

5.1 Revisión de la evaluación impacto Ambiental de tecnologías de almacenamiento de energía

Octubre, 2020



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



INECC
INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO



Danish Energy
Agency



Directorio

Dra. María Amparo Martínez Arroyo

Directora General del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

Elaboración, edición, revisión y supervisión:

Dra. Claudia Octaviano Villasana

Coordinadora General de Mitigación al Cambio Climático

Ing. Eduardo Olivares Lechuga

Director de Proyectos Estratégicos en Tecnologías de Bajo Carbono

Dr. Ing. Roberto Ulises Ruiz Saucedo

Subdirector de Innovación y Transferencia Tecnológica

Mtro. Loui Algren

Asesor de la Agencia de Energía de Dinamarca

Dra. Amalia Pizarro Alonso

Asesora del Programa México-Dinamarca para Energía y Cambio Climático

Este reporte es parte del estudio:

Mapa de ruta tecnológica y potencial de mitigación del almacenamiento de energía a escala de servicios en México

Preparado por:

Dra. Aída Viridiana Vargas Zavala

Consultora, COWI, Mexico-Denmark Program for Energy and Climate Change

Por encargo de INECC con apoyo del Programa México-Dinamarca para Energía y Cambio Climático

D.R. © 2020 Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

Bld. Adolfo Ruíz Cortines 4209,

Jardines en la Montaña, Ciudad de México. C.P. 14210

<http://www.gob.mx/inecc>



Contenido

Contenido	5
Tablas.....	6
Figuras.....	7
Acronimos.....	8
1. Introducción.....	11
2. Impactos ambientales de los sistemas de almacenamiento de energía.....	12
2.1 Enfoque metodológico y limitaciones	12
2.2 Principales impactos ambientales de las tecnologías de almacenamiento.....	14
2.2.1 Bombeo hidráulico.....	19
2.2.2 Baterías.....	19
3. Potencial de mitigación de las tecnologías de almacenamiento de electricidad.....	24
3.1 Indicadores para evaluar el rendimiento energético y ambiental de los sistemas de almacenamiento de energía.....	25
3.2 Indicadores de eficiencia energética que abordan la fase de fabricación....	29
3.3 Indicadores de desempeño ambiental y energético de la fase de operación	30
3.4 Indicadores ambientales de uso genérico	30
3.5 Indicadores de desempeño ambiental y energético de la fase de fin de vida útil	31
3.6 Indicadores para evaluar el rendimiento energético y ambiental de baterías	33
4. Análisis de ciclo de vida de tecnologías de almacenamiento.....	36
4.1 Impactos ambientales.....	38
4.2 Cambio climático (CC).....	39
4.3 Toxicidad humana (HT).....	40
4.4 Agotamiento de recursos fósiles.....	41
5. Resumen de impactos ambientales por categoría.....	42
6. Conclusiones.....	44
Referencias.....	46



Tablas

- Tabla 2.1.** Principales aspectos ambientales considerados para la evaluación de sistemas de almacenamiento de energía, desarrollados por (Baumann et al., 2019).
- Tabla 2.2.** Impactos ambientales cualitativos de los sistemas de almacenamiento de energía. Fuente: (Guney & Tepe, 2017).
- Tabla 2.3.** Comparación entre los diferentes tipos de baterías. Fuente: (Guney & Tepe, 2017).
- Tabla 2.4.** Environmental impacts of different types of batteries. Fuente: (Dehghani-Sanij et al., 2019).
- Tabla 2.5.** Air, water and solid wastes for CTG battery manufacture (g/kg of battery, unless differently stated), Fuente: (Dehghani-Sanij et al., 2019).
- Tabla 2.6.** Emissions to air, water and solids caused by battery recycling (g/kg of battery, unless differently stated). Fuente: (Dehghani-Sanij et al., 2019)
- Tabla 2.7.** Specific effect per kg of battery production. Fuente: (Dehghani-Sanij et al., 2019)
- Tabla 3.1.** Indicator's (environmental and energy) metric parameter correlation. Indicators. Fuente: (Kourkoumpas et al., 2018).
- Tabla 3.2.** Typical ESOI values for battery storage technologies. Fuente: (Kourkoumpas et al., 2018).
- Tabla 3.3.** Battery technologies and characteristics. Fuente: (Kourkoumpas et al., 2018).
- Tabla 3.4.** Characterized GHG emissions per kg of produced battery and MJ of capacity. Fuente: (Kourkoumpas et al., 2018).
- Tabla 3.5.** LCA studies on batteries. Fuente: (Kourkoumpas et al., 2018).
- Tabla 3.6.** Indicator's (environmental and energy) metric parameter correlation. Indicators. Fuente: (Kourkoumpas et al., 2018).
- Tabla 4.1.** Production unit shares (in percentage). Fuente: (Oliveira et al., 2015).
- Tabla 4.2.** Technical Characteristics of selected storage systems. Fuente: (Oliveira et al., 2015).



Figuras

- Figura 1.** Mean CTG CO₂ emissions with \pm one standard deviation to produce a kg of different battery. Fuente: (Dehghani-Sanij et al., 2019)
- Figura 2.** Mean criteria contaminant emissions (g) per kg of battery for different batteries. Fuente: (Dehghani-Sanij et al., 2019).
- Figura 4.1.** Overview of LCA methodology. Fuente: (Oliveira et al., 2015).
- Figura 4.2.** Single score contribution of all the storage technologies over all the impact categories. Fuente: (Oliveira et al., 2015).
- Figura 4.3.** Overview of LCA methodology. Fuente: (Oliveira et al., 2015).
- Figura 4.4.** Infrastructure contribution to climate change. Fuente: (Oliveira et al., 2015).
- Figura 4.5.** Infrastructure (inc. EOL) and use stage contributions to human toxicity. Fuente: (Oliveira et al., 2015).
- Figura 4.6.** Infrastructure (inc. EOL) and use stage contributions to fossil depletion. **Fuente:** (Oliveira et al., 2015).
- Tabla 5.1.** Tabla resumen de los principales impactos ambientales de las tecnologías de almacenamiento estudiadas. Fuente: Elaboración propia, con datos de (Sternberg & Bardow, 2015), (Oliveira et al., 2015), (Wang et al., 2018), (Kourkoumpas et al., 2018).



Acronimos

°C	Degree Celsius
ACAES	Adiabatic Compressed Air Energy Storage
Al	Aluminium
Al-CFx	Aluminium fluorine battery
AS	Authors selected criteria
As	Arsenic
AVE	Avoided CO ₂ Emissions
BCL	Battery Calendar Life
BCYL	Battery Cylindrical Life
BDT	Battery Total Degradation
Be2011	Belgium 2011 Electricity mix
BTD	Battery Total Degradation
CAES	Compressed Air Energy Storage
CC	Climate Change
CED	Cumulated Energy Demand
CH ₄	Metane
CO	Carbon monoxide
Co	Cobalt
CO ₂	Carbon dioxide
CO ₂ PBT	CO ₂ equivalent Payback Time
CTG CO ₂ emissions	Cradle- To-Gate CO ₂ emissions
Cu	Copper
DE	Delivered Energy
DM	Delphi method
DOD	Depth of Discharge
EEIM	Embodied Energy for Infrastructure of Materials
EOSG	Electricity used from On-site Generation
EPBT	Energy Payback Time
EROI	Energy Return on (energy) Investment
ESOI	Energy Stored on Energy Invested
ESP	Energy storage potential ESP
Exp	Expert interviews/survey
FD	Fossil resource depletion
FG	Focus Groups



g	gram
GHG	Greenhouse Gases
GP _{ER}	Gross Primary Energy Requirement
GTG	Cradle-to-gate
GW	Global Warming
GWP	Global Warming Potential
h	hour
Hg	Mercury
HT	Human toxicity
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
kg	kilograms
kgI, 4-DCB _{eq}	kilograms of 1,4-dichlorobenzene equivalents
kgCO _{2eq}	kilograms of carbon dioxide equivalent per kilowatt-hour
kgSb _{eq}	kilograms of of antimony (Sb) equivalents
KPI	Key Performance Indicator
kWh	kilo Watt hours
LCA	Life Cycle Assessment
LCCE	Life Cycle CO ₂ Emissions
LFP	Li- iron-phosphate
LFP-LTO	Li-iron-phosphate / Li-titanate
Li	Lithium
LiFePO ₄	Lithium Iron Phosphate battery
Li-Ion, LiB	Lithium Ion Batteries
LiMnO ₄	Lithium oxido(trioxo)manganese battery
LiPF ₆	Lithium hexafluorophosphat
Lit	Literature
LMO	Li-manganese oxide
MD	Model driven
MJ	Mega joules
Mt	Megatonns
MW	Mega watt
N/A	No information given/available
N ₂ O	Nitrous oxide, dinitrogen oxide, dinitrogen monoxide
NaNiCl	Sodium Nickel Chloride Battery
NaS, NAS	Sodium Sulfur battery
NCA	Nickel-cobalt-aluminium oxide
NDE,	Net Delivered Energy
NER	Net Energy Ratio
Ni	Nickel



NiMH	Nickel metal hydride battery
NMC	Nickel-cobalt-manganese-oxide
NMP solvent	N-Methyl-2-pyrrolidone
NO _x	Nitrogen oxides
P2G (methane)	Power to Gas
Pb-A, LA	Lead acid battery
PEMFC	Proton Exchange Fuel Cell
PHES	Pumped hydroelectric energy storage
PHS, PHydro	Pumped Hydro Storage
PM	Particulate Matter (PM)
PM	Particulate matter
PV	Photovoltaic
RDE	Reduction of the Direct CO ₂ Emissions
Sb	Nitrous oxide
SE	Storable Energy
SED	Specific Energy Density
SMES	Super conducting magnetic energy storage
SO ₂	Sulfur dioxide
SOH	State of Health
SO _x	Sulfur oxides
SR	Share of Renewable Energy System
TACAS	Thermal and compressed air storage
TWh	Tera Watt-hours
UCTE	Union for the Coordination of the Transmission of Electricity
VOC	Volatile Organic Compounds
VRLA	Vanadium redox lead acid
W	Watt
Zn	Zinc



1. Introducción

En la actualidad, el almacenamiento de energía es una parte fundamental de los sistemas eléctricos puesto que permiten, mejorar la estabilidad de la red, fomentar la penetración de fuentes renovables de energía, incrementar la eficiencia de los sistemas de energía, disminuir el uso de fuentes fósiles y disminuir los impactos ambientales asociados con la producción de energía eléctrica (Aneke & Wang, 2016; Guney & Tepe, 2017; Luo et al., 2015).

