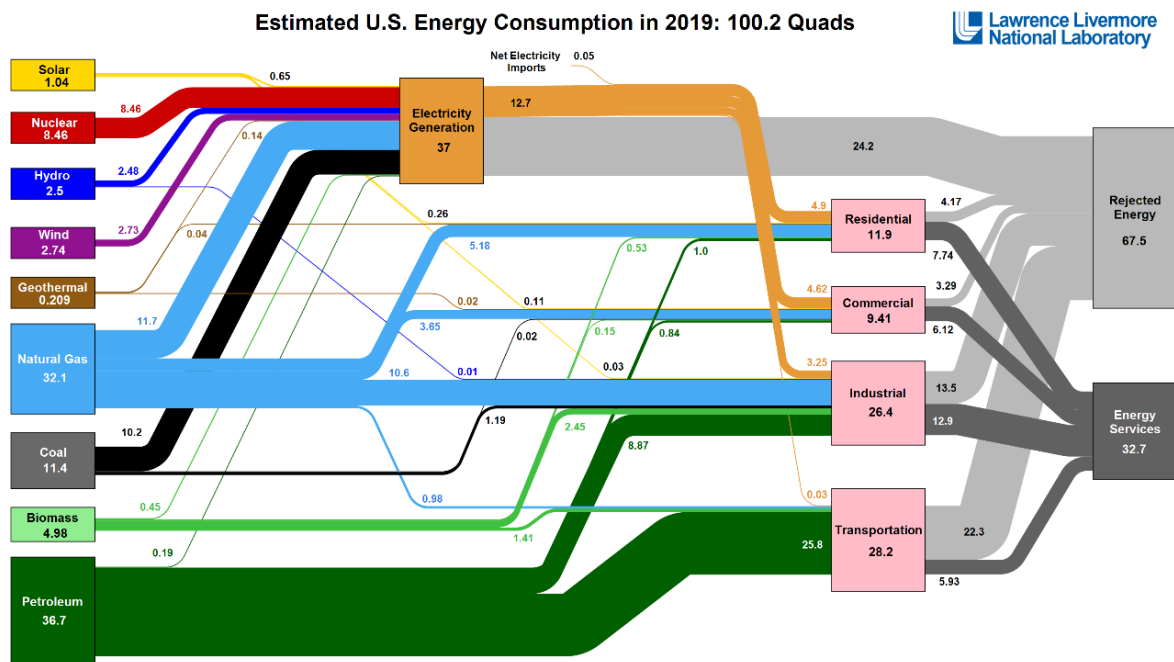
10<sup>18</sup>J). de energía final consumida tomando en cuenta que casi la mitad provendrá de electricidad considerando un uso importante de energías renovables.

### 3.1. Esquema de consumo energético actual

El Lawrence Livermore National Laboratory (Estados Unidos) viene elaborando desde hace varios años unos informes donde detalla el consumo estimado de diferentes regiones, especialmente de los Estados Unidos.

En la edición de 2019 se concluyó que la energía total consumida en Estados Unidos ascendía a la cantidad de 100.2 Quads que equivale a 105.71 EJ o 29893.25 TWh.

De esta sorprendente cantidad de energía, más del 65% es perdida o rechazada por múltiples razones que van desde eficiencia de los sistemas hasta uso irracional por parte de los consumidores.



Source: LLNL March, 2020. Data is based on DOE/EIA RMR (2019). If this information or a reproduction of it is used, credit must be given to the Lawrence Livermore National Laboratory and the Department of Energy, under whose auspices the work was performed. Distributed electricity expenses only retail electricity sales and does not include self-generation. LBNL reports consumption of renewable resources (i.e., hydro, wind, geothermal and solar) for electricity in Btu-equivalent values by assuming a typical fossil fuel plant heat rate. The efficiency of electricity generation is calculated as the total retail electricity delivered divided by the primary energy input into electricity generation. The use efficiency is estimated as 65% for the residential sector, 65% for the commercial sector, 21% for the transportation sector and 49% for the industrial sector, which was updated in 2017 to reflect DOE's analysis of manufacturing. Totals may not equal sum of components due to independent rounding. LLNL-RL-410527

**Figura 2.** Uso estimado energético de Estados Unidos en 2019 (AEO, 2019)

Tal como se puede apreciar en esta imagen, el mix de energía basado en su mayoría por fuentes contaminantes, es el responsable de alimentar las demandas energética clasificadas en 5 categorías que son: generación de electricidad, uso residencial, uso comercial, uso industrial y transporte.

Podemos decir que este caso es exclusivo de los Estados Unidos, pero es perfectamente



Huella ecológica de algunos países			
País	Población	Huella Ecológica	Déficit/reservas
CHINA (2016)	1,390,419,712	-1.0	Déficit
INDIA (2009)	1,034,539,200	-0.8	Déficit
ESTADOS UNIDOS (2016)	322,179,584	-4.5	Déficit
INDONESIA (2016)	261,115,456	-0.4	Déficit
BRASIL (2016)	184,738,448	5.9	Ahorro
ESPAÑA (2016)	41,392,104	-2.6	Déficit
MUNDO (2016)	7,426 MM	Se necesitan 1.5 planetas – Déficit	

Tabla 1. Huella ecológica de algunos países (NFO, 2020)

### 3.3. Avances recientes en transformación energética

La transformación energética ha sido un arduo y difícil camino de varias décadas luego que surgió la preocupación mundial por los efectos adversos que en el planeta estaba desencadenando el cambio climático y las exageradas emisiones de contaminantes como el CO<sub>2</sub>.

Como podemos apreciar en la imagen siguiente, desde Kioto en 1997 hasta la proliferación de los vehículos eléctricos hemos visto cómo ha existido una medición constante de intereses de diversos y países y sectores, los cuales han frustrado el sueño de un planeta verde y medioambientalmente sostenible.

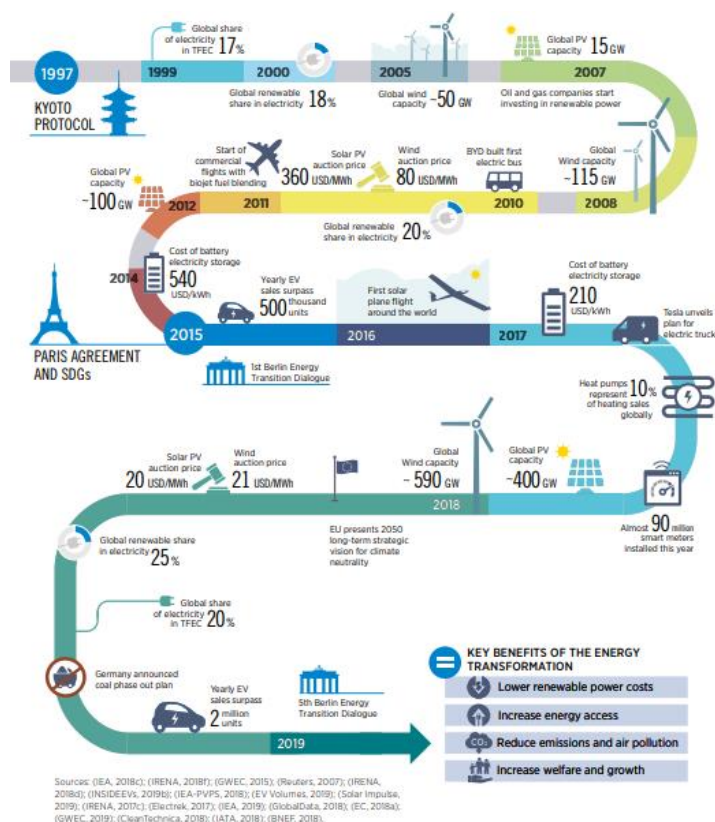


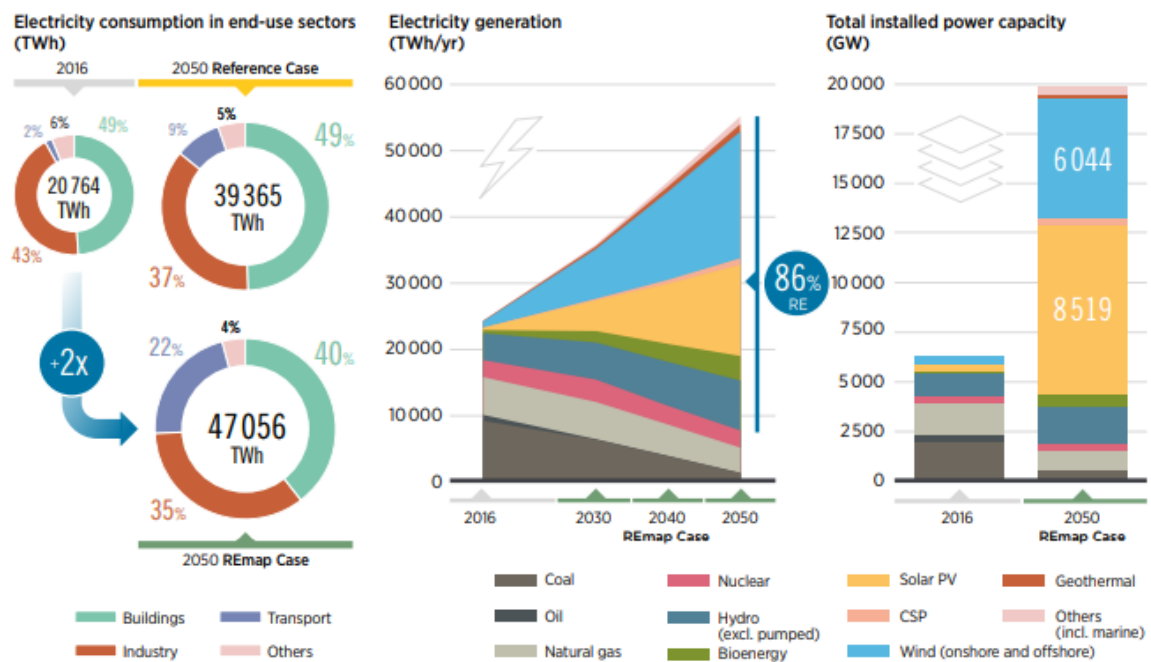
Figura 4. Camino de la transición energética (IRENA, 2018)

### 3.4 Consumo eléctrico actual y posible escenario

Otro punto que debemos sacar a colación es el exagerado consumo energético. Según IRENA, como vemos en la Figura 5, en el año 2016 el consumo de electricidad en usuarios finales se situó en la astronómica cantidad de 20764 TWh siendo consumida esta energía mayoritariamente por el sector industrial (43%) y las viviendas (49%). Más de la mitad de esa energía fue obtenida de fuentes contaminantes como el petróleo y el carbón.

Para el 2050 el escenario propuesto es un tanto optimista y refleja un aumento considerable en uso de energía eléctrica duplicando prácticamente el consumo actual. Esto se debe en gran medida a dos factores que son la electrificación del transporte para reducir la dependencia del petróleo y la utilización de energía eléctrica por parte de los países en vía de desarrollo, principalmente África.

Si se establecen todas las medidas que han sido propuestas en materia de sostenibilidad, tendremos mejoras considerables de eficiencia y una mayor presencia del uso de renovables para suplir esa demanda energética del mundo.



Note: In electricity consumption, 24% in 2016 and 86% in 2050 is sourced from renewable sources. CSP refers to concentrated solar power

**Figura 5.** Consumo eléctrico actual y proyección a 2050 (IRENA 2019)

Se plantea el hecho de tener un incremento casi exponencial de la potencia instalada de fuentes renovables, principalmente de eólica y solar.

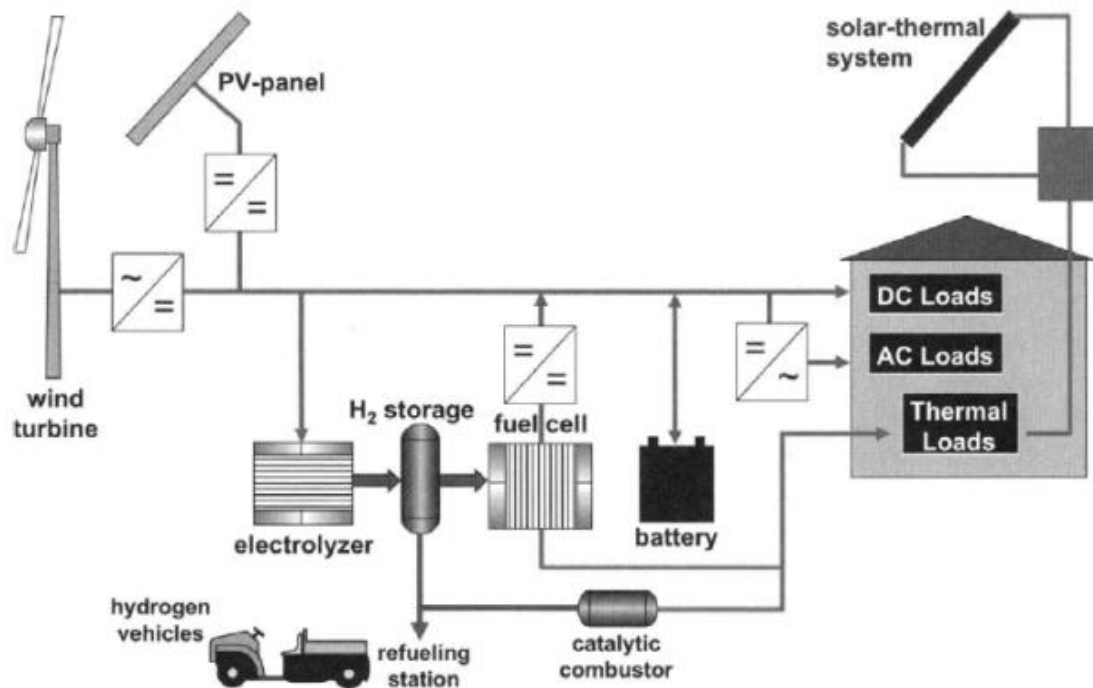


#### 4. Baterías de Zn/Aire

Analizado el panorama presente y el que se espera para los próximos años con una considerable electrificación de la mayoría de los servicios y aplicaciones, se hace necesario el desarrollo de sistemas de almacenamiento que sean fiables, sostenibles y capaces de suplir las demandas energéticas.