Los sistemas de almacenamiento contribuyen al incremento de la eficiencia y pueden ser un elemento fundamental de los sistemas eléctricos, a medida que la generación de energía con fuentes renovables se incrementa, principalmente por la intermitencia propia de energía solar y la eólica, que las hace poco confiables para un suministro constante de energía. De esta manera, se puede almacenar el exceso de energía generada cuando los recursos renovables se encuentran disponibles para utilizarla una vez que la disponibilidad del recurso es nula (Aneke & Wang, 2016; Guney & Tepe, 2017; Kourkoumpas et al., 2018; Luo et al., 2015).

Los sistemas de almacenamiento de energía representan grandes beneficios en la gestión energética incrementan la eficiencia en los sistemas de proceso, contribuyen a reducir la cantidad de combustibles, disminuyen las emisiones de CO₂ y de otros gases de efecto invernadero asociados con el calentamiento global y favorecen la penetración de las renovables y el desplazamiento de la demanda (load shifting), (Aneke & Wang, 2016; Guney & Tepe, 2017; Kourkoumpas et al., 2018; Luo et al., 2015).

El objetivo de este trabajo es identificar la información disponible sobre los impactos del almacenamiento de energía desde su fabricación hasta su disposición final y con ello presentar una evaluación, desde una perspectiva ambiental, de distintos tipos de sistemas de almacenamiento de energía como, por ejemplo: aire comprimido, celdas de hidrógeno, bombeo hídrico, baterías, volantes de inercia, sales fundidas, baterías de flujo. Para ello, se realizó una revisión de la literatura de los principales impactos ambientales asociados con la fabricación, el uso y la disposición final de los equipos que constituyen dichas tecnologías de almacenamiento. Se cubren las categorías de impacto ambiental más estudiadas dentro de la literatura existente: calentamiento global, agotamiento abiótico, toxicidad humana y ecotoxicidad. Debido a la importancia de la estimación del potencial de mitigación de gases de efecto invernadero de las tecnologías de almacenamiento durante su fase de uso, se realizó un análisis de la utilización de las tecnologías de almacenamiento con base en la información pública disponible, identificando los posibles impactos climáticos o ambientales inducidos en el sistema eléctrico al implementar sistemas de almacenamiento de electricidad.



2. Impactos ambientales de los sistemas de almacenamiento de energía

2.1 Enfoque metodológico y limitaciones

Los impactos ambientales producidos por el desarrollo de un proyecto, servicio o la elaboración de un producto son numerosos; se tienen impactos en: suelo, aire, agua y, salud humana, por mencionar algunos. El análisis de ciclo de vida (LCA), es un marco metodológico para estimar y analizar estos impactos ambientales (cambio climático, destrucción de la capa de ozono estratosférico, generación del ozono troposférico (smog), eutrofización, acidificación, daño en la salud humana y los ecosistemas, destrucción de recursos, uso del agua, uso de suelo, el ruido, entre otros), (Rebitzer et al., 2004). De acuerdo con la metodología del análisis de ciclo de vida, tales impactos se agrupan para su estudio en las llamadas categorías de impacto; la selección de éstas debe reflejar un conjunto exhaustivo de aspectos ambientales atribuibles al ciclo de vida de los sistemas de almacenamiento de energía (Guinée et al., 2002; M. Hauschild, Rosenbaum, & Olsen, 2018; Pennington et al., 2004; Rebitzer et al., 2004)

Se revisarán únicamente las categorías de impacto ambiental más estudiadas dentro de la literatura existente: calentamiento global, agotamiento biótico de recursos, agotamiento abiótico, toxicidad humana y ecotoxicidad. Para ello se ha realizado la búsqueda bibliográfica de los trabajos desarrollados en tecnologías de almacenamiento de energía a nivel mundial, en los últimos 10 años; la descripción y comparación bibliográfica de los impactos ambientales asociados a las tecnologías de almacenamiento en su fase de construcción, operación y final de la vida útil, pero sin analizar el efecto de la tecnología en el sistema en el que se localiza. Otros aspectos, como transporte de la unidad de almacenamiento del lugar de fabricación a México, no se cubrirían en este análisis.

Calentamiento global. La categoría de impacto Calentamiento Global (GW, por sus siglas en inglés) mide el impacto de las emisiones antropogénicas en el forzamiento radiativo; es decir, la absorción de radiación térmica, de la atmósfera. A su vez, éste puede tener impactos negativos en la salud del ecosistema, la salud humana y en el desempeño de los materiales. Muchas de estas emisiones mejoran el forzamiento radiativo, lo que hace que la temperatura en la superficie de la tierra aumente. Esto se conoce popularmente como "efecto invernadero". Las áreas de protección son la salud humana, el entorno natural y el entorno artificial.

El cambio en el calentamiento global se expresa como el potencial de calentamiento global en un horizonte de 100 años (generalmente) y está dado en kilogramos de bióxido



de carbono equivalente ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}$)/kg de emisiones (Guinée et al., 2002; M. Hauschild et al., 2018; Pennington et al., 2004).

Agotamiento abiótico. Los recursos abióticos son recursos naturales (incluidos los recursos energéticos) como el mineral de hierro, el petróleo y energía eólica, carentes de vida. Se expresa en kg antimonio equivalente (kgSb_{eq})/kg de extracción (basado en la concentración de las reservas), (Guinée et al., 2002; M. Hauschild et al., 2018; Pennington et al., 2004).

Ecotoxicidad. En esta categoría se cubren los impactos que tienen las sustancias tóxicas en los ecosistemas acuáticos, terrestres. Los efectos que mide la ecotoxicidad están presentes en el entorno natural (y los recursos naturales). Se expresa en $\text{kg1, 4-DCB}_{\text{eq}}$ /kg de emisiones, (Guinée et al., 2002; M. Hauschild et al., 2018; Pennington et al., 2004).

La determinación de los impactos ambientales que tiene una tecnología es de suma importancia para apoyar la selección de una opción dada. En este sentido, el análisis de ciclo de vida permite cuantificar los impactos ambientales de toda la cadena de suministro de la tecnología, desde la fase de fabricación (incluyendo la necesidad de materias primas), la operación y hasta el fin de su vida útil. Los sistemas de almacenamiento de energía pueden causar efectos negativos en el ambiente en las distintas etapas de su ciclo de vida, como en la producción, el uso y la disposición final. Cada tecnología representa diferentes impactos ambientales (uso de suelo, el potencial de calentamiento global y eutrofización).

La mayoría de los sistemas de almacenamiento de energía parecen ambientalmente inocuos, siendo los principales impactos las emisiones que se presentan, por ejemplo, en la fabricación de baterías. En general, los aspectos negativos de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica pueden ser por ejemplo: pérdida de energía en los procesos de conversión y reconversión, incremento de costos y complejidad de operación, determinados retos en la creación de infraestructura (que se expresan en mayores costos) y requisitos de espacio (Guney & Tepe, 2017).

Otros aspectos negativos pueden ser, por ejemplo, los embalses para los sistemas de almacenamiento con bombeo hidráulico la ocupación de grandes extensiones y el impacto ambiental debido a ello. Otro ejemplo, , , es la contaminación química, que puede ocurrir en el suelo o cuerpos de agua que puede ocurrir por el uso de baterías o a por la creación de subproductos ambientalmente dañinos para el ambiente por transformaciones químicas, etc. (Guney & Tepe, 2017).

Los criterios ambientales que se usan con mayor frecuencia en el contexto del almacenamiento de energía son diferentes indicadores de emisiones relacionados con los gases de efecto invernadero (GEI), ya sea como CO_2 equivalente ($\text{CO}_{2\text{eq}}$) o sólo relacionados con el CO_2 (intensidad de CO_2). También suelen encontrarse aspectos como la contaminación del agua y el aire, o el impacto de la vida silvestre. No obstante, hay estudios que determinan criterios muy generales como el impacto ambiental sin especificarlos más (se califican de manera cualitativa); cabe destacar que en éstos no se considera el reciclaje como un criterio de impacto ambiental a pesar de que se ha demostrado que el reciclaje contribuye de manera importante en el desempeño ambiental del sistema analizado (Baumann, Weil, Peters, Chibeles-Martins, & Moniz, 2019).



2.2 Principales impactos ambientales de las tecnologías de almacenamiento

Baumman y otros, estimaron que la demanda global de sistemas de almacenamiento de energía podría crecer de 33 TWh que se tuvo en 2015 a más de 15,128 TWh al 2050; a su vez, vieron que para la selección de una tecnología de almacenamiento sobre otra era necesario considerar las posibles compensaciones entre las ventajas y desventajas de cada uno de los sistemas de almacenamiento. A su vez, la decisión de instalar una unidad de almacenamiento suele implicar múltiples partes interesadas que también podrían tener diferentes puntos de vista; por este motivo determinaron los factores ambientales que se deben considerar para seleccionar una tecnología de almacenamiento de energía eléctrica en particular. Los principales impactos ambientales que encontraron se resumen en la **Tabla 2.8**, (Baumann et al., 2019).

De acuerdo con la literatura, los sistemas de almacenamiento se pueden implementar en cinco etapas de la producción de energía eléctrica: en la generación, en la transmisión, en subestaciones, durante la distribución y con los consumidores finales. La electricidad es transformada en otra forma de energía durante el proceso de almacenamiento y posteriormente se reconvierte en electricidad en muchos dispositivos de almacenamiento; aunque cabe señalar que los capacitores almacenan la electricidad como un campo eléctrico. Se encontró también que a medida que aumenta la capacidad de almacenamiento de energía, también parecen aumentar los efectos ambientales positivos de los sistemas (Guney & Tepe, 2017).

Tabla 2.8. Principales aspectos ambientales considerados para la evaluación de sistemas de almacenamiento de energía, desarrollados por (Baumann et al., 2019).

Source	Select	Considered technologies	Environmental criteria
Oberschmidt 2010	Exp., Lit	Vanadium - Redox Flow Battery Fuel Cell (PEM) TACAS -Thermal and compressed air storage	- GHG - Noise - CED - Land use
Cowan et al. 2010	DM	PHS - Pumped Hydro Storage Incremental, small & micro hydro power Liquid batteries NaS Flow cells	- Ecological impact - Emissions & pollutants
Barin et al. 2011	AS, Lit	Batteries added Li-Ion Vanadium - Redox Flow Battery NaS,	- Environmental Impacts (visual, biological, and GHG)
Daim et al. 2012	Lit, Fuzzy DM	PHS CAES – Compressed Air Energy Storage NaS	- Air pollution - Water pollution - Wildlife impacts
Krüger et al. 2012	AS, Lit	PHS (2 Variations) H ₂ (2 Variations) V - Redox Flow Battery NaS, CAES	- Resources, - GHG-emissions - Other emissions - Imp. on sens. ecosystems,



Source	Select	Considered technologies	Environmental criteria
		ACAES - adiabatic CAES Grid reinforcement (DC underground cables & overhead lines, High temp. Transmission lines) Down regulation	- Risks in case of malfunction
Raza et al. 2014	AS, Lit	Lead Acid, Li-Polymer Fuel Cell (PEM) - H ₂	- Environmental impacts
Vo et al. 2016	AS, Lit	P2G (methane), Pumped hydro storage CAES	- CO _{2eq} emission form constr. and prod. period - General environment impacts
Wei et al. 2016	N/A	Battery storage Flywheels CAES Supercapacitors SMES - Super conducting magnetic energy storage PHES - Pumped hydroelectric energy storage	- Environment
Baumann et al. 2017	MD, Lit	Five lithium ion batteries (LFP - Li- iron-phosphate-, LTO - Li- titanate -, LMO - Li-manganese oxide-, NCA - Nickel-cobalt-aluminium oxide -, NMC - Nickel-cobalt-manganese-oxide -) NaNiCl VRLA - Vanadium redox lead acid - VRFB - Vanadium redox flow batteries-	- Carbon Footprint
Ren et al. 2018	Lit+FG	PHS CAES Lead Acid Li-Ion Flywheel	- CO ₂ intensity, - Environmental impact
Ren 2018	Lit FG	PHS CAES Lithium Ion Flywheel	- CO ₂ intensity, - Environmental impact
Murrant et al. 2018	Lit. Exp.	Liquid air energy storage Battery storage + PV Thermal energy storage Battery storage with wave energy (wave hub) Power to gas Virtual battery system	- Environmental co-benefits
Van de Kaa et al. 2018	Lit., Exp	Lithium Ion batteries Flow batteries Nickel-based batteries Sodium based batteries Lead-based batteries	- Other stakeholders: current installed base, big fish,



Source	Select	Considered technologies	Environmental criteria
			suppliers, network of stakeholders

AS=Authors selected criteria, Lit=Literature, DM=Delphi method Exp=Expert interviews/survey, FG=Focus Groups, MD=Model driven, N/A=No information given/available. **Fuente:** Adaptada de (Baumann et al., 2019).

Actualmente existen trabajos científicos que han evaluado los impactos ambientales potenciales de algunas tecnologías de almacenamiento, en los que se encontró que la gran mayoría de sistemas de almacenamiento son ambientalmente beneficiosos, siendo las baterías las que presentan impactos ambientales durante la fase de fabricación (Guney & Tepe, 2017). En la siguiente tabla, se muestran tales impactos.

Tabla 2.9. Impactos ambientales cualitativos de los sistemas de almacenamiento de energía.
Fuente: (Guney & Tepe, 2017).

Storage technology	Manufacturing impacts	Impacts on operation			Disposal impact
		Air	Water	Soil	
Compressed Air	Relatively low	Not significant, except from associated combustion turbine	Not significant	Not significant	Relatively low
Flywheels	Relatively low	Not significant	Not significant	Not significant	Not significant
Hydrogen Electrolyzer / Fuel Cell	Relatively low depending on technology and materials used	Not significant	Likely not significant — discharge water can have low pH	Not significant	Relatively low, depending on technology and materials
Lead Acid Battery	Lead and SO ₂ emissions can be significant but are tightly controlled in U. S.	Not significant	Not significant	Not significant	Lead contamination and sulfuric acid electrolyte are of significant concern, but disposal relatively well regulated in the USA
Nickel Metal Hydride Battery	Relatively high air emissions from electricity needed for nickel	Not significant	Not significant	Not significant	Relatively low compared to other battery technologies



Storage technology	Manufacturing impacts	Impacts on operation			Disposal impact
		Air	Water	Soil	
	smelting (can be reduced by battery recycling) as well as p				
Pumped Hydro	Relatively low	Not significant if pumping energy comes from clean renewable source	Not significant	Not significant	Relatively low
Zinc Bromine Flow Battery	Relatively low compared with other battery types	Bromine leak locally toxic	Bromine leak locally toxic	Likely not significant	Relatively low with electrolyte less toxic than most other batteries and recyclable plastic components

Los criterios para seleccionar un sistema de almacenamiento óptimo para cada red de distribución se basan principalmente en requerimientos técnicos tales como la capacidad de almacenamiento requerida, la capacidad de producción de energía disponible, el tipo de descarga o la velocidad de transmisión de energía requeridas, el tiempo de descarga, la eficiencia, la durabilidad (capacidad de ciclos), y el nivel de autonomía, pero no son los únicos. Además de los anteriores, también se deben considerar los costos de inversión y operación, la factibilidad y adaptación a la fuente generadora, así como los impactos ambientales. Cabe destacar que el impacto ambiental de la tecnología durante todo su ciclo de vida es un factor de creciente interés pues suele conllevar costos económicos y sociales (Kourkoumpas et al., 2018).

Se prefiere el uso de los volantes de inercia en actividades de arranque y frenado debido a su peso ligero y su alta capacidad de energía. Sin embargo, no es económico debido a su limitado ciclo de carga/descarga, una densidad de energía de 0.05 MJ/kg y una eficiencia de 80% (Guney & Tepe, 2017). En términos de costo de operación y funcionamiento, son una tecnología de almacenamiento de energía casi perfecta debido a su bajo costo de mantenimiento, larga vida útil, alta eficiencia, no presentan efectos por descarga total, son respetuosos con el ambiente, tienen un amplio rango de temperatura de operación y soportan condiciones extremas. Sin embargo, como resultado de las pérdidas por fricción, no son buenos para el almacenamiento de energía a largo plazo. Puede alcanzar una eficiencia instantánea del 85% después de la carga. Esto puede caer a aproximadamente al 78% después de 5 h y 45% después de un día (Aneke & Wang, 2016; Kousksou, Bruel, Jamil, El Rhafiki, & Zeraouli, 2014).

Los sistemas de almacenamiento de aire comprimido tienen un inicio rápido y poca dependencia a la estructura geológica, tienen una mayor densidad de energía de 0.2 a 2 MJ/kg, pero una menor eficiencia ($\eta=50\%$) en comparación con los volantes de inercia. Por



otra parte, los sistemas de almacenamiento de energía por bombeo hidráulico son los más eficientes, pues cuentan con la mayor capacidad eléctrica superior a los 2,000 MW, una densidad energética de 0.001MJ/kg, y una eficiencia del 80%; algunas de sus desventajas son la dependencia geográfica, costo de inversión alto, erosión del suelo, inundación de terrenos, sedimentación de presas. Los superconductores, por su parte, son ambientalmente amigables, trabajan a bajas temperaturas y tienen alta eficiencia debido a su escasa resistencia al paso de la corriente eléctrica; pueden reducir el efecto de las fluctuaciones, tienen un tiempo de vida largo, una potencia media de 200 kW y una potencia máxima de 800 kW. En lo que respecta al almacenamiento electroquímico, éste puede ser a pequeña y gran escala. Las baterías de plomo-ácido son las más ampliamente utilizadas, tienen una densidad de energía de 0.6 MJ/kg y una eficiencia de celda del 15%, en la **Tabla 2.10** (Guney & Tepe, 2017; Luo et al., 2015).

Las baterías de níquel metal híbrido (NiMH) son una alternativa viable a las baterías de níquel-cadmio porque su funcionamiento es mejor y son ambientalmente inocuas. En comparación con las baterías de plomo-ácido y de níquel-cadmio, la batería de NiMH es ecológica debido a la falta de sustancias tóxicas como el cadmio, el plomo o el mercurio (Kousksou et al., 2014; Luo et al., 2015).

Tabla 2.10. Comparación entre los diferentes tipos de baterías. Fuente: (Guney & Tepe, 2017).

Parameters	Lead acid	Nickel cadmium	Sodium sulphur	Lithium ion	Sodium nickel chloride
Achieved upper limit power	Multiple tens of MW	Tens of MW	MW scale	Tens of kW	Tens/low hundreds of kW
Specific energy (Wh/kg)	35-50	75	150-240	150-200	125
Specific power (W/kg)	75-300	150-300	90-230	200-315	130-160
Cycle life	500-1,500	2,500	2,500	1,000-10,000	2,500+
Charge/discharge energy efficiency	-80	-70	up to 90	-95	-90
Self-discharge	2-5% per month	5-20% per month		-1% per month	

Cabe destacar que se prefieren los sistemas de almacenamiento térmico de energía para el almacenamiento a pequeña y mediana escala con una densidad de energía de 0.25 MJ/kg y una eficiencia promedio del 80%; cuando se diseñan sitios de almacenamiento bajo las carreteras, el deshielo de éstas puede ser un ejemplo de su impacto ambiental. En el caso de las celdas de combustible, que transforman el combustible en electricidad directamente, la densidad energética de los sistemas de hidrógeno es cercana a los 38 kWh/kg; dentro de sus ventajas se encuentra que tienen un mayor tiempo de operación, no emiten gases de efecto invernadero ni dependen de factores políticos, no obstante, el almacenamiento del hidrógeno es riesgoso debido a su naturaleza inflamable y tiene



altos costos de inversión (Guney & Tepe, 2017). Los impactos ambientales del hidrógeno como medio para almacenar energía dependen enormemente de su proceso de producción; cuando se usa junto con la energía eólica, la producción y reutilización de hidrógeno tienen bajo impacto ambiental. Sin embargo, el hidrógeno producido a través de la electrólisis de otras fuentes de electricidad, como las centrales eléctricas de carbón o de gas natural, puede tener impactos ambientales considerables (Kousksou et al., 2014).

2.2.1 Bombeo hidráulico

Los principales impactos de esta tecnología se relacionan con el embalse que se crea, la pérdida de suelo por la inundación, cambios en los flujos de los ríos y emisiones de GHG asociadas al embalse; desde una perspectiva de ciclo de vida, se han identificado los siguientes indicadores (Prasad, Jain, & Gairola, 2013):

- Energy payback ratio¹: 48-260
- Greenhouse gas Emission (kgCO_{2eq}/TWh): 2-48
- Mercury emissions (kg Hg/TWh): 0.07 metilmercurio en el embalse

2.2.2 Baterías

Las baterías pueden afectar el ambiente durante su fabricación, uso, almacenamiento, tratamiento, disposición final, confinamiento y reciclaje. Su producción requiere una gran cantidad de metales y no metales, lo que conlleva distintos impactos ambientales y de salud pública. Algunos metales y no metales con los que se fabrican las baterías pueden tener efectos adversos en la salud humana mediante distintas formas de exposición (inhalación, contacto con la piel o los ojos, ingestión e inyección). Por ejemplo, generalmente el plomo entra en contacto con el humano a través de la ingestión, inhalación y absorción dérmica; el cadmio por ingestión e inhalación, y el mercurio por inhalación, ingestión y contacto con la piel. En 2013 algunos autores informaron que el plomo, el cadmio, el mercurio, el arsénico y el cromo tienen efectos nocivos para la salud humana, y que los metales pesados en general presentan riesgos para la salud pública y el ambiente. Los residuos de la fabricación y reciclaje de baterías son un tema de creciente interés y representan un serio problema para la salud pública debido a su toxicidad, abundancia y persistencia en el ambiente, a esto debe agregarse el rápido crecimiento de su demanda en los últimos años. En la **Tabla 2.11** se detallan los principales impactos ambientales de los distintos tipos de baterías, estudiados por (Dehghani-Sanij, Tharumalingam, Dusseault, & Fraser, 2019).