Las fuentes de energía renovables, como la solar y la eólica, son inherentemente intermitentes. El factor de capacidad, definido como una relación entre potencia media durante un período de tiempo y máxima potencia nominal, es aproximadamente 20% para energía solar y aproximadamente 30% para energía eólica. (Lu et al, 2009).

Una de las opciones que se están estudiando para reducir la intermitencia de las renovables es mezclar estas fuentes de energías con otros sistemas como electrolizadores y baterías que son capaces de suplir los niveles de energía demandados.



**Figura 6.** Sistema de integración de renovables y sistemas de almacenamiento (Lu et al, 2009)

En la actualidad, la comunidad científica realiza esfuerzos en investigar una serie de baterías que sean eficientes: Uno de los sistemas que ha resultado más favorable es el que utiliza un metal, como electrodo negativo, y un electrodo positivo que cataliza la reducción de oxígeno.

Como referencia de este tipo de baterías vamos a usar una batería de Zn/Aire, las cuales, han despertado un gran interés por sus valores de capacidad y energía específica. Considerando el proceso de fabricación de esta a nivel de laboratorio. (F. Santos et Al, 2020)

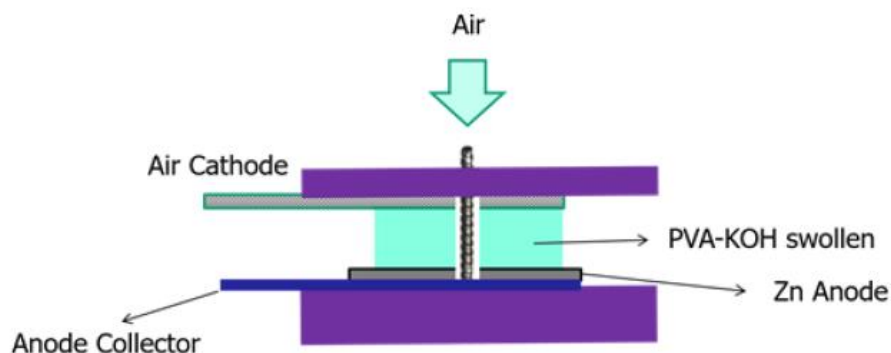
Los sistemas de Zn/Aire han tenido gran avance los últimos años gracias a las propiedades que nos ofrece el zinc, como son su bajo coste, la abundancia en la naturaleza y su fácil obtención, entre otras. El desarrollo de estas baterías ha permitido que productos como audífonos, señales de tráfico, boyas y otros elementos que requieren de ellas, hayan tenido un empuje comercial importante los últimos años.

Parámetros típicos de la batería de Zinc Aire				
Densidad de potencia 200mW/cm <sup>2</sup>	Densidad energética en Wh/Kg 350-500 776 primary, 378 secondary	Eficiencia del sistema 60%	Ciclos de vida x10 <sup>3</sup> 1-2	(Li and Dai, 2014), (Dehghani-Sani et al., 2019), (Liu et al., 2016)

**Tabla 2.** Parámetros típicos de una batería de Zn/Aire según se indica en las referencias señaladas en la última columna.

#### 4.1.1. Componentes de la batería Zn/Aire

Los componentes generales de una batería de Zinc Aire son como vemos en la figura 9. El aire se absorbe a través de un cátodo de aire por la parte superior que en nuestro caso es un electrodo compuesto de carbono, con MnO<sub>2</sub> como catalizador. Como electrolito se usa un gel de Polivinilalcohol (PVA) en el que se incluye Hidróxido de Potasio (KOH) que incorpora los iones necesarios para mantener la conductividad entre los electrodos. El electrodo negativo es de Zinc como se ha mencionado anteriormente.



**Figura 7.** Esquema simplificado de la estructura de la batería Zn/Aire (F. Santos et al, 2020)

#### 4.1.1.1. El ánodo de zinc

En las baterías de Zinc/Aire, el electrodo negativo o ánodo, está compuesto por Zn metal, en polvo, en lámina o en fibra, al que se le suele añadir algún aditivo para mejorar sus propiedades. Gracias a las bondades que nos ofrece el Zn, se están realizando grandes estudios e investigaciones para desarrollos de estos sistemas como el que estudiaremos en este caso.

Características del Zinc	
Densidad	7,14 g/cm <sup>3</sup>
Estructura cristalina	hexagonal empaquetada cerrada
Peso atómico	65,38
Radio iónico	0,074-0,083 nm
Resistividad	5,96 $\mu\Omega\text{cm}$
Temperatura de fusión	419.5 1C <sup>o</sup>
Valencia iónica	2

**Tabla 3.** Características del Zinc

Las propiedades de este elemento, como vemos en esta **Tabla 3** han permitido que diversos grupos de investigación lo estén utilizando en sus experimentos.

#### 4.1.1.2. El electrolito

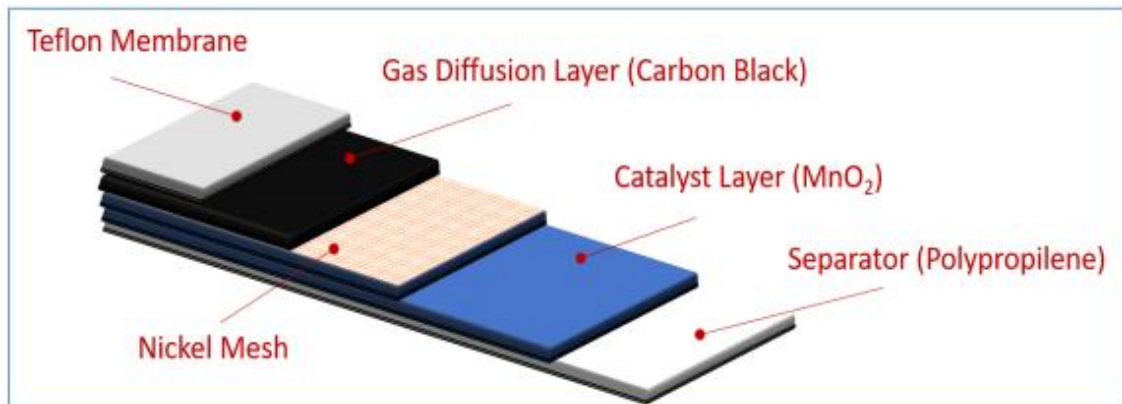
Para el electrolito se usan sustancias que incluyen hidróxidos alcalinos, como los de potasio, sodio o litio. El electrolito más usado es el hidróxido de potasio (KOH) debido a su mayor conductividad iónica.

Características del Hidróxido de Potasio KOH	
Apariencia	Blanco
Densidad	2040 kg/m <sup>3</sup> ; 2,04 g/cm <sup>3</sup>
Masa molar	56,1056 g/mol
Punto de fusión	633,15 K (360 °C)
Punto de ebullición	1593,15 K (1320 °C)
Solubilidad en agua	119 g en 100 g de agua

**Tabla 4.** Características del KOH

#### 4.1.1.3. Electrodo de Aire

Como electrodo positivo en la batería de Zn/Aire se usan electrodos de difusión de aire como se esquematiza en la Figura 12. (F. Santos et al 2020)



**Figura 8.** Estructura de Electrodo de Aire (F. Santos et al 2020)

Esta estructura hace posible la entrada de oxígeno desde el aire, a la vez que se impide la fuga del electrolito, al usar una lámina de teflón. La malla de Níquel permite que el electrodo tenga alta conductividad eléctrica en toda su área. La capa de difusión permite el transporte de oxígeno hacia el catalizador el cual es una fina capa de MnO<sub>2</sub>. Por último, un separador de Polipropileno evita que el electrodo se contamine de las especies presentes en disolución.

#### 4.1.1.4. Membrana

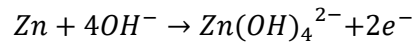
Para la membrana se logra con una mezcla de acetato de polivinilo o PVAc, que es conocido comúnmente como adhesivo vinílico, cola, cola fría, o Colbón y Alcohol Polivinílico que se utiliza en la fabricación de papel, encolado de urdimbres textiles, como espesante y estabilizador de emulsiones en formulaciones adhesivas de PVAc y una variedad de recubrimientos.

Esta membrana se sintetiza en fase gel e incorpora en su interior una sal de KOH, que permite mantener una alta conductividad iónica.

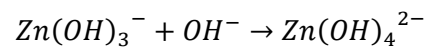
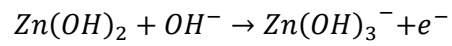
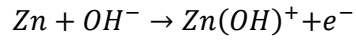
## 4.2. Reacciones químicas

Las reacciones que tienen lugar en la batería de Zn/Aire son uno de los principales temas que se están investigando.

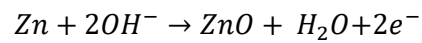
Existe un mecanismo en el cual, durante la descarga, el Zinc se oxida a Zn<sup>2+</sup> pero el catión no queda libre, sino que forma zincato. (Bockris et al, 2007)



Esta reacción consta de cuatro pasos:



Luego el electrolito se satura con zincato y forma ZnO y se forma una capa pasiva, quedando como reacción global la disolución de Zn de esta manera.



## 5. Metodología

La realización de este TFM se basó en cuatro pasos esenciales, que los detallamos a continuación.

- El primero consistió en la búsqueda de información relacionada con el tema de diversas fuentes científicas como artículos en revistas, reportes e investigaciones de los más importantes grupos científicos dedicados al LCA de sistemas de almacenamiento de energía.
- En el segundo, se procedió a conocer y usar la aplicación de análisis de ciclos de vida conocida como OpenLCA. Este software libre nos da la opción de trabajar aplicando esta metodología.
- La tercera etapa consistió en la recogida e interpretación analítica de los datos utilizando diversos métodos de análisis como matemáticos, estadísticos e informáticos.
- Finalmente, el cuarto procedimiento es la elaboración de un documento que contenga toda la información obtenida para su posterior presentación.

### 5.1. Análisis de Ciclo de Vida

Un análisis de ciclo de vida (ACV) (Life Cycle Assessment (LCA) de su traducción del inglés), también conocido como balance ambiental, balance ecológico o evaluación del ciclo de vida (ECV), es una herramienta de investigación y evaluación de los impactos ambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia: extracción, producción, distribución, uso y fin de vida.

El ACV es, por tanto, una metodología para el estudio del ciclo de vida de un producto y de su proceso de producción.

Para realizar este análisis, se toma un proceso o actividad a lo largo de todo su ciclo de vida mediante la cuantificación del uso de recursos.

Se divide en dos elementos esenciales asociados con el sistema. En el primero se consideran las entradas, como energía y materias primas mientras que, en el segundo, se tienen en cuenta las y emisiones o salidas al aire, agua y suelo.

OpenLCA: es un software de código abierto, de acuerdo con los estándares de la iniciativa de código abierto.  
[www.openlca.org](http://www.openlca.org)



**Figura 9.** Proceso de Análisis de Ciclo de Vida (Geo innova 2016)

Para la producción de baterías, se utilizan distintos materiales como cobre, plomo, zinc y hierro. Debido a la alta demanda de baterías, algunos materiales contenidos en las mismas se han citado como escasos recursos naturales y podrían ser características limitantes en la producción futura de baterías.

El hecho de aumentar la producción de baterías y las medidas de aumentar nuestra dependencia de los sistemas "sostenibles" puede tener un impacto perjudicial adicional, y por lo tanto, este impacto debe ser determinado.

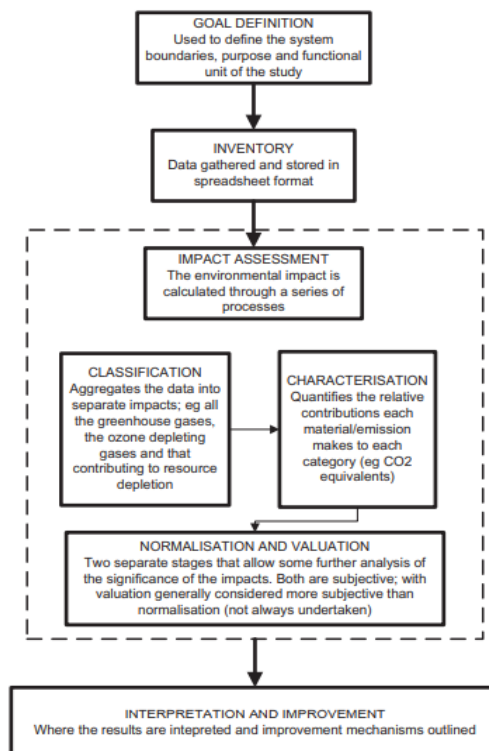
Esta determinación es posible gracias a la metodología Análisis del Ciclo de Vida, la cual, es una herramienta de gestión ambiental que determina los impactos ambientales de un producto o sistema durante toda su vida útil; desde la producción, hasta el uso y la eliminación. Puede determinar el impacto contra una amplia gama de problemas ambientales, incluida la cuantificación de los gases de calentamiento global producidos, la energía incorporada y el agotamiento de las materias primas como resultado del producto o sistema bajo análisis. (McManus 2012)

La metodología comúnmente aceptada para LCA fue producida por la Sociedad de

Toxicología y Química Ambiental (SETAC) en los años noventa. Son cuatro las etapas de este análisis que las detallamos a continuación.