¹ Energy payback is the ratio of total energy produced during a system's normal lifespan, divided by the energy required to build, maintain and fuel it. A high ratio indicates good environmental performance. Fuente: <http://tc4.iec.ch/FactSheetPayback.pdf>



Tabla 2.11. Environmental impacts of different types of batteries. Fuente: (Dehghani-Sanij et al., 2019).

Battery type	Environmental impact
Ni-MH (established)	Nickel not green (difficult extraction/ unsustainable). Toxic. Not rare but limited Recyclable
Pb-A (established)	High-temperature cyclability limited. Lead is toxic, but recycling is efficient to 95%
Li-ion (established)	Depletable elements (cobalt) in most applications; replacements manganese and iron are green (abundant and sustainable). Lithium chemistry relatively green (abundant but the chemistry needs to be improved) Recycling feasible but at an extra energy cost
Zn-air (established)	Mostly primary or mechanically rechargeable. Zinc smelting not green, especially if primary. Easily recyclable
Li-organic (future)	Rechargeable Excellent carbon footprint Renewable electrodes Easy
Li-air (future)	Rechargeability to be proven Excellent carbon footprint Renewable electrodes Easy recycling
Magnesium-sulphur (future)	Magnesium and sulphur are green. Recyclable Small carbon footprint
Al-CFx (future)	Aluminium and fluorine are "green" but their industries are not Recyclable
Proton battery (future)	Green, biodegradable

Dentro de las distintas etapas del reciclaje de las baterías suelen encontrarse metales, no metales, electrolitos, polímeros duros (o ebonita) y plásticos, que llegan a integrarse a los residuos sólidos, las aguas residuales, a las emisiones de GEI, emisiones de partículas y gases tóxicos. Por ejemplo, en el caso del plomo, sus vapores y partículas pueden liberarse al aire durante los procesos de reciclaje utilizados para las baterías Pb-A; las baterías de ión de litio producen alrededor de 70 kg de CO₂ por kW h (Dehghani-Sanij et al., 2019).

En 2010 se llevó a cabo un estudio exhaustivo de la cuna a la puerta (GTG, por sus siglas en inglés) de los inventarios del ciclo de vida de diversas baterías, dentro de las que se incluyeron las de Pb-A, Ni-Cd, Ni-MH, Na-S y Li-ion. En este trabajo, se analizaron las emisiones de la fase de producción de los materiales, la fabricación y el ensamblaje (Tabla 2.12), así como las asociadas con el reciclaje tanto de las baterías como de sus materiales (Tabla 2.13). Las emisiones determinadas incluyeron el CO₂, contaminantes de criterio (producto de la combustión) y emisiones específicas del proceso (por ejemplo, metales pesados), tanto al aire y al agua como a los residentes en los residuos sólidos. En la Tabla 2.12 se muestran las emisiones de CO₂ durante la manufactura y el reciclaje encontradas por Dehghani-Sanij et al., 2019, para los diferentes tipos de baterías.



Tabla 2.12. Air, water and solid wastes for CTG battery manufacture (g/kg of battery, unless differently stated), Fuente: (Dehghani-Sanij et al., 2019).

Battery type	VOC	CO	NO _x	PM	SO _x	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ kg/kg	Water (mg/kg)	Air
Ni-MH	0.11	0.34	1.31	0.79	1.06	1.33	0.04	1.02	60 g Al, Ni, Co, etc., to air/water/solid ^a	
	1.3	4.5	27 19	2.8	263 14	22.7	0.19	14.8 15	18 ^b – heavy metals	100 ^b – heavy metals
	0.7	2.1	8.7	14.0	19.2	11.0	0.11	8.3		
	0.9	3.9	11.4	18.9	20.5	15.3	0.1	10.3		c
	1.8	7.5	21.8	36.1	38.9	29.3	.03	19.5		c
Average	1.2	4.5	17.6	18.0	71.1	19.6	0.2	13.6		
Pb-A	0.11	0.31	1.13	1.67	2.29	1.64	0.02	1.1	4.8 - Pb	1.2 – Pb ^a
	2.2	1.3	7.9 5.8	0.8	10.3 5.3	0.002	0.006	1.1 5.1	97 – heavy metals	118 – heavy metals
	0.57	1.65	6.8	11.0	14.9	8.7	0.09	6.4		
	0.2	0.6	1.5	1.3	2.0	3.0	0.02	1.4		
	0.2	0.7	2.1	3.5	3.7	2.9	0.0	1.9		c
	0.3	1.2	3.5	5.7	0.6	4.6	0.0	3.1		c
Average	0.7	1.1	4.6	4.5	7.0	3.8	0.0	3.2		
Ni-Cd									60 – Cd, Co, Ni	40 – Cd, Co, Ni ^a
	5.9	5.4	40	5.2	265	0.001	0.015	6.2	30 – heavy metals	740 – heavy metals
	0.6	1.9	8.6	11.3	16.9	9.5	0.1	7.3		
	0.7	2.8	8.1	13.4	14.5	10.9	0.1	7.3		c
	0.9	3.8	11.1	18.3	19.8	14.9	0.1	9.9		c
Average	2.0	3.5	17.0	12.1	79.0	8.8	0.1	7.7		
Na-S	1.67	5.4	20.5	25.6	38.0	27.3	0.2	18.2		
	1.1	4.4	13.0	21.4	23.4	17.3	0.2	11.6		c
	1.2	4.9	14.6	24.2	26.5	19.6	0.2	13.2		c
Average	1.3	4.9	16.0	23.7	29.3	21.4	0.2	14.3		c
Li-ion			22.5		17.5			18.2		
	0.6	1.8	7.6	17.3	16.7	9.7	0.1	7.2		
	1.1	4.3	13.3	21.9	24.9	17.6	0.2	12.1		c
	1.7	6.4	20.0	32.9	37.4	26.5	0.2	18.1		c
Average	0.9	3.0	14.5	19.6	19.7	13.7	0.1	12.5		c



^aDoes not contain battery production.

^bSolely from Ni production, assumed battery is 25% Ni.

^cUsed the average of their total energy amounts.

Tabla 2.13. Emissions to air, water and solids caused by battery recycling (g/kg of battery, unless differently stated). Fuente: (Dehghani-Sanij et al., 2019)

Battery type	VOC	CO	NO _x	PM	SO _x	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ (kg/kg)	Water (mg/kg)	Air
Ni-MH	0.107	0.386	1.390	2.047	2.786	1.619	0.016	1.234	0.24 kg slag and 30 g toxics – solid	
Pb-A	0.425	1.762	1.966	0.520	0.522	0.768	0.025	0.604	< 0.1 Sb, Hg, Ni, Pb, etc.	5.0 – Pb, Cd, Cu, Zn, As
Ni-Cd	0.111	0.429	3.1	0.386	2.71	0.492	0.014	0.378	< 0.1– Cd, Ni	1.0 – Cd, Ni



Es necesario destacar que, para la etapa de reciclaje, los datos de las emisiones generadas estaban restringidos (Tabla 2.13).

De acuerdo con el estudio realizado por Dehghani-Sanij et al., 2019:

- La batería Pb-A tiene menor cantidad de emisiones de CO₂ (Figura 3).
- El promedio de emisiones para cada batería es menor a 30 g/kg de batería para cualquier emisión, excepto para las baterías Ni-MH y Ni-Cd en el caso de las emisiones de SO_x (Figura 4). Además, el cambio relativo en los promedios entre las baterías para cada emisión es aproximadamente el mismo; y,
- Las baterías Pb-A, en general, presentan los valores más bajos para las emisiones de contaminantes criterio de todas las baterías.

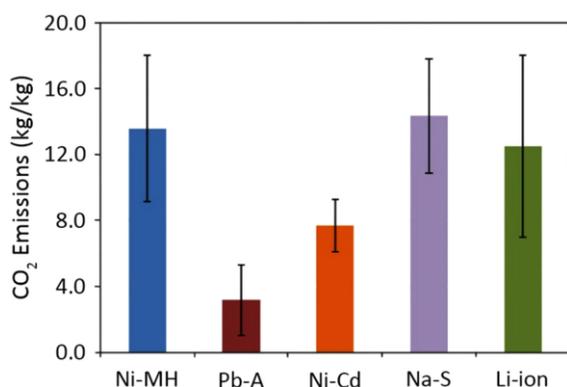


Figura 3. Mean CTG CO₂ emissions with ± one standard deviation to produce a kg of different battery. Fuente: (Dehghani-Sanij et al., 2019)

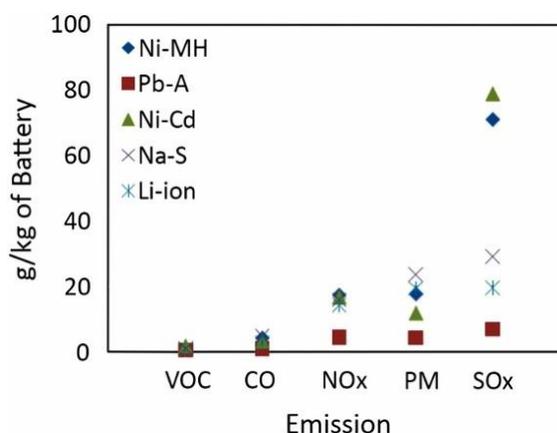


Figura 4. Mean criteria contaminant emissions (g) per kg of battery for different batteries. Fuente: (Dehghani-Sanij et al., 2019).

Además, en caso de que ocurra una ruptura de la celda, se pueden derramar los electrolitos (corrosivos) de la batería durante el almacenamiento, el uso o el transporte. También resulta peligrosa la presencia de varios metales (especialmente metales pesados) y electrolitos (por ejemplo, el LiPF₆ de las baterías de ion-litio, el ácido sulfúrico en las baterías de Pb-A), en las aguas residuales de los distintos procesos (por ejemplo, fabricación, tratamiento, reciclaje). Si éstas se infiltran al subsuelo y llegan a las aguas superficiales, pueden generar problemas en la salud humana (Dehghani-Sanij et al., 2019).

2.2.2.1 Lithium based

Según Dehghani-Sanij et al., 2019, las emisiones de GEI se producen durante el reciclaje de las baterías de ión de litio, aunque actualmente su tasa de reciclaje es muy baja (Dehghani-Sanij et al., 2019).

- El consumo de energía para su producción actual es de 350 a 650 MJ/kW h.
- La producción de celdas requiere mucha energía (principalmente electricidad en esta etapa) y se generan importantes emisiones de GEI.
- Se llegaron a determinar emisiones de GEI entre 120 y 250 kg CO_{2eq}/kW h.



Las baterías Li-ion y Ni-MH son las que presentan mayores emisiones de CO_{2eq} (Tabla 2.14). Cabe señalar que las baterías de litio pueden provocar un incendio si se exponen a humedad durante un tiempo suficiente para provocar la corrosión de las celdas (Dehghani-Sanij et al., 2019).

Tabla 2.14. Specific effect per kg of battery production. Fuente: (Dehghani-Sanij et al., 2019)

Battery type	Climate impact (CO ₂ kg/kg)
Pb-A	0.9
Li-ion (NMP solvent)	12.5
Li-ion (water solvent)	4.4
Ni-Cd	2.1
Ni-MH	5.3
Na-S	1.2

En este sentido, se encontró que es difícil comparar las baterías primarias de litio con las baterías alcalinas que existen en el mercado, puesto que, (1) los costos de producción son muy altos debido a los procesos, los materiales consumidos durante la fabricación y los sistemas auxiliares necesarios para su funcionamiento, y (2) hay costo por razones de seguridad, aunque ambas baterías tienen una vida útil similar (Dehghani-Sanij et al., 2019).

3. Potencial de mitigación de las tecnologías de almacenamiento de electricidad

Las tecnologías estudiadas, entonces, permiten almacenar durante los momentos en que la producción, especialmente de las plantas de energía renovable supera el consumo y regresarla a la red cuando la producción cae por debajo del consumo. Además, debido a la función de distribución y transmisión que pueden tener las empresas eléctricas, su interés en los productos/tecnologías de almacenamiento también es importante (Guney & Tepe, 2017).



La generación de electricidad a partir de fuentes renovables de energía es altamente dependiente de la disponibilidad del recurso, por lo que el generador estará obligado a producir ciertas cantidades en determinados momentos del día. Con el fin de conocer el desempeño de un sistema que proporcione electricidad, se han desarrollado indicadores de desempeño ambiental y energético (Guney & Tepe, 2017).

Una empresa de electricidad se ocupa principalmente de la generación, distribución y transmisión de electricidad para la venta, en un mercado regulado. En este sentido, los generadores se pueden encender o apagar según las necesidades de la demanda. Los generadores a partir de energías renovables (variables), dependen de factores como el viento o el sol y, por lo tanto, sólo pueden generar determinadas cantidades de energía en determinados momentos. Debido a las múltiples funciones que desempeña una empresa eléctrica, como la CFE, se han encontrado indicadores de rendimiento energético y ambiental que dan un indicio de su eficiencia de operación y emisiones generadas (Guney & Tepe, 2017).

A partir de una serie de estudios de análisis de ciclo de vida hechos a sistemas de generación de energía con fuentes renovables, se encontró una serie de indicadores clave en el análisis de los impactos ambientales; estos fueron (Kourkoumpas et al., 2018):

- Tiempo de retorno energético, indica el tiempo en el que el sistema de almacenamiento de energía renovable entregará la energía que fue empleada para su construcción y debe ser menor al de su vida útil.
- Demanda de energía acumulada, se refiere a la cantidad de energía invertida (en la infraestructura, la extracción, el transporte además de la energía primaria relacionada con el sistema de almacenamiento en sí) en relación con la cantidad de energía suministrada (durante su vida útil).
- Requerimiento de energía bruta, indica los insumos de energía requeridos (durante un período del ciclo de vida) por la tecnología, incluidos su fabricación y desmantelamiento.
- Energía incorporada de los materiales, que es útil para la comparación de las tecnologías al estimar la energía consumida durante todos los procesos asociados con la producción de la tecnología.
- Potencial de calentamiento global, mide las emisiones totales de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso) de la producción y el uso de energía, que tienen un impacto directo en el cambio climático. Cabe destacar que aún se encuentra bajo estudio el beneficio ambiental debido a la sustitución de una central eléctrica a carbón tradicional por una central eléctrica basada en energía renovable.

3.1 Indicadores para evaluar el rendimiento energético y ambiental de los sistemas de almacenamiento de energía

Los indicadores de rendimiento energético que se consideran clave para conocer el rendimiento energético son: "Energía suministrada (DE)", "Demanda energética acumulada (CED)", "Proporción de fuentes renovables de energía (SR)", "Tasa neta de



energía (NER)", "Requerimiento bruto de energía primaria (GPER)", "Electricidad generada utilizada *in-situ* (EOSG)", así como "Energía incorporada para la Infraestructura de los Materiales (EEIM)". Los indicadores de rendimiento ambiental clave son encontrados son: "Emisiones de CO₂ del ciclo de vida (LCCE)", "Potencial de calentamiento global (GWP)", "Reducción de las emisiones directas de CO₂ (RDE)" y "Emisiones Evitadas de CO₂ (AVE)" (Guney & Tepe, 2017).

Debido a que con los sistemas de almacenamiento es posible almacenar la electricidad generada en períodos de baja demanda, los indicadores de rendimiento energético que toman importancia son: "Degradación total de la batería (BTD)", "Potencial de almacenamiento de energía (ESP)", "Battery Calendar Life" (BCL) y "Battery Cylindrical Life" (BCYL)" Electricidad neta entregada (NDE)", "Densidad específica de energía (SED)", "State of Health (SOH)", "Energía almacenable (SE)" y "Energía almacenada en energía invertida (ESOI)". En el caso de un sistema de energías renovables, se pueden aplicar los siguientes indicadores "Tiempo de recuperación de energía (EPBT)", "Retorno energético de la inversión (energía) (EROI)", así como el indicador ambiental: "Tiempo de retorno de la inversión de CO₂ equivalente (CO₂PBT)" (Guney & Tepe, 2017).

Si bien es posible inferir que la implementación de sistemas de almacenamiento con el fin de promover la adición de las fuentes renovables a los sistemas eléctricos mundiales conlleva impactos ambientales positivos, aún no se han realizado las correspondientes cuantificaciones puesto que, por lo novedoso de esta necesidad, no se han llevado a cabo estudios de análisis de ciclo de vida que permitan identificar los indicadores de desempeño ambiental que faciliten la medición de los efectos en el ambiente de estos sistemas en conjunto. De esta manera se hace preciso construir indicadores que vinculen el desempeño ambiental y el energético en términos de sustentabilidad; pero se tienen dos retos. Primero, se carece de indicadores ambientales enfocados a la cuantificación de su impacto en el ambiente de forma recíproca y replicable cuando una tecnología renovable se integra con una tecnología de almacenamiento; Kourkoumpas y otros, elaboraron una guía para cuantificar el desempeño ambiental que integra la generación con fuentes renovables con las tecnologías de almacenamiento de energía, basada tanto en indicadores energéticos existentes así como en nuevos en nuevos indicadores ambientales que se desarrollen. Segundo, faltan en la literatura muchos de los principales indicadores que son importantes para las partes interesadas, tales como operadores del sistema de distribución, los operadores del sistema de transmisión y los consumidores (Kourkoumpas et al., 2018).

Kourkoumpas y otros también vieron que la evaluación ambiental está fuertemente vinculada con la correspondiente evaluación energética de las tecnologías y que es necesario contar con un inventario de indicadores que sea lo más selecto posible y que sea útil para calcular el impacto ambiental total. Los indicadores clave de desempeño (KPI, por sus siglas en inglés) ambiental y energético se obtendrán de la literatura, (e. g. "Global Warming Potential", "Energy Payback Time", "Energy Storage Potential", "Energy stored on Invested"), dicha lista se complementa con la introducción, definición y explicación de nuevas propuestas adicionales, escalables y adaptables, (e.g. "Life Cycle CO₂ emissions", "Reduction of the direct CO₂ emissions", "Avoided CO₂ emissions", "CO₂ equivalent Payback Time"), agrupando algunos de los ya existentes en menos indicadores (Kourkoumpas et al., 2018). Los indicadores que correlacionan a los parámetros ambientales y energéticos entre sí se muestran en la **Tabla 3**. (Kourkoumpas et al., 2018).



Tabla 3.1. Indicator's (environmental and energy) metric parameter correlation. Indicators. Fuente: (Kourkoumpas et al., 2018).

Stage	Indicators	Linked relation with other Indicators
Manufacturing phase	Embodied energy for infrastructure of materials	Life Cycle CO ₂ emissions, Energy payback time, Cumulative energy demand, Gross primary energy requirement, Global Warming Potential
	Gross Primary Energy Requirement	Cumulative energy demand, Embodied energy for infrastructure of materials and for the building system
	Net Energy Ratio Operational	Cumulative Energy Demand, Embodied Energy for infrastructure of materials, Gross Primary Energy Requirement, Delivered Energy
	Cumulative Energy Demand	Net Energy Ratio
Operational Phase	Life Cycle CO ₂ Emissions	Avoided CO ₂ emissions, CO ₂ equivalent Payback Time, Cumulative energy demand, Embodied energy for infrastructure of materials, Gross primary energy requirement, Global Warming Potential
	Global Warming Potential	Reduction of the direct CO ₂ emissions, Life Cycle CO ₂ emissions, Avoided CO ₂ emissions, CO _{2eq} Payback Time, Cumulative Energy Demand
	Avoided CO ₂ Emissions	Life Cycle CO ₂ emissions, CO _{2eq} Payback Time, Cumulative Energy Demand, Global Warming Potential
	Share of RES	Electricity used from on-site generation, Delivered Energy
	Delivered Energy	Net Energy Ratio, Electricity used from on-site generation
	Electricity used from On-Site Generation	Reduction of the direct CO ₂ emissions, Avoided CO ₂ emissions, Delivered Energy, Share of RES
	Reduction of the direct CO ₂ emissions	Life Cycle CO ₂ emissions, CO _{2eq} Payback Time
	Specific Energy Density	Energy Storage Potential, Battery cycle life, Battery calendar life
	Energy Storage Potential	Battery total degradation, Battery cycle life, Battery calendar life
	Net Delivered Electricity	Energy storage potential, Battery total degradation, Battery calendar life, Battery cycle life, Delivered Energy, Electricity used from on-site generation
	State of Health	Battery total degradation, Battery cycle life, Battery calendar life
	Storable Energy	Battery total degradation, Battery cycle life, Battery calendar life



Stage	Indicators	Linked relation with other Indicators
End-of-life Phase Global	Energy Returned on Energy Invested	CO _{2eq} Payback Time, Cumulative Energy Demand, Embodied Energy for infrastructure of materials
	CO _{2eq} Payback Time	Reduction of the direct CO ₂ emissions, Embodied energy for infrastructure of materials, Global Warming Potential
	Energy Stored on Energy Invested	Energy storage potential, Battery total degradation, Embodied energy for infrastructure of materials
	Battery Degradation	Cumulative Energy Demand, Electricity used from on-site generation
	Battery Calendar Life	Battery total degradation, Battery cycle life, Energy Storage Potential
	Battery Cycle Life	Battery total degradation, Energy Storage Potential, Battery calendar life
	Energy Payback Time	Embodied Energy for infrastructure of materials, Share of RES

Los indicadores se obtienen de las fases de fabricación, operación y final de vida de la tecnología. Los indicadores se seleccionaron para tecnologías de aprovechamiento de energías renovables y responden a las necesidades de evaluación ambiental y energética de las tecnologías durante

(a) la fase de fabricación (por ejemplo, “Embodied energy for infrastructure of materials and for the building system”, “Gross Primary Energy Requirement”, “Net Energy Ratio”, “Cumulative Energy Demand”),

(b) la fase operativa que incluye indicadores ambientales genéricos (por ejemplo, “Life Cycle CO₂ Emissions”, “Global Warming Potential”; así como indicadores de rendimiento energético (por ejemplo “Electricity used from On-Site Generation”, “Share of RES”, “Delivered Energy”), e indicadores ambientales (por ejemplo, “Reduction of the Direct CO₂ emissions”, “Avoided CO₂ Emissions”) con orientación para sistemas de energía renovable e indicadores de energía para aplicaciones de almacenamiento de baterías (“Specific Energy Density”, “Energy Storage Potential”, “Net Delivered Electricity”, “State of Health”, “Storable Energy”),

(c) la fase de fin de vida (e.g. “Energy Returned on Energy Invested”, “Battery Calendar Life”, “Battery Cycle Life”, “Battery Total Degradation”, “Energy Payback Time”, “CO₂ equivalent Payback Time”, “Energy Stored on Energy Invested”).