- Definición de los objetivos: Se utiliza para definir el sistema, límites, propósito y unidad funcional del estudio.
- Inventario: Los datos son recopilados y almacenados en formato de hoja de cálculo.
- Proceso de análisis: Esta tercera etapa incluye los siguientes subprocesos.
  - Evaluación de impacto: El impacto ambiental es calculado a través de una serie de procesos.
  - Clasificación: Agrega los datos en impactos separados; por ejemplo, todos los gases de efecto invernadero y capa de ozono.
  - Caracterización: Cuantifica las contribuciones relativas material / emisión en cada una de las categorías (p. ej. CO<sub>2</sub> equivalentes)
  - Normalización y valuación: Estas dos etapas separadas permiten un análisis más detallado de la importancia de los impactos. Ambos son subjetivos; con valoración generalmente considerada más subjetiva que normalización.
- Interpretación y mejora: Donde se interpretan los resultados y se describen los mecanismos de mejora.

En la figura 14 se nos muestra en detalle las etapas del LCA.



**Figura 10.** Etapas contenidas en un LCA



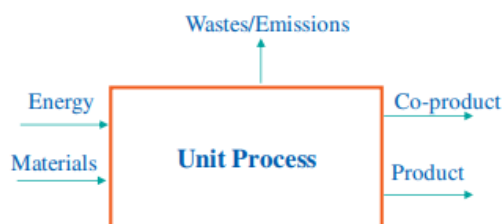
La metodología LCA ha sido aplicada en una infinidad de productos y sistemas. A los diversos sistemas de almacenamiento que se aplica esta metodología, se busca conocer los elementos que la conforman y los impactos agrupados en una serie de “categorías de impacto”. Entre ellas podemos citar:

- Agotamiento de metal.
- Agotamiento de ozono.
- Agotamiento del agua.
- Agotamiento fósil.
- Cambio climático.
- Formación de oxidantes fotoquímicos.
- Formación de partículas.
- Ocupación de tierras agrícolas.
- Ocupación del suelo urbano.
- Radiación ionizante.
- Toxicidad para el ser humano.
- Transformación natural de la tierra.

La necesidad de sistemas de almacenamiento de energía conectados a la red crecerá en todo el mundo en el futuro debido a la solicitud inherente de servicios de energía y la gestión de calidad de energía. (Alotto et al, 2014)

Conscientes de este dato, se hace necesario implementar la metodología LCA que permitirá saber qué recursos son empleados en la fabricación de la batería y hacer un esquema que nos permita tener una noción del sistema completo.

Una representación de los flujos necesarios para caracterizar una unidad se observa en la figura siguiente. Típicamente, numerosos procesos de este tipo son necesarios para fabricar la mayoría de los productos. Por ejemplo, al hacer una batería de Zn se necesitan procesos unitarios para la producción del zinc, compuestos de zinc, cajas de batería, separadores y otros componentes, así como uno o más procesos para poner todo junto en un producto listo para comercializar. (Sullivan et al, 2012)



**Figura 11.** Proceso generalizado de una unidad (Sullivan et al, 2012)

El proceso de producción de una batería puede a la vez ser dividido en dos etapas separadas. La primera es la producción de material de batería: En esta etapa se refiere a las materias primas obtenidas de la tierra o una corriente de reciclaje y refinación.

La segunda etapa es la fabricación de baterías, que representa todos los procesos necesarios para convertir estos materiales básicos en componentes de la batería, como ánodos, cátodos y electrolitos, y ensamblarlos en un producto comercializable.

En el proceso de fabricación, la electricidad se usa en la mayoría de los equipos y se considera como una fuente esencial para el desarrollo de estos sistemas. En este análisis de LCA nos basaremos en la etapa de fabricación esencialmente. (Spanos et al 2015)

## 5.2. Open LCA

Existen múltiples plataformas para la realización de este tipo de estudios. Dada la envergadura, la repercusión de las informaciones y la laboriosidad de las bases de datos, existe en el mercado Simapro que es un software muy potente pero su costo resulta prohibitivo para muchos grupos de investigación.

En tal sentido, la organización Green Delta elabora y distribuye un software denominado Open LCA. Este es un software de código abierto, de acuerdo con los estándares de la iniciativa de código abierto. Fue desarrollado para que LCA y la Evaluación de sostenibilidad fueran más accesibles y asequibles inicialmente en Europa y más tarde en otros países, especialmente en los Estados Unidos.

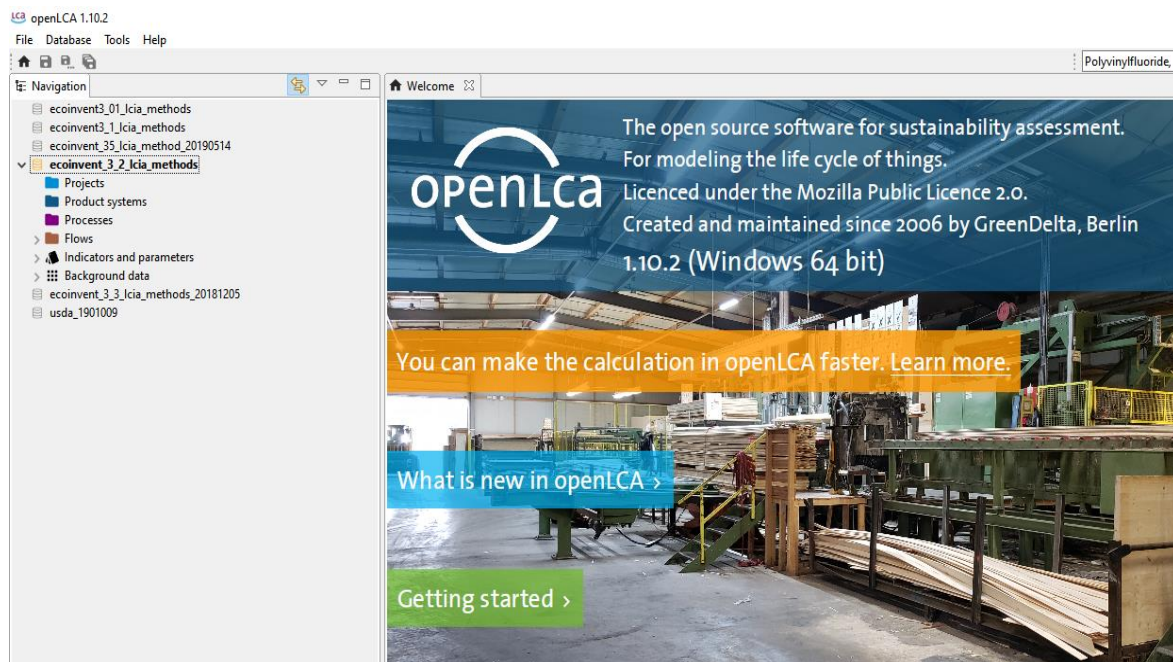


Figura 12. Plataforma Open LCA (<https://www.openlca.org/>)

Este software disponible en diversas versiones y plataformas nos permite realizar este estudio de manera gratuita utilizando las bases de datos y recursos disponibles en la web.

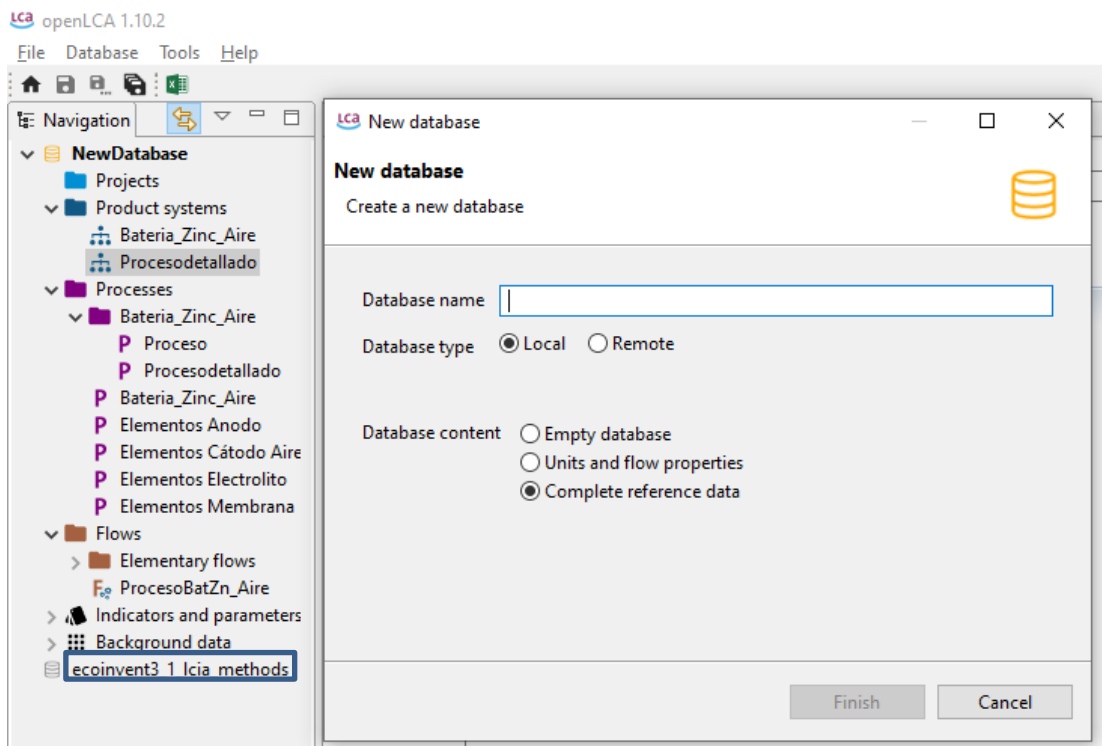
Open LCA versión 1.10 fue utilizado junto a la base de datos Ecoinvent 3.0 para desarrollar un sistema que permita analizar todos los elementos y gastos de materiales y energía para la elaboración de la batería Zn/Aire y así considerar todos los impactos que se generan.

Se crea primero el flujo indicando los materiales y la cantidad de cada sustancia. Luego se hace el proceso donde se interconectan los elementos y se crea un sistema. Finalmente se elabora el producto y se le indica al software que realice los cálculos correspondientes y con ello determinar el impacto de cada sustancia al ambiente.

### 5.3. Vinculación de la base de datos

Cuando instalamos el software, lo primero que requiere el programa es que se enlace con una base de datos sobre la cual va a trabajar.

Las bases de datos vienen en unos archivos con extensión “.zolca” y se agregan mediante un asistente que indica como realizarla.



**Figura 13.** Selección de base de datos

En nuestro caso, usamos Ecoinvent3 v 01 con los métodos LCIA con el tipo de datos Local y con el método completo.

## 5.4. Inserción de Método LCIA

Para que el software sea capaz de realizar los cálculos, se debe insertar otro archivo de la misma extensión de la base de datos que contiene todas las instrucciones para el análisis LCA y constituyen el método para la determinación de los impactos en cada una de las categorías (LCIA: life cycle impact assessment).

Desde la sección de base de datos, se indica al programa que se desea insertar un nuevo archivo y en la ventana emergente se despliega la casilla *Other* donde se encuentra la opción Importar una base de datos completa.

La versión del método que usamos es la 1.5.7 y su configuración se explica en una sección más adelante.

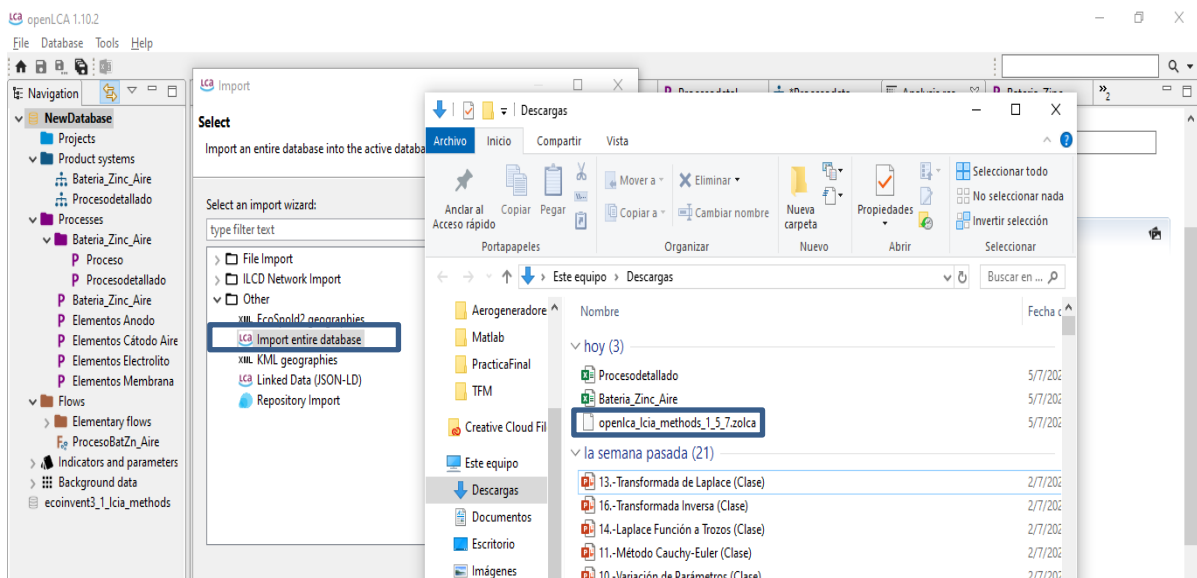
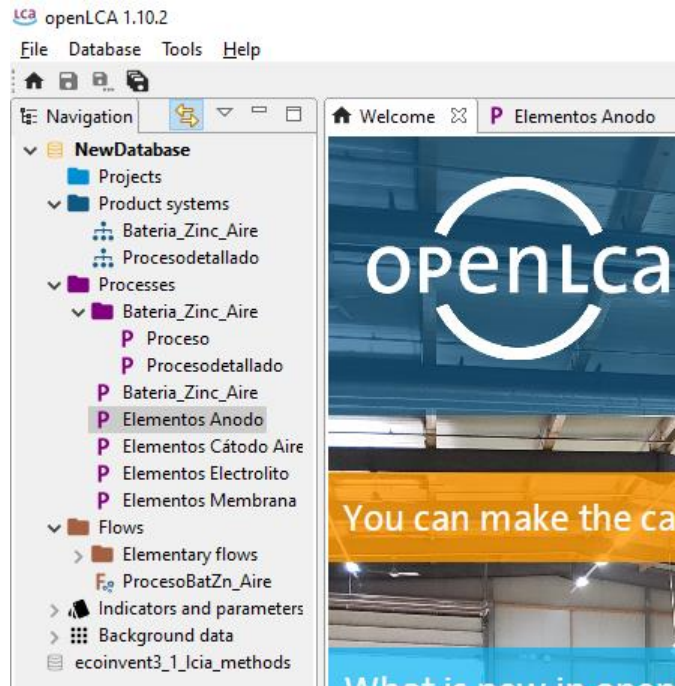


Figura 14. Aplicación de Método LCIA

## 5.5. Entorno LCA con base de datos

Como se aprecia de la figura, existen tres etapas principales que son los productos donde se almacena el sistema completo, la etapa de procesos donde están los elementos que componen el sistema que se quiere analizar y flujos que almacena las relaciones internas que tiene el sistema.