Estos indicadores se calculan con base en dos distintos datos de entrada, los llamados primarios, que representan los datos realmente medidos (e.g. “Net Energy Ratio”, “Delivered Energy”, “Electricity used from On-Site Generation”, “Gross Primary Energy Requirement”, “Cumulative Energy Demand”), y los secundarios o teóricos, principalmente recopilados y calculados usando datos bibliográficos y/o los resultados de herramientas de simulación (“Life Cycle CO₂ Emissions”, “Embodied Energy for Infrastructure of Materials and for the building system”, “Global Warming Potential”, “Avoided CO₂ Emissions”, “CO_{2eq} Payback Time”) (Kourkoumpas et al., 2018).



3.2 Indicadores de eficiencia energética que abordan la fase de fabricación

La fase de fabricación incluye la extracción de materias primas y el ensamble de los componentes para la obtención del producto final. Por lo tanto, se incluyen en esta fase indicadores como “Embodied energy for Infrastructure of materials and for the building of the system”, “Gross primary energy requirement”, “Net Energy Ratio” and “Cumulative Energy Demand”.

El indicador “Embodied Energy for infrastructure of materials and for the building system (EEIM)” representa la energía consumida por todos los procesos individuales asociados con la fabricación de un producto/tecnología o servicio, a partir de la extracción y el procesamiento de las materias primas hasta el ensamblaje, el transporte y la entrega del producto final (Kourkoumpas et al., 2018).

El objetivo principal de incorporar el análisis de energía es calcular la cantidad de energía inicial y/o agregada dentro de los materiales para comparar el contenido total de energía incorporada en los distintos materiales de construcción, componentes, elementos y diseños. La energía incorporada inicial y la que se va agregando son las dos componentes principales de la energía incorporada. La energía inicialmente incorporada representa la suma de la energía requerida para la extracción y fabricación de un material junto con la energía requerida para el transporte de un material utilizado para su construcción inicial (Kourkoumpas et al., 2018).

Durante esta fase es crucial medir la correlación entre la cantidad de energía suministrada que una tecnología es capaz de producir y la energía primaria que se consume para la instalación de esta tecnología específica; de esta manera se define la “Net Energy Ratio (NER)” y la “Cumulative Energy Demand (CED)”.

El NER es un indicador importante generalizado que muestra la cantidad de energía que una tecnología puede producir y la cantidad total de energía consumida para su instalación (incluida la fabricación) durante su tiempo de vida total previsto.

El Net Energy Ratio de una tecnología se utiliza para mostrar cuán "eficiente" es esa tecnología en términos de proporcionar energía a la sociedad.

Por su parte la CED se expresa como el inverso de NER. Expresa la cantidad de energía invertida requerida (en procesos de infraestructura y extracción/transporte, además de la energía primaria relacionada con el producto energético en sí) en relación con la cantidad de energía suministrada (durante la vida útil de la planta). La CED de tecnología de energía renovable cuantifica toda la energía consumida durante el ciclo de vida de un producto. Incluye consumos de energía operacionales, consumos de energía incorporados y consumos de energía para el ensamblaje de los componentes (Kourkoumpas et al., 2018).



3.3 Indicadores de desempeño ambiental y energético de la fase de operación

En esta fase, los indicadores se clasifican en tres categorías principales, donde se incluyen los indicadores de desempeño energético y ambiental. En la primera categoría se incluyen indicadores ambientales genéricos como “Life Cycle CO₂ emissions”, “Global Warming Potential” y tienen un valor tanto para los sistemas de energía basados en fuentes renovables como en los combustibles convencionales (por ejemplo, los basados en fósiles). La segunda categoría incluye indicadores de desempeño ambiental y energético que miden la disminución de los impactos ambientales de sistemas de energía basados en fuentes renovables en comparación con los sistemas convencionales (por ejemplo, “Reduction of direct CO₂ emissions”, “Avoided CO₂ emissions”, “Delivered Energy”, “Share of RES”, “Electricity used from on-site generation”). La tercera categoría incluye indicadores de rendimiento energético con un valor tanto para sistemas basados en energía renovable como para combustibles convencionales cuando se integra tecnologías de almacenamiento como (“Specific Energy Density”, “Energy Storage Potential”, “Net Delivered Electricity”, “State of Health”, “Storable Energy”) (Kourkoumpas et al., 2018).

3.4 Indicadores ambientales de uso genérico

Respecto a los indicadores de impacto ambiental con un uso genérico, el indicador “Life-cycle CO₂ emissions (LCCE)” representa una medida teórica que indica la cantidad de emisiones directas e indirectas (en kg CO₂ eq) para la producción de una cantidad de energía específica durante un tiempo determinado (t). Las emisiones calculadas para un sistema/componente/tecnología, pueden corresponder potencialmente a todas sus etapas (construcción, transporte y producción de energía), dependiendo de la forma en que se utilice. Este indicador calcula las emisiones operativas (directas) de CO_{2eq}, así como las emisiones (indirectas) de CO_{2eq} de transporte e infraestructura (indirectas) (Kourkoumpas et al., 2018).

Un indicador ambiental comúnmente utilizado en la literatura es el potencial de calentamiento global, incluido el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). Su unidad funcional es 1kg de CO_{2eq} emitido. Este indicador mide las emisiones totales de los tres principales GEI de la producción y el uso de energía, que tienen un impacto directo en el cambio climático (Kourkoumpas et al., 2018).

El “Global Warming Potential (GWP)” es un indicador comúnmente usado que calcula las emisiones de CO₂ equivalentes en un horizonte de 100, 200 o 500 años. En realidad, compara la cantidad de calor atrapado por una cierta masa del gas examinado, con la cantidad de calor atrapado por una masa similar de dióxido de carbono. Los requerimientos básicos para su cálculo son los consumos de energía y la tasa de



conversión de CO₂ (kg CO₂/kWh). El GWP se relaciona con otros indicadores relevantes para el potencial de calentamiento global, como los indicadores correspondientes a “Life Cycle CO₂ emissions”, the “Avoided CO₂ emissions”, the “CO₂ equivalent Payback Time”, and the “Cumulative Energy Demand”. El GWP se define como la relación del forzamiento radiativo integrado en el tiempo a partir de la liberación instantánea de 1 kg de una sustancia traza en relación con la de 1 kg de un gas de referencia (Kourkoumpas et al., 2018).

3.5 Indicadores de desempeño ambiental y energético de la fase de fin de vida útil

La fase de finalización de la vida útil incluye indicadores que se refieren a la vida útil total del sistema examinado y mide los ahorros de energía y las emisiones que puede lograr cualquier aplicación de energía renovable en lugar de las basadas en fósiles. Se definen ocho indicadores representativos (Kourkoumpas et al., 2018).

El desarrollo de la aplicación de sistemas de energías renovables depende de la relación entre la energía invertida en el sistema renovable y la energía suministrada de las fuentes de energía basadas en fósiles que se espera que sustituya, durante un año de operación. Esta relación indica si una inversión en sistemas de energías renovables es rentable o no. En este marco, the “Energy Payback Time (EPBT)” (en años) indica el tiempo durante el cual, el sistema renovable producirá la misma energía utilizada para su construcción (Kourkoumpas et al., 2018).

El primer indicador denominado Energy Return on (energy) Investment (EROI) considera la vida útil del sistema/componente/tecnología y estima la proporción de la cantidad de energía utilizable (la exergía) entregada desde un recurso energético particular a la cantidad de exergía utilizada para obtener ese recurso energético. Es un indicador de rendimiento; se requiere un alto rendimiento de la inversión en energía (EROI) de un proceso de producción de energía para su viabilidad a largo plazo. Siguiendo la definición de Net Energy Ratio (NER), es fácil ver el vínculo entre NER y EROI; aunque es una medida que se refiere en la fase operativa de un sistema, la EROI tiende a referirse a NER al final de la fase de vida (Kourkoumpas et al., 2018).

Las entradas de energía consideradas en el EROI deben medirse de manera consistente, de modo que esta definición pueda ser valiosa. El componente de entrada de energía de la EROI se puede calcular en términos de energía eléctrica o térmica (Kourkoumpas et al., 2018).

La vida útil y al ciclo de vida de un sistema de almacenamiento, “Battery calendar life” and “Battery cycle life”, son los dos indicadores utilizados para evaluar el horizonte de tiempo operacional del sistema de almacenamiento, respectivamente, que a su vez están vinculados a la evaluación de este tipo de procesos en términos ambientales (Kourkoumpas et al., 2018).

El BCL indica la vida útil de la batería en años antes de que se produzca una degradación predefinida de su rendimiento, que se mide entre la puesta en servicio de la batería y su



reemplazo (at the net of possible stops for maintenance, out-of-services, etc.), por ejemplo, (Kourkoumpas et al., 2018).

Al evaluar el ciclo de vida de las baterías, hay tres factores importantes que deben tenerse en cuenta, por ejemplo: (a) Grado de descarga (Depth of Discharge, DOD), (b) tasas de carga y descarga y (c) temperatura de trabajo.