**Figura 15.** Base de Datos

Tal como apreciamos en la figura 15, tenemos un proceso detallado que contiene las instrucciones de la simulación, los procesos detallados por los diferentes elementos que componen la batería y por último el flujo que indica las relaciones.

### 5.6. Inserción de componentes

Los componentes de la batería en estudio se dividieron en los componentes que son ánodo, cátodo, electrolito y membrana y son como detallamos en la siguiente tabla cuyos valores se han obtenido del proceso de fabricación de la batería llevada a cabo en los laboratorios de la UPCT (F. Santos 2019) (F. Santos 2020)

	Sustancia	Peso (g)	Peso normalizado (g)	
			(Por 1kg de batería)	(Por 1kWh de energía almacenada)
<b>Cátodo: Aire</b>	Carbon black	0.028	15.42	46.46
	MnO <sub>2</sub>	0.010	5.51	16.59
	PVDF (fluoruro de poli vinilideno)	0.002	1.10	3.32

	PTFE (politetrafluoroetileno)	0.015	8.56	25.80
	PP (polipropileno)	0.006	3.13	9.42
	Nickel mesh	0.056	31.00	93.41
	THF (Tetrahidrofurano)	0.500	276.55	833.33
<b>Ánodo: Zinc</b>	Zn powder	0.500	276.55	833.33
<b>Membrana</b>	Polyvinyl alcohol	0.196	108.16	325.93
	Polyvinyl acetate	0.027	14.75	44.44
<b>Electrolito</b>	KOH	0.660	365.04	1100.00
	H <sub>2</sub> O	0.309	170.78	514.63
	H <sub>2</sub> O Millipore™	5.000	2765.49	8333.33

**Tabla 5.** Componentes de la batería Zn/Aire

Una vez clasificados y cuantificados cada uno de los componentes de la batería, se proceden a insertar en el programa dependiendo de la sección a la que pertenezcan indicando la cantidad de material que la conforma.

The screenshot displays the OpenLCA 1.10.2 interface. The left sidebar shows a project tree with 'Bateria\_Zinc\_Aire' selected. The main window shows the 'Inputs/Outputs: Bateria\_Zinc\_Aire' process. The 'Inputs' table is as follows:

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided wa...	Provider	Data quality...	Description
Zinc	Emission to air/high pop...	276.55000	gr		none				
Water, embodied in product, very...	Economic/unspecified	2765.49000	gr		none				
Water, embodied in product, ES	Economic/unspecified	170.78000	gr		none				
Vinyl acetate	Emission to air/high pop...	14.75000	gr		none				
Tetrafluoroethylene (TFE)	Emission to air/high pop...	8.56000	gr		none				
Propylene oxide	Emission to air/high pop...	3.13000	gr		none				
ProcesoBatZn_Aire		1.00000	kg		none				
Potassium hydroxide	Emission to air/high pop...	365.04000	gr		none				
Nickel	Emission to air/high pop...	31.00000	gr		none				
Mass...	Emission to air/high pop...	5.51000	gr		none				

The 'Outputs' table is as follows:

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided pr...	Provider	Data quality...	Description
ProcesoBatZn_Aire		1.00000	kg		none				

**Figura 16.** Inserción de datos en OpenLCA

Es preciso destacar que el software pone por defecto la unidad de medida, sin embargo, esto es completamente configurable ya que, desde el inicio, el asistente solicita el tipo de material y como quiere ser medido, para este caso le indicamos que sea en medida de masa

con la unidad del gramo.

### 5.7. Realización de diagrama

Una vez concluida la inserción de componentes e indicarle a programa todas las relaciones, el software nos permite crear un diagrama previa a la realización de los cálculos. El Diagrama obtenido del proceso es el siguiente:

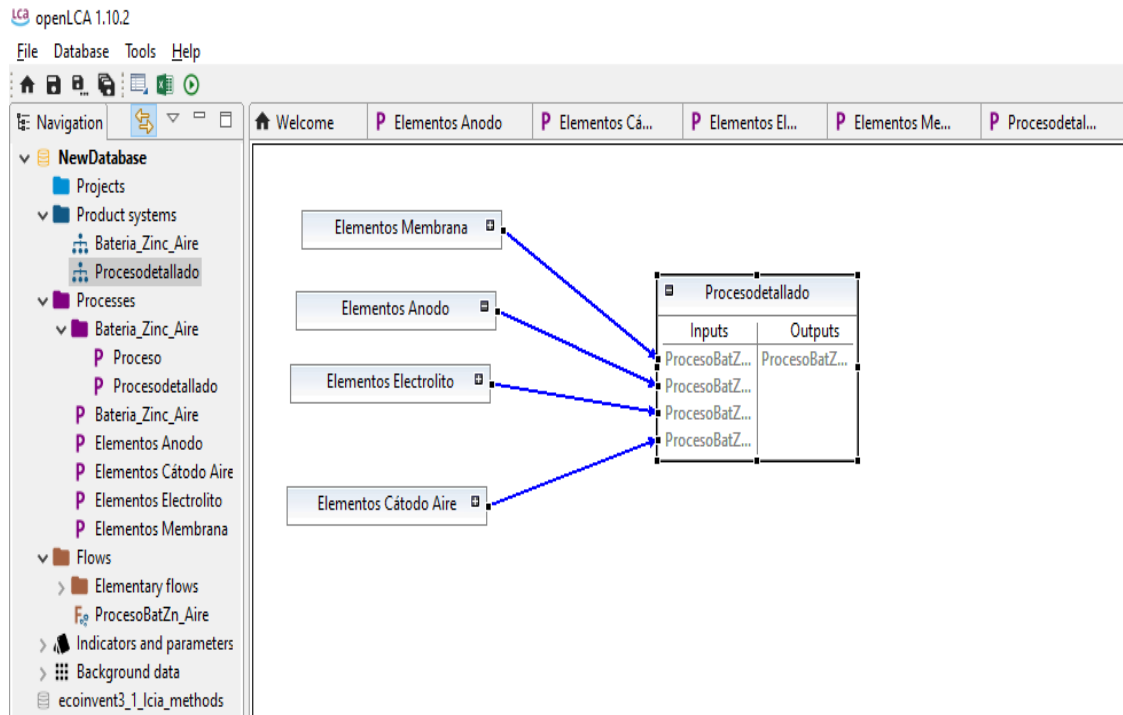


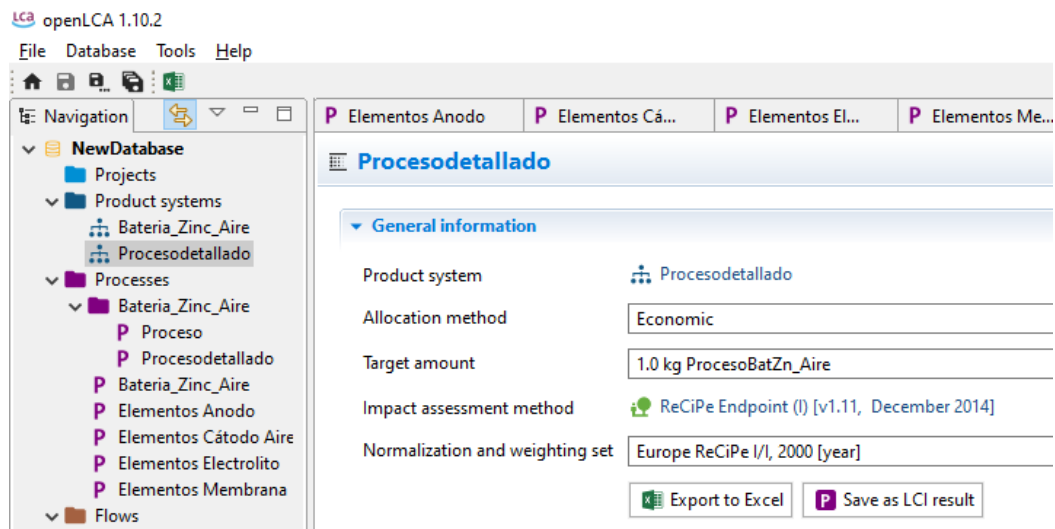
Figura 17. Diagrama obtenido



## 6. Resultados y discusión

Una vez realizado el sistema completo, se ejecuta la simulación del sistema completo indicando a Open LCA que utilizara la metodología de LCIA ReCiPe y obtuvimos los siguientes datos.

El primer cálculo se realizó con 1 Kg de Batería y el segundo para 1000 Kg para ver cómo se comportaba el sistema.



**Figura 18.** Configuración para cálculos

El método usado y la versión son como se ven en la siguiente Figura.

<b>Product system:</b>	Bateria_Zn_Aire
<b>Reference process:</b>	Bateria_Zn_Aire
<b>Reference process location:</b>	
<b>Product:</b>	ProcesoBatZn_Aire
<b>Amount:</b>	1.0 kg
<b>Impact method:</b>	ReCiPe Endpoint (I) [v1.11, December 2014]
<b>Normalization &amp; weighting set:</b>	Europe ReCiPe I/I, 2000 [year]
<b>Allocation method:</b>	economic
<b>Cutoff:</b>	none
<b>Date:</b>	07/05/2020 18:39

**Tabla 6.** Id del proceso



Los elementos que componen el sistema son los siguientes:

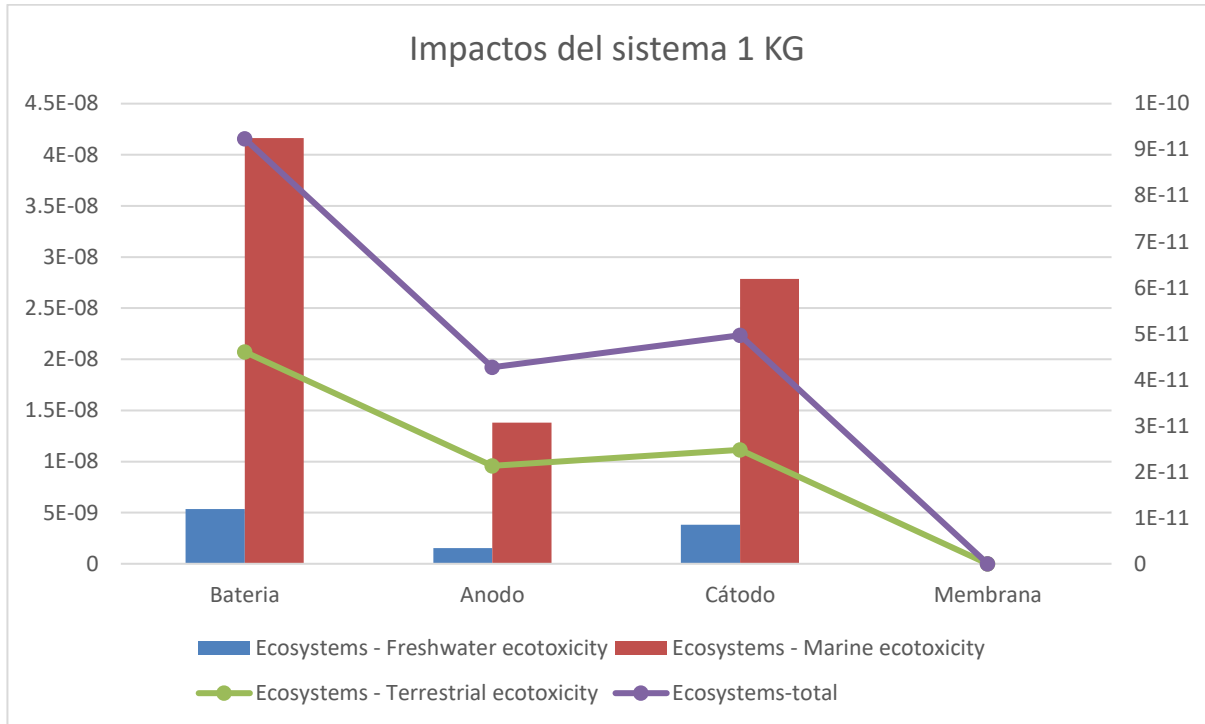
Flow UUID	Flow	Category	Sub-category	Unit	Result
04e608d4-494b-3223-a51d-5ed28edc82e5	Water, embodied in product, Europe	Economic	unspecified	kg	0.011067
16dce5ef-4727-35bb-912e-8feff07adbbf	Water, embodied in product, very high-water stress	Economic	unspecified	kg	0.179204
22e761f1-d30c-301b-b629-180e23755743	Tetrahydrofuran	Emission to air	high population density	kg	0.01792
c7bbd1f6-553d-3149-b6b7-2dd48c368db7	Alcohols, c6-12	Emission to air	high population density	kg	0.007009
638e1d01-db69-39c9-b486-57cfdc5b4f83	Fluoride	Emission to air	high population density	kg	7.13E-05
b0546417-3064-4878-bd6f-2da75cefd63	Manganese	Emission to air	high population density	kg	0.000357
e43a270f-4f88-4789-a0b8-7aba56677743	Nickel	Emission to air	high population density	kg	0.002009
38d7e9ef-5bea-4233-aa48-760785d060ed	Potassium hydroxide	Emission to air	high population density	kg	0.023655
f276d4ca-b1ad-4575-9442-e35b5e3b618b	Propylene oxide	Emission to air	high population density	kg	0.000203
67115e74-2c30-4ec3-a88f-eb6c745760a2	Tetrafluoroethylene (TFE)	Emission to air	high population density	kg	0.000555
2786c3d5-2f5a-4202-8219-223f9cc7a307	Vinyl acetate	Emission to air	high population density	kg	0.000956
748f22a9-eba4-4726-bef5-92c7442ce189	Zinc	Emission to air	high population density	kg	0.035841
b978d369-ac8b-4c1e-b010-d0e0406733d9	Carbon black	Emission to air	unspecified	kg	0.000999