El DOD expresa la cantidad de energía almacenada en un dispositivo que se ha utilizado, por ejemplo, 0% DOD significa que una batería está completamente cargada, mientras que 100% DOD significa que una batería está completamente descargada. DOD tiene un papel importante en la degradación de la batería. Si la batería funciona con un DOD alto, las celdas se degradarán rápidamente, pero si el DOD está diseñado para que no exceda de 0.6, la vida útil de la batería es considerablemente alta. Por lo tanto, un alto ciclo de DOD resulta en una vida de ciclo más corta (Kourkoumpas et al., 2018).

Además, BCYL refleja la vida útil de la batería en términos de número de ciclos al 80% DOD antes de una degradación predefinida de su rendimiento. Esto incluye el número de ciclos equivalentes al 80% de DOD medido entre la puesta en servicio de la batería y su reemplazo (Kourkoumpas et al., 2018).

De acuerdo con la potencia nominal y la degradación de cualquier sistema de almacenamiento, la degradación de la batería es un indicador de rendimiento energético que puede estimar la reducción de la calidad de su energía durante un período determinado. Por lo tanto, la capacidad de almacenamiento de energía se reduce con el envejecimiento. En lo que se refiere al sistema de almacenamiento de la batería, la "Battery Total Degradation (BDT)" es la suma de la degradación del calendario y el ciclo (Kourkoumpas et al., 2018).

Se pueden desarrollar una serie de modelos de degradación de la batería para la cuantificación de este indicador, utilizando datos obtenidos del calendario de estimación de condiciones operativas dinámicas y el ciclo de envejecimiento. La Degradation_{Calendar} es un valor que depende del estado de carga, que es la capacidad restante disponible de la batería para la descarga como porcentaje de la capacidad máxima de la batería, la temperatura ambiente y el tiempo (Kourkoumpas et al., 2018).

Un indicador ambiental muy importante para la evaluación de los sistemas renovables y de almacenamiento es el "CO₂ equivalent Payback Time (CO₂PBT)". Calcula el tiempo (en años) requerido para que el sistema renovable ahorre la cantidad exacta de CO_{2eq} emitido durante toda su vida útil (a partir de su fabricación).

El CO_{2eq} PBT depende principalmente de la cantidad de kWh producidos por el sistema y del factor de emisión de CO_{2eq}/kWh de la red. Este indicador está en relación con el factor de capacidad y la carga del sistema de energía renovable y ambos están en funciones del tiempo de operación (Kourkoumpas et al., 2018).

Motivado por el indicador EROI, una fórmula relevante, que se puede presentar y es significativa para este tipo de soluciones, es la de la "Energy stored on invested (ESOI)".

Durante toda su vida, las tecnologías de almacenamiento electroquímico solo almacenan entre dos y diez (2–10) veces la cantidad de energía requerida para construirlos. **El ESOI es la relación entre la energía eléctrica almacenada durante la vida útil de un dispositivo de almacenamiento y la cantidad de energía primaria incorporada requerida para construir el dispositivo.** Los valores típicos de ESOI para varias tecnologías de baterías se resumen en la **Tabla 3**. La adición de almacenamiento de energía en un



sistema influye en el EROI general de un sistema, al disminuir la energía neta producida debido al aumento de las pérdidas de conversión y almacenamiento con los requisitos de entrada de energía impuestos por la construcción del sistema de almacenamiento de energía (Kourkoupas et al., 2018).

Tabla 3.2. Typical ESOI values for battery storage technologies. Fuente: (Kourkoupas et al., 2018).

Battery Technology	ESOI
Lead-acid battery	5
Lithium-ion battery	32
Vanadium redox battery	10
NaS battery	20
Zinc bromide battery	9

3.6 Indicadores para evaluar el rendimiento energético y ambiental de baterías

Las baterías son la tecnología de almacenamiento de electricidad que permite su fabricación en distintos tamaños y capacidades que van desde poco menos de 100W hasta varios MW; tienen una eficiencia de almacenamiento de entre 60-80%, según el ciclo de operación y del tipo de celda electroquímica de que se trate. En la Tabla 3.3 se muestran distintos parámetros de operación de distintas baterías, los cuales afectan su capacidad de almacenamiento. Puede observarse que de éstas, la batería plomo-ácido (LA), las baterías de alta temperatura (NaS o NaNiCl) y las baterías de flujo de ión-litio (LiBs) son las de mayor interés para aplicaciones domésticas (Kourkoupas et al., 2018).

Tabla 3.3. Battery technologies and characteristics. Fuente: (Kourkoupas et al., 2018).

Battery Technology	Specific Energy (Wh/kg)/Power Density (W/kg)	Cycle life	Round-trip Efficiency
Sodium-sulfur (Nas)	150-240 Wh/kg	4500–5000 cycles at 80% DoD	75–90%
Vanadium Redox flow Battery	10–70 kWh/m ³ 16–33 kWh/m ³	Several thousand cycles >12,000 at 100% DoD	85% 75–80%
Lead Acid (PbO ₂) battery (conventional battery)	30 Wh/kg–150 W/kg 30–50 Wh/kg	1000 cycles 500–1000 cycles	85–90% 65–80%



Battery Technology	Specific Energy (Wh/kg)/Power Density (W/kg)	Cycle life	Round-trip Efficiency
Lithium ion (Li-ion) battery	200 Wh/kg	3000Cycles at 80% DOD	95%
Nickel Cadmium (NiCd) battery	50–75 Wh/kg	2000–2500 cycles	85%

La fase de disposición final es un factor fundamental para determinar el impacto ambiental total de un sistema de baterías en todo su ciclo de vida, de manera que, para disminuir el impacto ambiental de las baterías es necesario incrementar el reciclaje, su rendimiento, así como reducir el contenido de materiales peligrosos. Por otro lado, el uso de energía primaria y la consecuente emisión de CO₂ son los factores de mayor interés en la fase de fabricación de las baterías debido a que se tienen emisiones importantes de SO_x y de NO_x durante la extracción y transformación de las materias primas (Kourkoupas et al., 2018).

Kourkoupas et al., 2018, indican que la estimación del perfil ambiental de los sistemas de baterías se debe realizar de manera sistemática, enfatizando acciones que influyen en mayor grado, como el rendimiento energético del sistema propuesto. Dado que las baterías presentan la mayoría de los impactos de su ciclo de vida durante las fases de fabricación y eliminación, incluyendo el uso de energía primaria, los indicadores clave propuestos para evaluar el desempeño ambiental están orientados a las emisiones indirectas. En la **Tabla 3.4** y en la **Tabla 3.5** se muestran las emisiones de GEI producidas por cada kg de batería fabricada (Kourkoupas et al., 2018).

Tabla 3.4. Characterized GHG emissions per kg of produced battery and MJ of capacity. Fuente: (Kourkoupas et al., 2018).

Type of battery	GHG emissions (kgCO _{2eq} /kg of battery)	GHG emissions (kgCO _{2eq} /MJ)
Lead Acid	0.9	5–7
Lithium-ion (NMP solvent)	12.5	17–27
Lithium-ion (water solvent)	4.4	-
Nickel cadmium	2.1	10–15
Nickel metal hydride	5.3	16–20
Sodium sulphur	1.2	2

Tabla 3.5. LCA studies on batteries. Fuente: (Kourkoupas et al., 2018).

Battery Typology	System boundaries	GHG emissions (kgCO _{2eq} /kg of battery)
LiFePO ₄	Manufacturing	22
Nickel cobalt manganese Li-ion	Manufacturing	22



Battery Typology	System boundaries	GHG emissions (kgCO _{2eq} /kg of battery)
Li-ion	Manufacturing	12
LiMnO ₄	Manufacturing and end-of-life	6
LiFePO ₄ (NMP solvent)	Manufacturing and end-of-life	41.04
LiFePO ₄ (water solvent)	Manufacturing and end-of-life	31.71
Nickel-metal hydride	Manufacturing, operation and end-of-life	54.6
Li-ion	Manufacturing, operation and end-of-life	40.5

Puede notarse que las baterías con mayores impactos ambientales, en términos de su producción, son el ion litio y el hidruro de níquel metálico (Kourkoumpas et al., 2018).

A continuación, se muestra la tabla resumen con los indicadores que podrían utilizarse para evaluar las tecnologías de almacenamiento de energía en cada fase de su ciclo de vida, para su aplicación en México se deberá tener una reunión con expertos locales a fin de seleccionar cuáles son aplicables en función de la disponibilidad de la información requerida.

Tabla 3.6. Indicator's (environmental and energy) metric parameter correlation. Indicators. Fuente: (Kourkoumpas et al., 2018).

Stage	Indicators
Manufacture	Embodied energy for infrastructure of materials and for the building system
	Gross primary energy requirement
	Net energy ratio
	Cumulative energy demand
Operational	Life Cycle CO ₂ emissions
	Global warming potential
	Reduction of the direct CO ₂ emissions
	Avoided CO ₂ emission
	Delivered Energy
	Share of RES
	Electricity used from on-site generation
End-of-life	CO ₂ equivalent Payback Time
	Energy Stored on Energy Invested
	Battery calendar life



Stage	Indicators
	Battery cycle life
	Battery Total Degradation

4. Análisis de ciclo de vida de tecnologías de almacenamiento

En un estudio realizado con el fin de evaluar el impacto ambiental de las tecnologías de almacenamiento de electricidad para aplicaciones de red se utilizó la metodología de análisis de ciclo de vida. Se evaluaron los impactos durante la fase de construcción, uso y disposición final de distintos sistemas de almacenamiento. En este caso, tanto el bombeo hidráulico como la tecnología de aire comprimido se estudiaron como almacenamiento mecánico. Las baterías de ácido-plomo, azufre-sodio, ión-litio y las de níquel-cloruro de sodio se consideraron como almacenamiento electroquímico (Oliveira et al., 2015).

El funcionamiento de los sistemas estudiados se llevó a cabo imitando condiciones reales de operación (capacidad, potencia nominal, tiempo de vida, tecnología y aplicación. La unidad funcional es de 1kWh de energía entregada por el sistema de almacenamiento de vuelta a la red. Cabe destacar que se consideran distintas matrices eléctricas; además, los impactos de cada tecnología están muy ligados al origen de la electricidad empleada en la fase de operación, de manera que cuando la fuente es renovable, se tienen menos impactos a lo largo de la etapa de uso de la tecnología de almacenamiento. En este estudio se partió de dos tipos de mezclas eléctricas que se describen en la **Tabla 4.1**, (Oliveira et al., 2015). El sistema estudiado se muestra en la **Figura** .

Tabla 4.1. Production unit shares (in percentage). Fuente: (Oliveira et al., 2015).