**Tabla 7.** Configuración para cálculos

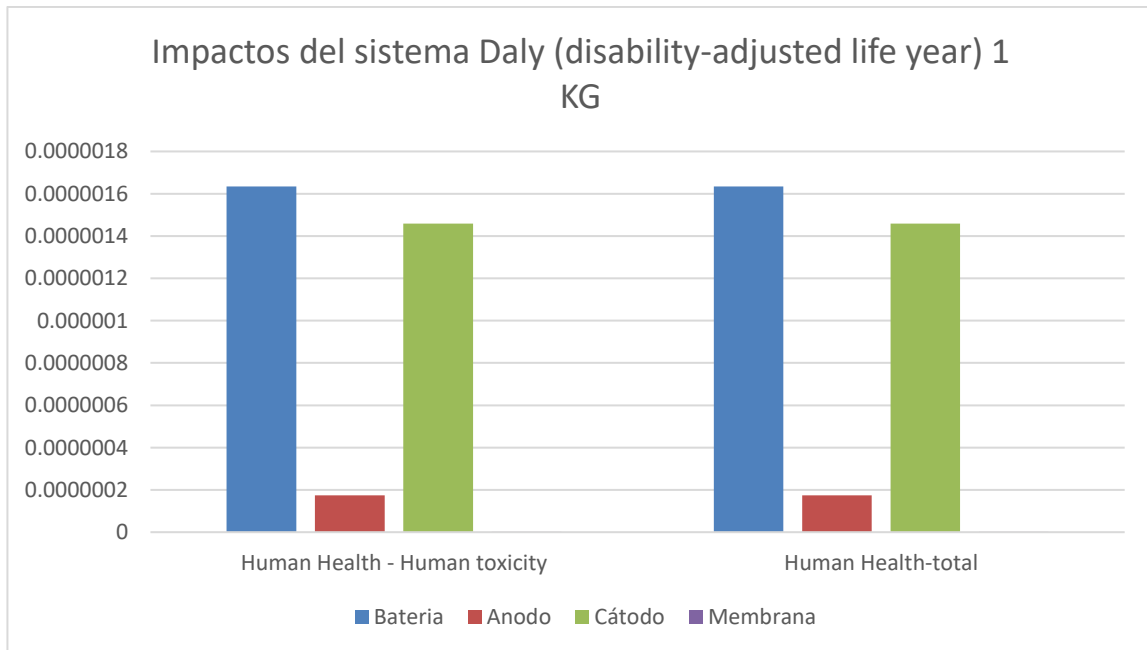
Los impactos que obtuvimos para la evaluación de 1 Kg como unidad funcional se detallan en la siguiente tabla:

Impactos del sistema				
Elemento	batería	ánodo	Cátodo	Membrana
<b>Ecosystems - Freshwater ecotoxicity (species. yr)</b>	1.19E-11	3.41E-12	8.47E-12	6.32E-17
<b>Ecosystems - Marine ecotoxicity (species. yr)</b>	9.25E-11	3.06E-11	6.19E-11	1.16E-16
<b>Ecosystems - Terrestrial ecotoxicity (species. yr)</b>	2.07E-08	9.59E-09	1.11E-08	1.52E-14
<b>Ecosystems-total (especies. yr)</b>	2.08E-08	9.62E-09	1.12E-08	1.54E-14
<b>Human Health - Human toxicity Daly (disability-adjusted life year)</b>	1.64E-06	1.75E-07	1.46E-06	2.27E-09
<b>Human Health-total Daly (disability-adjusted life year)</b>	1.64E-06	1.75E-07	1.46E-06	2.27E-09

**Tabla 8.** Impactos del sistema

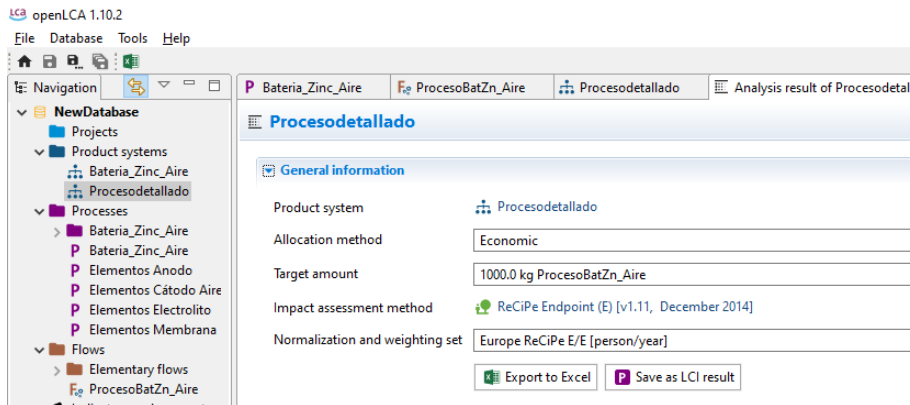


**Figura 19.** Impactos del sistema



**Figura 20.** Impactos del sistema

Ahora procedemos a presentar los datos para 1000 Kg de batería como unidad funcional del LCA de la batería.



**Figura 21.** Configuración para cálculos

El método usado y la versión son como se ven en la siguiente Figura.

<b>Product:</b>	<b>ProcesoBatZn/aire</b>
<b>Amount:</b>	1000.0 kg
<b>Impact method:</b>	ReCiPe Endpoint (E) [v1.11, December 2014]
<b>Normalisation &amp; weighting set:</b>	Europe ReCiPe E/E [person/year]
<b>Allocation method:</b>	economic
<b>Cutoff:</b>	none
<b>Date:</b>	09/07/2020 16:44

**Tabla 9.** Id del proceso

Los elementos que componen el sistema son los siguientes:

Flow UUID	Flow	Category	Sub-category	Unit	Result
04e608d4-494b-3223-a51d-5ed28edc82e5	Water, embodied in product, Europe	Economic	unspecified	kg	11.06654
16dce5ef-4727-35bb-912e-8feff07adbbf	Water, embodied in product, very high-water stress	Economic	unspecified	kg	179.2038
22e761f1-d30c-301b-b629-180e23755743	2,2,5,5-Tetramethyl-tetrahydrofuran	Emission to air	high population density	kg	17.92044
c7bbd1f6-553d-3149-b6b7-2dd48c368db7	Alcohols, c6-12	Emission to air	high population density	kg	7.008768
638e1d01-db69-39c9-b486-57cfdc5b4f83	Fluoride	Emission to air	high population density	kg	0.07128
b0546417-3064-4878-bd6f-2da75cefd6f3	Manganese	Emission to air	high population density	kg	0.357048
e43a270f-4f88-4789-a0b8-7aba56677743	Nickel	Emission to air	high population density	kg	2.0088

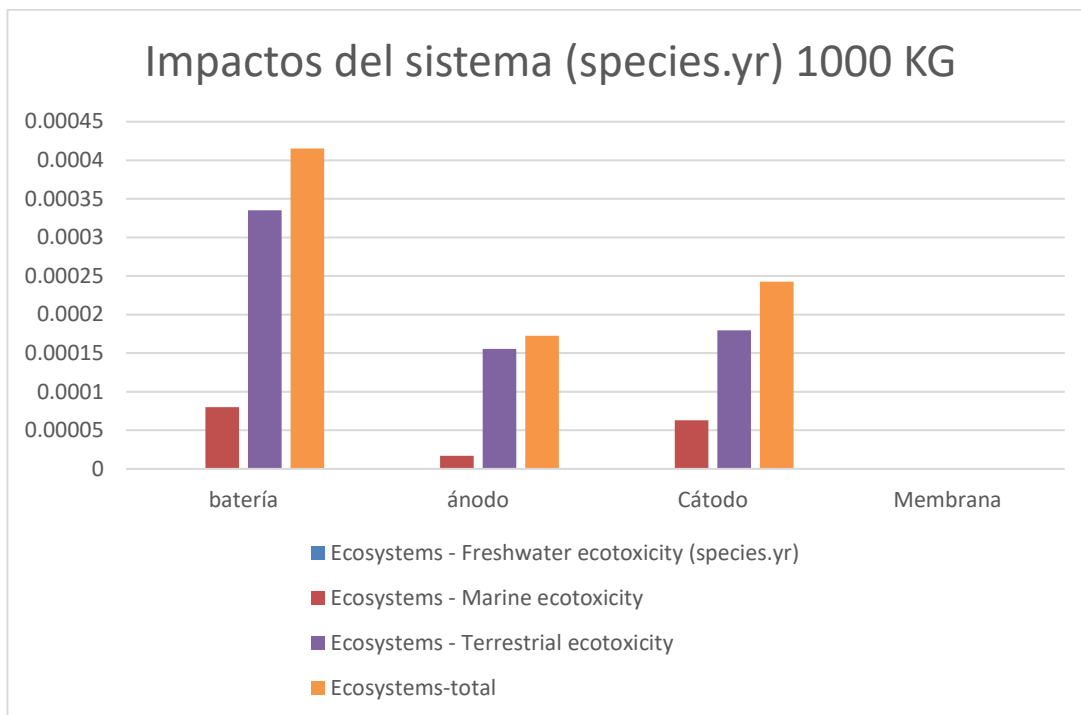
<b>38d7e9ef-5bea-4233-aa48-760785d060ed</b>	Potassium hydroxide	Emission to air	high population density	kg	23.65459
<b>f276d4ca-b1ad-4575-9442-e35b5e3b618b</b>	Propylene oxide	Emission to air	high population density	kg	0.202824
<b>67115e74-2c30-4ec3-a88f-eb6c745760a2</b>	Tetrafluoroethylene (TFE)	Emission to air	high population density	kg	0.554688
<b>2786c3d5-2f5a-4202-8219-223f9cc7a307</b>	Vinyl acetate	Emission to air	high population density	kg	0.9558
<b>748f22a9-eba4-4726-bef5-92c7442ce189</b>	Zinc	Emission to air	high population density	kg	35.84088
<b>b978d369-ac8b-4c1e-b010-d0e0406733d9</b>	Carbon black	Emission to air	unspecified	kg	0.999216

**Tabla 10.** Configuración para cálculos

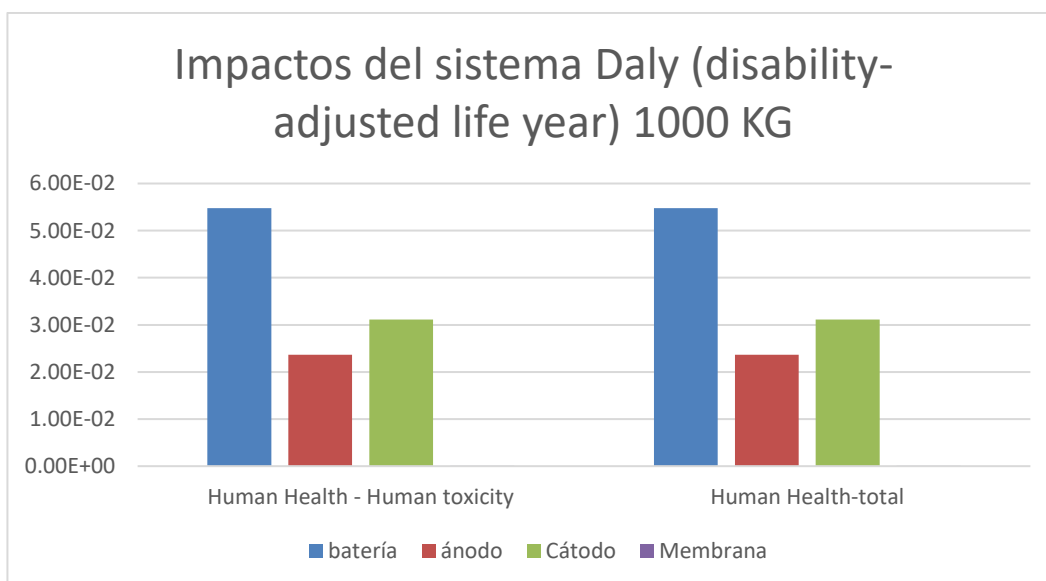
Los impactos que obtuvimos en el de 1000 Kg se detallan en la siguiente tabla:

Elemento	batería	ánodo	Cátodo	Membrana
<b>Ecosystems - Freshwater ecotoxicity (species. yr)</b>	1.19E-08	3.4E-09	8.46E-09	6.3274E-14
<b>Ecosystems - Marine ecotoxicity (species. yr)</b>	8.01E-05	1.70E-05	6.31E-05	1.16E-13
<b>Ecosystems - Terrestrial ecotoxicity (species. yr)</b>	3.35E-04	1.56E-04	1.80E-04	1.52E-11
<b>Ecosystems-total (species. yr)</b>	4.15E-04	1.73E-04	2.43E-04	1.54E-11
<b>Human Health - Human toxicity Daly (disability-adjusted life year)</b>	5.48E-02	2.36E-02	3.11E-02	2.27E-06
<b>Human Health-total Daly (disability-adjusted life year)</b>	5.48E-02	2.36E-02	3.11E-02	2.27E-06

**Tabla 11.** Impactos del sistema



**Figura 22.** Impactos del sistema



**Figura 23.** Impactos del sistema

Cuando realizamos los cálculos para 1000 Kg se mantienen las proporciones de impacto de cada componente, aunque el valor absoluto de cada una de ella difiere notablemente. Se mantiene una dependencia lineal sobre la cantidad de masa tomada como Unidad Funcional (FU, de 1 kg o 1000 kg respectivamente) que provocan un aumento lineal de la contribución en cada categoría de impacto por parte de cada uno de los componentes de la batería, siendo la membrana en todos los casos la que menos contribuye. El análisis detallado de la

posible desviación de la linealidad debido a factores de escala en el ciclo completo (extracción de minerales, transporte, factores de escala en la fabricación, etc....) podrá analizarse en trabajos futuros, donde además se utilicen otros métodos LCIA más allá del ReCiPe, como ILCD u otras.

## 7. Comparación con estudios previos

En el estudio Environmental and Economical Assessment for a Sustainable Zn/air battery desarrollado por profesores de la UPCT se utilizó la metodología ILCD (sistema de datos del análisis de ciclo de vida por sus siglas traducidas) y la metodología ReCiPe (basada en puntos intermedios y finales) para calcular los impactos generados por una Bateria de Zn/Aire (F. Santos 2020)

En la metodología ReCiPe se organizan todas las categorías de impacto en tres grupos principales, que fueron: Salud humana ( $1.4503E-05$  DALY), Ecosistemas ( $7.0898E-08$  especies / año) y Agotamiento de recursos ( $1.8393$  USD2013).

La contribución relativa de cada subconjunto muestra que el cátodo está contribuyendo con más de la mitad del impacto en los tres grupos, seguido por la membrana (alrededor de un tercio), luego el ánodo (contribución de Zn) y finalmente una contribución menor de electrolito (alrededor del 3%).

Por otro lado, al realizar el estudio con el Software Open LCA utilizando la metodología de ReCiPe se observan los mayores impactos en las categorías de ánodo y cátodo significando más del 70% estos dos criterios. El resultado que obtenemos en dos categorías principalmente que son Total de Ecosistema (en Especies por año) donde el ánodo y el cátodo aportan más del 70% y Salud humana (En DALY disability-adjusted life year).

Cuando evaluamos este sistema y vemos el rendimiento de una batería vs 1000 baterías y se condicionan los diversos parámetros de los cálculos, llama mucho a la atención que, al incrementarse el número de cálculos, disminuye considerablemente el aporte que hacen la membrana y el electrolito.

Este tipo de baterías analizadas son muy competitivas en el mercado por precio y peso, dos factores claves en los sistemas de almacenamiento y la principal característica deseada por los fabricantes de automóviles.

## 8. Conclusión

Tras la realización de este trabajo de fin de Máster (TFM) y el uso de la plataforma libre Open LCA que permite la realización de análisis de ciclos de vida, hemos llegado a las siguientes conclusiones:

Simapro es un software licenciado muy potente y utilizado mucho en el ámbito de las ingenierías y las ciencias para la realización de diversos análisis de ciclo de vida. Sin embargo, Open LCA tiene todo el potencial para realizar estos estudios gracias a su arquitectura ligera, la posibilidad de insertar diversas bases de datos y modelos de cálculo y además es software libre, lo cual lo hace accesible a toda la comunidad científica.

En cuanto a los resultados cuantitativos del cálculo LCA de la batería Zn/Aire, destacamos que el aporte que realiza la membrana es muy pequeño comparado con los otros componentes tal como se pudo apreciar de las figuras 19 y 20.

Cuando se hace la evaluación de la batería, se obtienen dos categorías de impacto principalmente que son el impacto en el ecosistema en Especies por año con valores que tienen orden de magnitud de nano unidades en el ánodo y cátodo mientras que la membrana por su parte aporta los valores más pequeños por el orden de pico y menores. Otro factor es la toxicidad expresada en DALY donde tenemos valores de micro unidades para ánodo y cátodo mientras que la membrana tiene valores de nano.

Existirá un consumo muy alto de baterías los próximos años, será necesaria una cantidad muy elevada para el despliegue de las renovables y el uso de vehículos eléctricos por lo que se debe analizar muy bien el impacto de estos sistemas al medio ambiente para que su uso sea sostenible. Será igualmente necesario en el futuro, plantear estrategias de reciclado que contribuyan a reducir el uso de recursos que estas tecnologías plantean.



## 9. Referencias bibliográficas

- (1) Bockris, J. O.; Nagy, Z.; Damjanovic, A. On the Deposition and Dissolution of Zinc in Alkaline Solutions. *Journal of The Electrochemical Society* **2007**, *119* (3), 285. <https://doi.org/10.1149/1.2404188>.
- (2) Castro-Martínez, C.; Beltrán-Arredondo, L. I.; Ortiz-Ojeda, J. C. Producción de biodiesel y bioetanol: ¿una alternativa sustentable a la crisis energética? *Ra Ximhai* **2012**, 93–100. <https://doi.org/10.35197/rx.08.03.e2.2012.09.cc>.
- (3) Condurache-Bota, S. Bismuth Oxide Thin Films for Optoelectronic and Humidity Sensing Applications. In *Bismuth - Advanced Applications and Defects Characterization*; InTech, 2018.
- (4) Dehghani-Sanij, A.R., Tharumalingam, E., Dusseault, M.B., Fraser, R., 2019. Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* *104*, 192–208. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.023>
- (5) Emas, R. The Concept of Sustainable Development: Definition and Defining Principles. **2015**, 3. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75107>.
- (6) F. Santos, A. Urbina, J. Abad, R. López, C. Toledo, A.J. Fernández Romero. Environmental and Economical Assessment for a Sustainable Zn/air battery *Chemosphere*. 2020 Jul; 250:126273.
- (7) IRENA. (2019). Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition), Abu Dhabi: IRENA.ORG. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Apr/IRENA\\_Global\\_Energy\\_Transformation\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Apr/IRENA_Global_Energy_Transformation_2019.pdf)
- (8) Li, Y., Dai, H., 2014. Recent advances in zinc–air batteries. *Chem. Soc.*

Rev. 43, 5257–5275. <https://doi.org/10.1039/C4CS00015C>

(9) Liu, Q., Wang, Y., Dai, L., Yao, J., 2016. Scalable Fabrication of Nanoporous Carbon Fiber Films as Bifunctional Catalytic Electrodes for Flexible Zn/Air Batteries. *Advanced Materials* 28, 3000–3006. <https://doi.org/10.1002/adma.201506112>

(10) Lu Xuequin, Huang Fuzhen, Liu Gang. (2009). *The Challenges of Technologies for fuel Cells and its application on vehicles*. China: Shanghai University of Electric Power.

(11) McManus, M.C., 2012. Environmental consequences of the use of batteries in low carbon systems: The impact of battery production. *Applied Energy* 93, 288–295. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.062>

(12) U.S. Department of Energy. (2019). *Annual Energy Outlook 2019*. 2020, de U.S. Energy Information Administration Sitio web: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/aeo2019.pdf>

(13) Structural modifications and ionic transport of PVA-KOH hydrogels applied in Zn/Air batteries. Santos, F., Tafur, J.P., Abad, J., Fernández Romero, A.J. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2019, 850, 113380

## 10. Anexos Sobre Open LCA

La organización Green Delta elabora y distribuye un software denominado Open LCA. Este es un software de código abierto, de acuerdo con los estándares de la iniciativa de código abierto. Fue desarrollado para que LCA y la Evaluación de sostenibilidad fueran más accesibles y asequibles inicialmente en Europa y más tarde en otros países, especialmente en los Estados Unidos.

Es un software que se utiliza para realizar estudios de ciclo de vida con diferentes plataformas y bases de datos.

## 11. Proceso de descarga de Open LCA

Para instalar Open LCA lo primero que debemos hacer es dirigirnos a la página web [www.openlca.org](http://www.openlca.org).



Figura 24. Página principal de Open LCA

Luego nos redirige a un formulario donde pide colocar nuestros datos y especificar cual será el uso que se le dará al software.

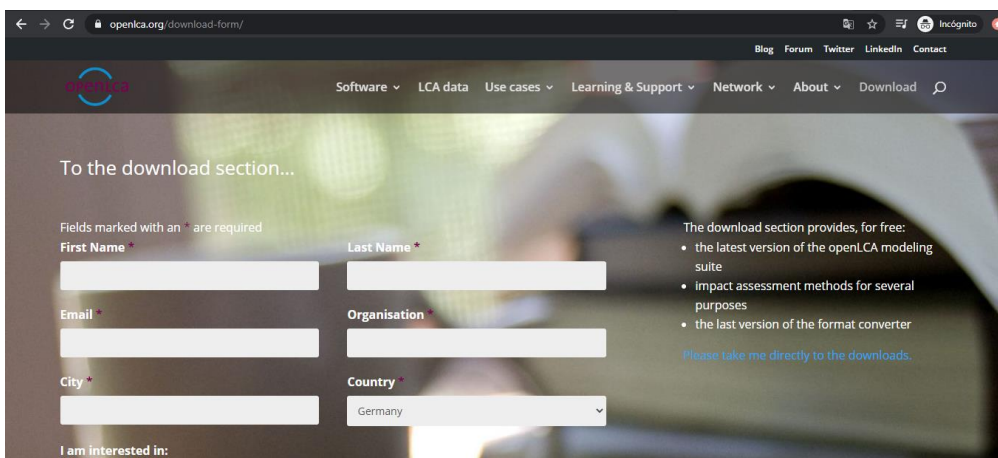


Figura 25. Sección de descargar de OpenLCA

Luego procedemos a indicar que plataforma deseamos, en nuestro caso seleccionamos Windows de 64 bits.

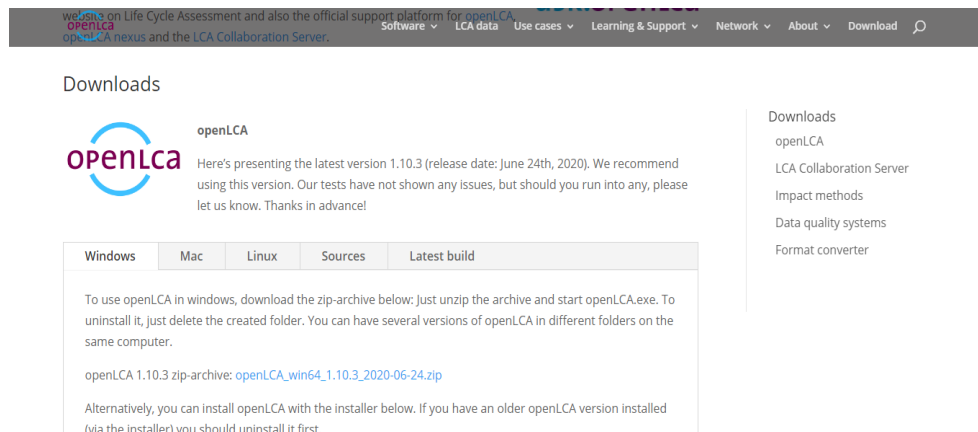


Figura 26. Indicar plataforma deseada

Una vez descargado el archivo, procedemos a correr la instalación.

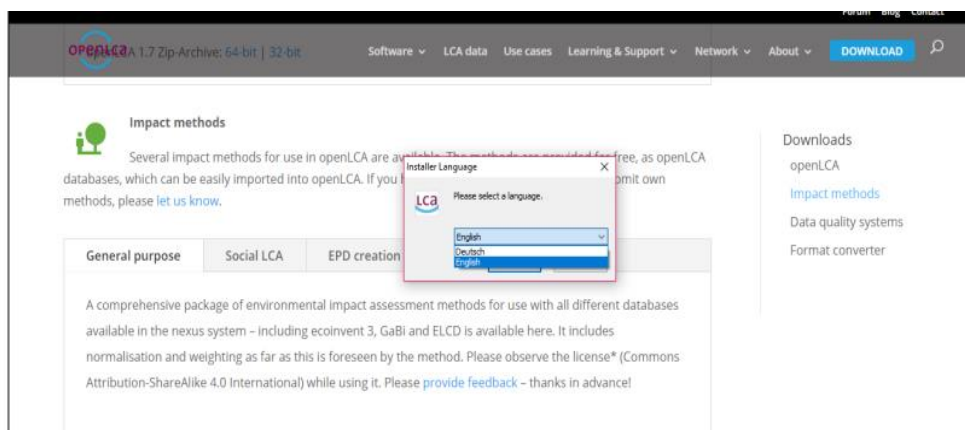


Figura 27. Indicar el idioma de la plataforma deseado

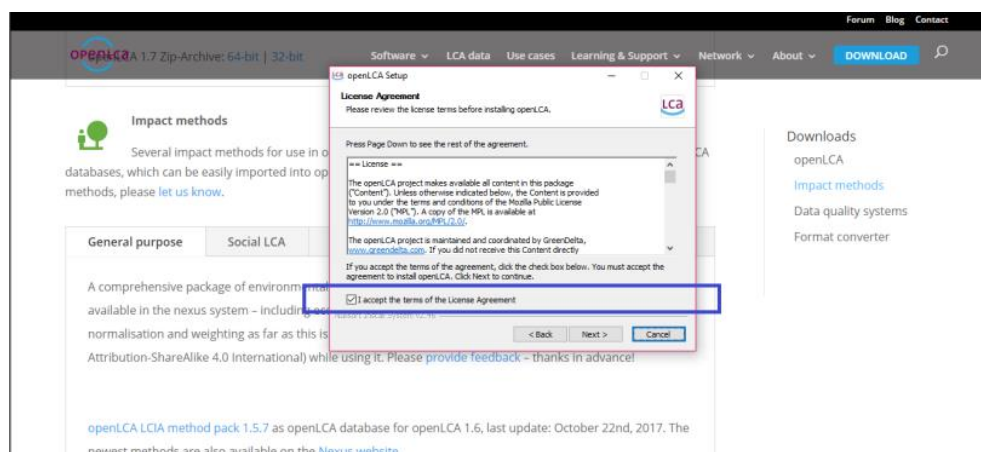


Figura 28. Aceptar términos y presionar dos veces siguiente y luego instalar

## 12. Proceso de Configuración de Open LCA

Una vez instalados el software procedemos a configurar el entorno agregando primero la base de datos. Para crear una nueva base de datos vacía hacer clic derecho sobre el cuadro de “Navigation” y seleccionar “New database”.

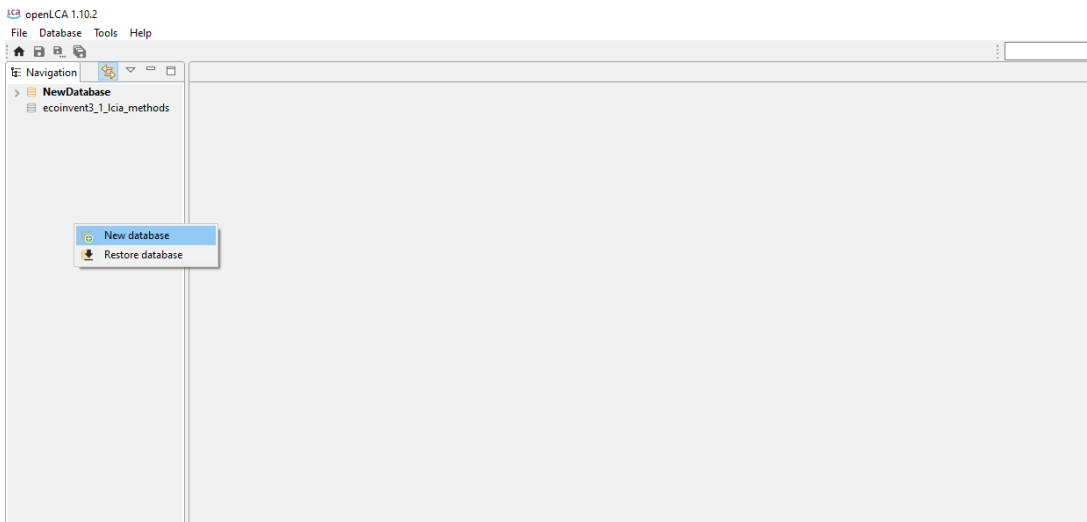


Figura 29. Pantalla inserción de base de datos

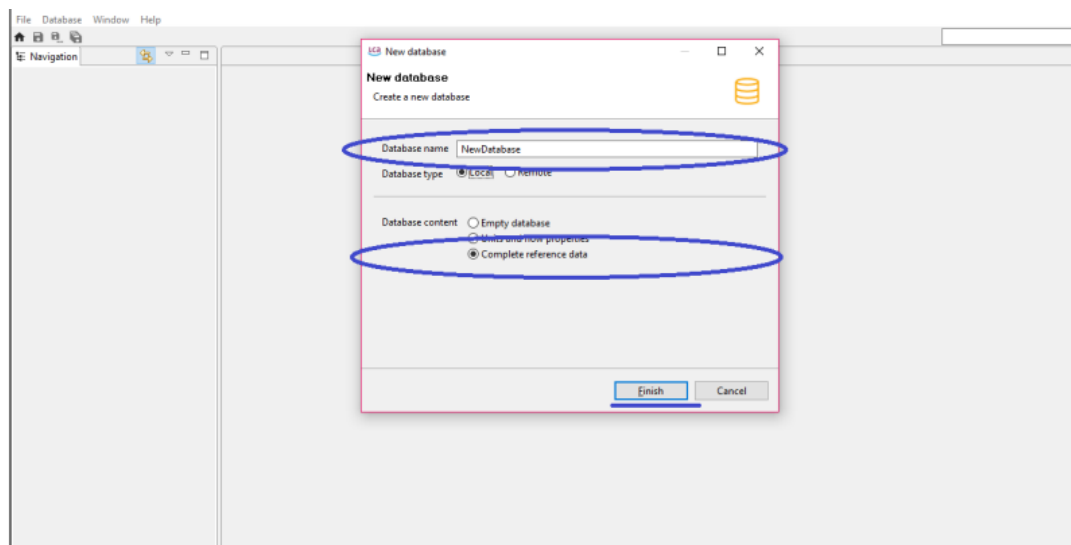
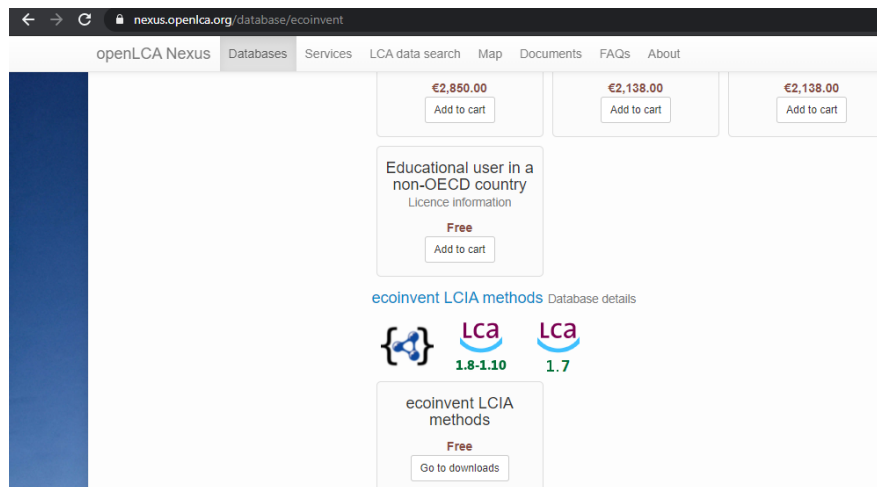


Figura 30. Proceso de instalación de base datos

Una vez realizado ese proceso, debemos luego descargar la base de datos con la cual vamos a trabajar y posteriormente insertarla. Para ella vamos a <https://nexus.openlca.org/> y damos clic sobre “Database”.

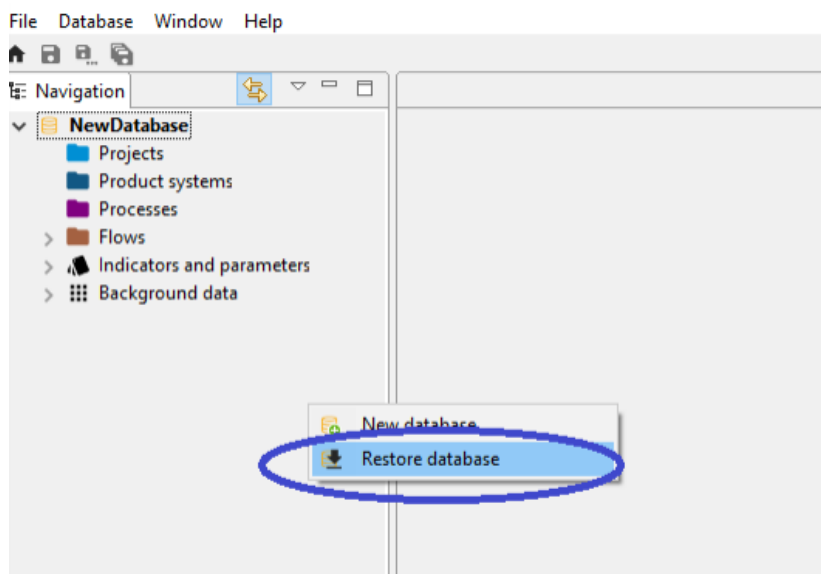
Debemos seleccionar cuidadosamente del extenso repositorio de bases de datos

disponibles ya que tienen diferentes aplicaciones. Para nuestro caso, usamos Ecoinvent 3 con LCIA Methods.



**Figura 31.** Descargamos la base de datos

Luego en el programa presionamos “Restore database” para poder insertar el archivo que hemos descargado.



**Figura 32.** Inserción de la base de datos

Se abrirá una ventana emergente en la cual debemos ubicar el archivo extensión .zolca que descargamos. Este archivo es el que contiene los datos para poder realizar los cálculos.

Una vez instalada la base de datos procedemos a otro paso muy importante que consiste en descargar e instalar el método de impacto que usaremos para calcular

nuestro sistema.

Para ello nos dirigimos a <https://www.openlca.org/download/> en la sección de Impact Methods y seleccionamos la opción deseada. En nuestro caso optamos por el pack 1.5.7

**Impact methods**

Several impact methods for use in openLCA are available. The methods are provided for free, as openLCA databases, which can be easily imported into openLCA. If you have any comments or would like to submit own methods, please [let us know](#).

General purpose | Social LCA | EPD creation | ecoinvent | AWARE

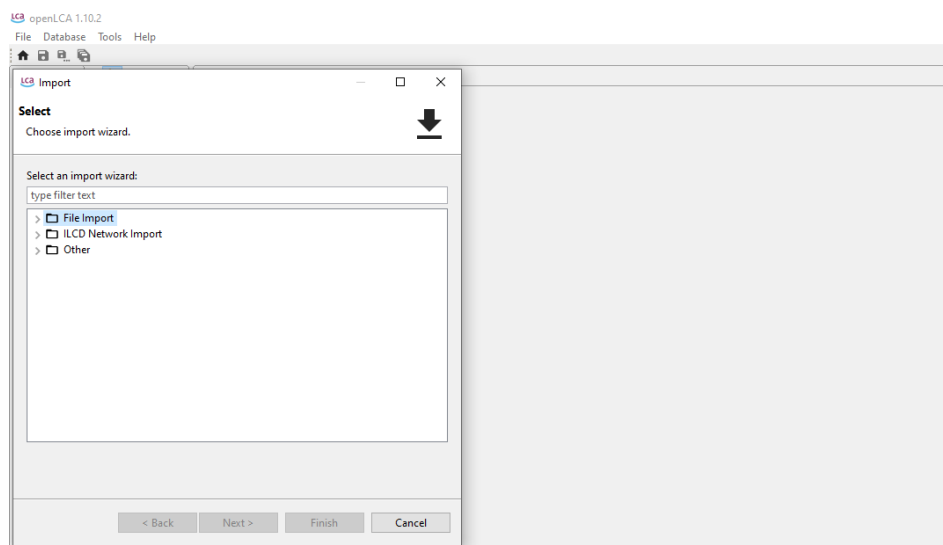
A comprehensive package of environmental impact assessment methods for use with all different databases available in the nexus system - including ecoinvent 3, GaBi and ELCD is available here. It includes normalisation and weighting as far as this is foreseen by the method. Please observe the license\* (Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International) while using it. Please [provide feedback](#) - thanks in advance!

Note that **newer openLCA LCIA methods**, especially the comprehensive 2.0 package for "countrified" databases [released April 2018](#), are available on openLCA Nexus from now on only, here: <https://nexus.openlca.org/database/openLCA%20LCIA%20methods>.

[openLCA LCIA method pack 1.5.7](#) as openLCA database for openLCA 1.6 (and also 1.7), last update: October

**Figura 33.** Descarga e inserción del método de impacto

Luego en la ventana de LCA procedemos a hacer clic en File y luego en insertar. Nos saldrá una ventana como la siguientes.

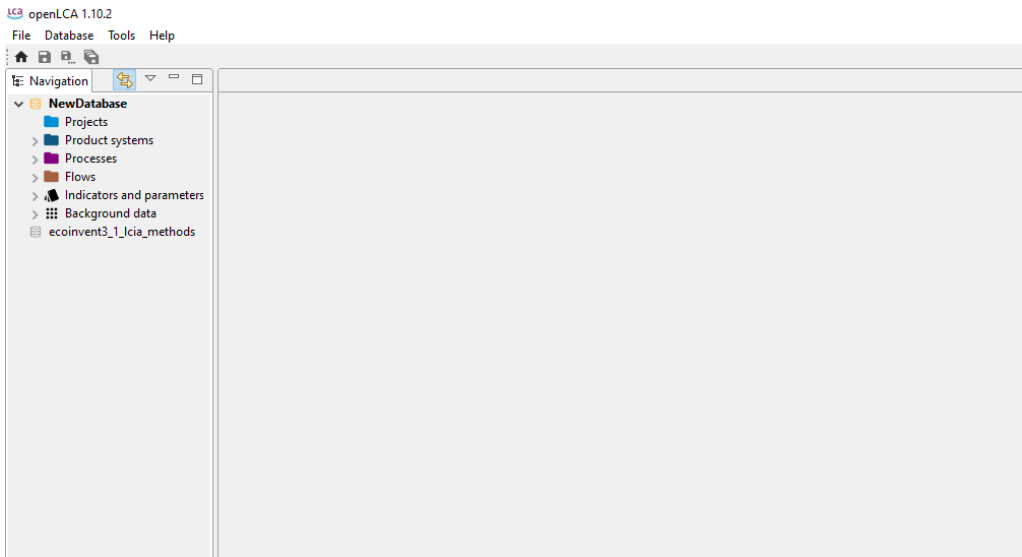


**Figura 34.** Descarga e inserción del método de impacto

En la pestaña Other buscamos la opción "Import Entire Database" y luego damos click en next, después buscamos la opción "From exported zolca file" que es para insertar el segundo archivo que descargamos que debe estar en la carpeta que definimos anteriormente.

### 13. Utilización de Open LCA

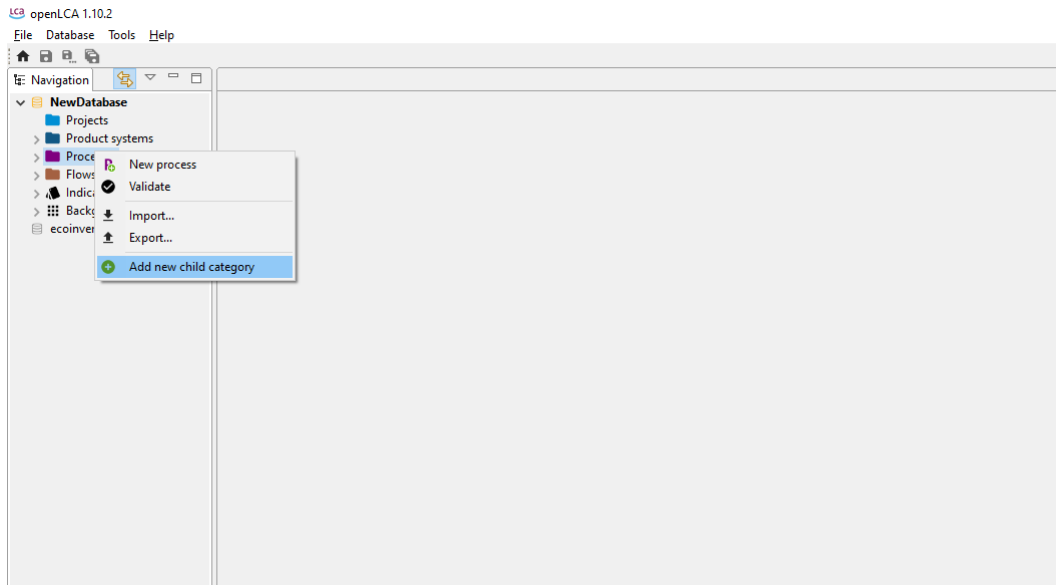
Una vez cargada la base de datos tenemos tres categorías: sistema de productos, procesos y flujos.



**Figura 35.** Vista plana de la plataforma

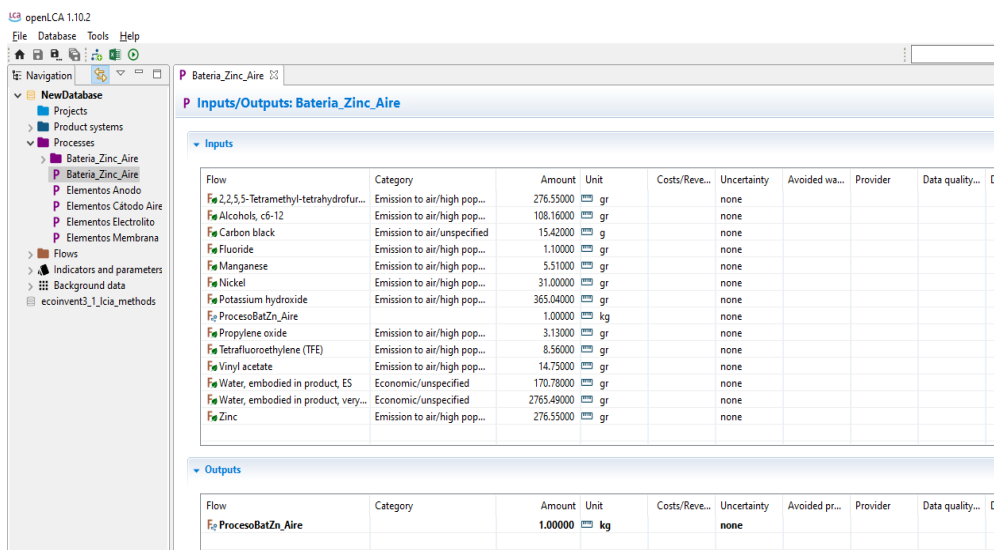
Con esta pantalla lo primero que procedemos a hacer es crear una categoría del producto. Para ellos vamos a realizar clic derecho sobre “Processes” y dar clic sobre “Add new child category”. Le colocamos el nombre con que lo deseamos identificar y luego hacemos click en Ok.





**Figura 36.** Creación de categoría

Para la creación de un producto se necesita de procesos los cuales se crean de la siguiente manera, clic derecho sobre “Processes” y luego seleccionar “New Processes”, llamaremos una carpeta como el producto o material que se quiere hacer. Para nuestro caso lo llamamos Batería Zinc\_Aire y procedemos a insertar todos los componentes del sistema que vamos a analizar.

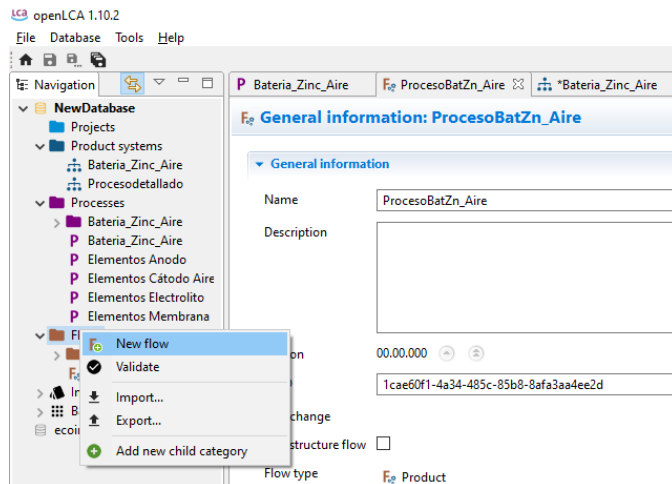


**Figura 37.** Creación de proceso e inserción de datos

Aquí debemos tener en consideración varios aspectos, especialmente la unidad y la cantidad de la sustancia que se utiliza. Cada componente del sistema se agrega en la pestaña de inputs/outputs y se deben insertar un elemento a la vez. Cuando terminamos de insertar las entradas del sistema, procedemos a entrar las salidas del

sistema.

Una vez finalizada esta etapa se establece el mecanismo de flujo, es decir, las relaciones o interdependencias de los diversos sistemas, para este caso dar clic derecho en “new Flow”



**Figura 38.** Realización de los flujos

Tenemos la opción de seleccionar los siguientes tipos de flujo:

- Flujo elemental: considerado como un recurso de la naturaleza
- Producto
- Waste: Hace referencia a los residuos.

Luego de seleccionar el que se considere, se debe establecer la propiedad de este flujo, para este nuestro caso es masa (Mass), y luego se procede a dar clic en “Finish”. Una vez creado el flujo, procedemos a crear el sistema del producto que se quiere desarrollar. Para crear el sistema del producto damos clic derecho sobre “Product systems” y damos clic sobre “New product system”.

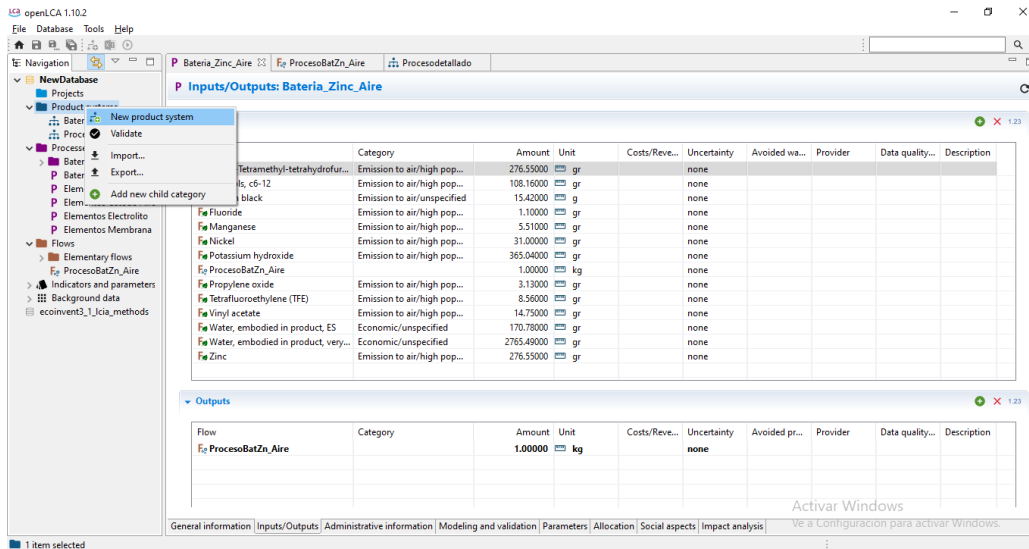


Figura 39. Realización de sistemas

Seguimos las instrucciones del sistema y ajustamos los parámetros de acuerdo con lo requerido por nuestro sistema y obtenemos una imagen como la siguiente:

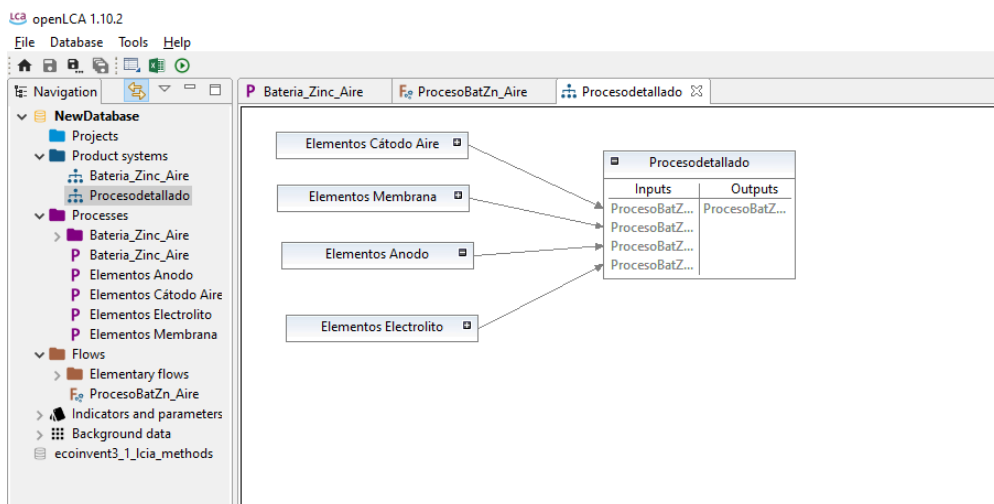
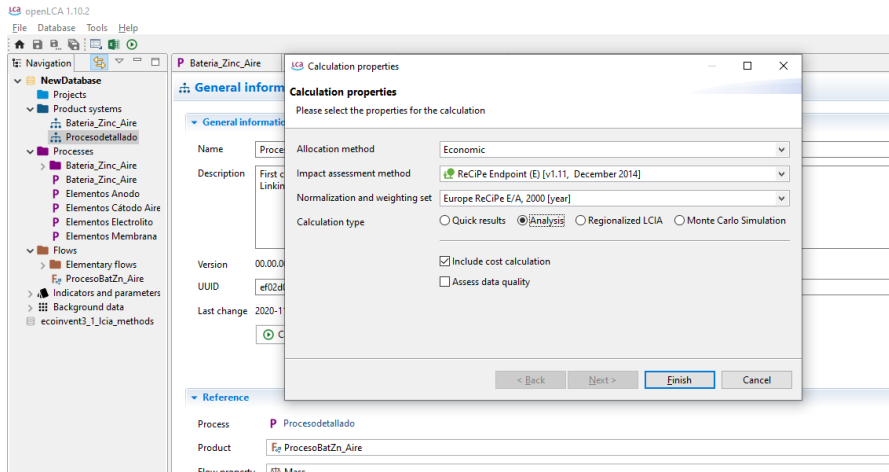


Figura 40. Sistema realizado

### Resultados del sistema

Cuando ya tenemos nuestro sistema listo, procedemos a dar clic sobre "Calculate". En la ventana emergente debemos seleccionar el método que vamos a utilizar para la evaluación del impacto.



**Figura 41.** Propiedades de cálculo

Seleccionamos el método de impacto que deseamos, preferiblemente el que se adapte mejor a nuestros requerimientos. Damos clic en la opción “Análisis”, seguido por clic en “Finish”.

Ya concluido el proceso de cálculo, tenemos varias opciones de visualización, tanto en la misma plataforma de OpenLCA como las opciones de exportar hacia otras plataformas como hojas de cálculo y métodos de programación.