Production unit	Nuclear	Natural gas	Coal	Municipal waste	Blast furnace gas	Wind	Hydro	Biomass	Oil
Be2011	59.0	28.0	4.60	2.60	2.30	1.10	1.70	0.69	0.00
UCTE	17.0	21.0	30.0	1.0	1.0	7.0	15.0	1.0	7.0

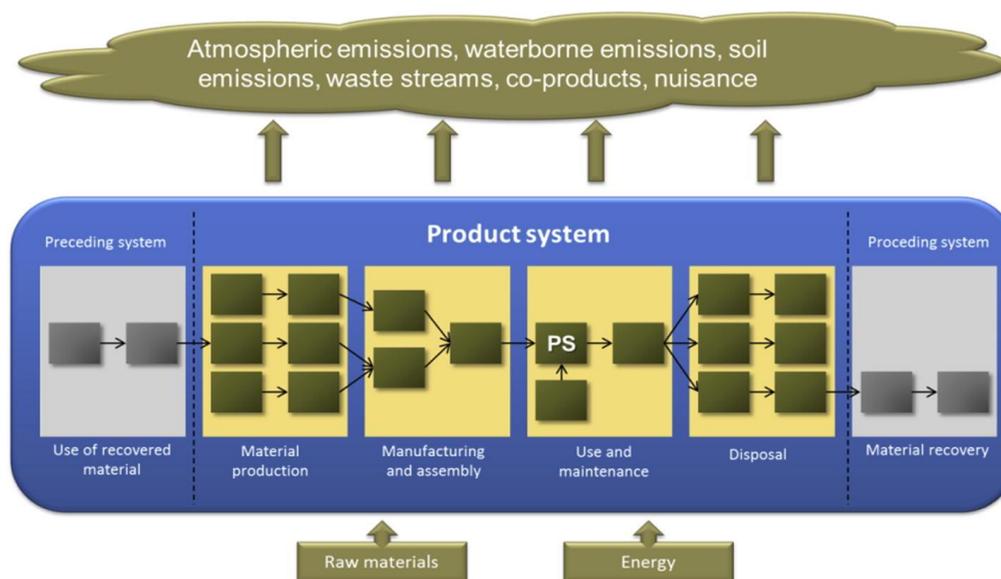


Figura 4.1. Overview of LCA methodology. Fuente: (Oliveira et al., 2015).

Las principales características de los sistemas de almacenamiento que se estudiaron se muestran en la **Tabla 4.2**. Cada tecnología se evaluó considerando el inventario de materiales y energía asociado (Oliveira et al., 2015).

En general, las cantidades totales de energía del ciclo de vida para cada tecnología de almacenamiento se calcularon teniendo en cuenta la vida útil esperada, el factor de capacidad y la capacidad de las instalaciones. Con base en tales características se calcularon los impactos ambientales de cada tecnología (Oliveira et al., 2015).

Tabla 4.2. Technical Characteristics of selected storage systems. Fuente: (Oliveira et al., 2015).

Technology	Lifetime (years)	No. cycles	Lifetime energy delivered (kW h)	Cycle efficiency (%)
Compressed Air Energy Storage (CAES)	25	-	410,625,000	70
Lead Acid Battery (PbAc)	5	1,500	2,992,500	75
Lithium Ion Battery (Li-ion)	5-10	2,500	4,738,000	95

Technology	Lifetime (years)	No. cycles	Lifetime energy delivered (kW h)	Cycle efficiency (%)
Sodium Sulfur (NAS)	10-15	3,500	31,420,000	90
Proton Exchange Fuel Cell (PEMFC)	15	-	9,398,000	35
Pumped Hydro 150	150	-	2,850,000,000	80
Sodium Nickel Chloride Battery (NaNiCl)	10	3,500	15,274,000	88

4.1 Impactos ambientales

Algunos resultados existentes muestran un grupo de impactos de punto medio que, desde un punto de vista de puntaje único (se evalúan igualmente las diferentes ponderaciones de impacto), como se puede observar en la **Figura 4.2**. En este caso, las categorías de impacto evaluadas son el cambio climático (CC, agregando la contribución a la salud humana y los ecosistemas), la toxicidad humana (HT), la formación de material particulado (PM) y el agotamiento de recursos fósiles (FD), (Oliveira et al., 2015).

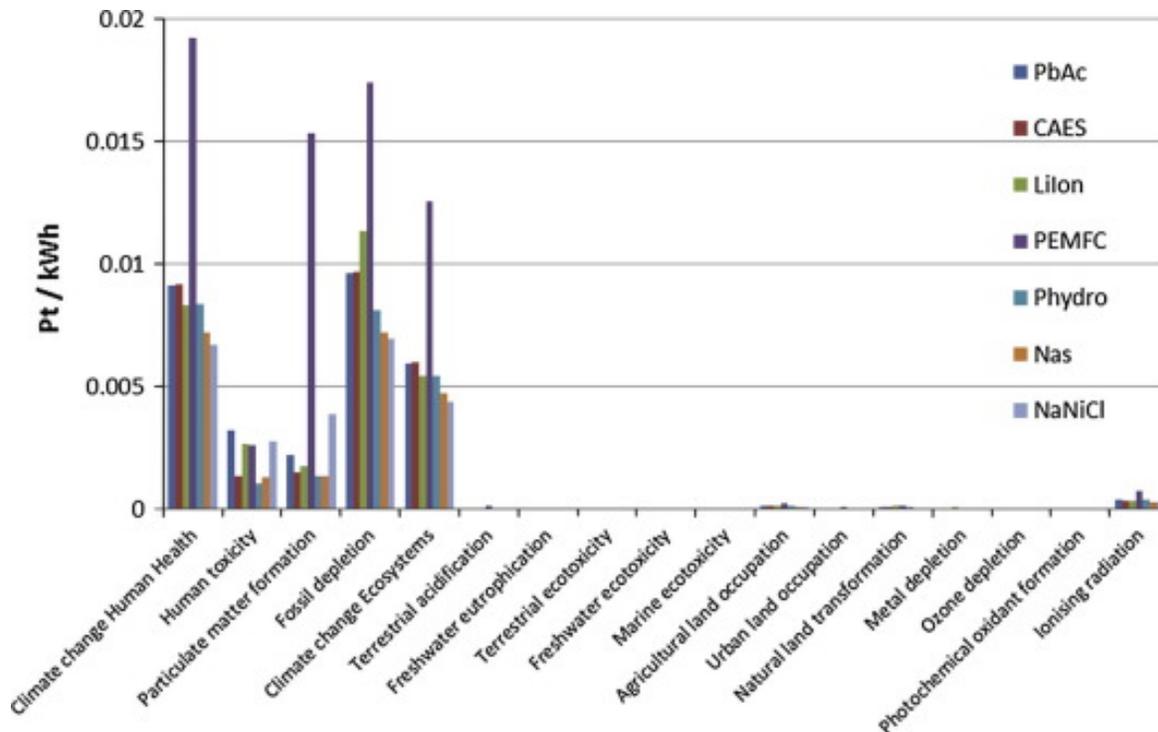


Figura 4.2. Single score contribution of all the storage technologies over all the impact categories.
Fuente: (Oliveira et al., 2015).

4.2 Cambio climático (CC)

La contribución de cada tecnología a esta categoría de impacto que calcularon Oliveira et al., 2015, utilizando un mix eléctrico distinto, se muestra en la figura siguiente:

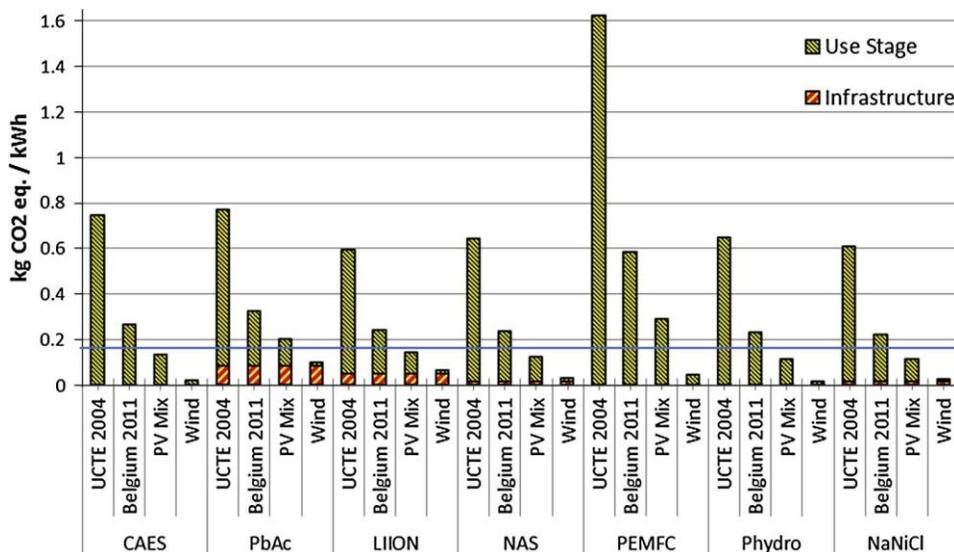


Figura 4.3. Overview of LCA methodology. Fuente: (Oliveira et al., 2015).

Se puede ver que los impactos debidos a la infraestructura son los mismos para cada una de las tecnologías ya que el mix de electricidad sólo juega un papel distintivo durante la etapa de uso. En este ejemplo, todos los impactos en la infraestructura están situados muy por debajo del límite existente en el país tomado como referencia (Bélgica de 183 g de CO_{2eq}/kW h); por otro lado, en la fase de fabricación ni la batería plomo-ácido, ni la de ión-litio presentan los mayores valores. En el caso del ácido de plomo, la disposición de la fundición del plomo representa la mayor parte del impacto; en el caso de la batería de ión-litio, el impacto se origina en las actividades mineras de cobre, litio y la producción de energía necesaria para el proceso de fabricación. La etapa de uso está directamente relacionada con la eficiencia de carga/descarga de la tecnología (Oliveira et al., 2015).

Para entregar 1kW h de energía almacenada, se necesita ese kW h de energía cuyo origen influye en el grado de daño. En las celdas de combustible (PEMFC), cuando se utiliza la fuente de electricidad UCTE, los impactos en la categoría CC tanto para la infraestructura como para la etapa de uso representan más de 1.6 kg de CO_{2eq}/kW h, que es más del doble que el de las otras tecnologías, con la misma fuente de electricidad debido, en primera instancia, a un rendimiento ambiental malo de la mezcla eléctrica y, en segundo término, a la baja eficiencia del proceso de producción del hidrógeno y a la baja eficiencia de conversión de la celda de combustible (Oliveira et al., 2015).

Las fuentes eólica y solar, en la mayoría de las situaciones funcionan mejor que el promedio de kW h de la mezcla belga de electricidad. La excepción es el caso de los

sistemas de plomo ácido combinados con energía de origen fotovoltaico. En este caso, la fabricación de los paneles compensa los daños de la fabricación de las baterías plomo-ácido de plomo ácido a un límite superior a los 183 g de $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{kW h}$. Las baterías plomo-ácido no pueden diluir sus daños de la misma manera que las otras tecnologías de almacenamiento de mayor capacidad, la siguiente **Figura** (Oliveira et al., 2015).

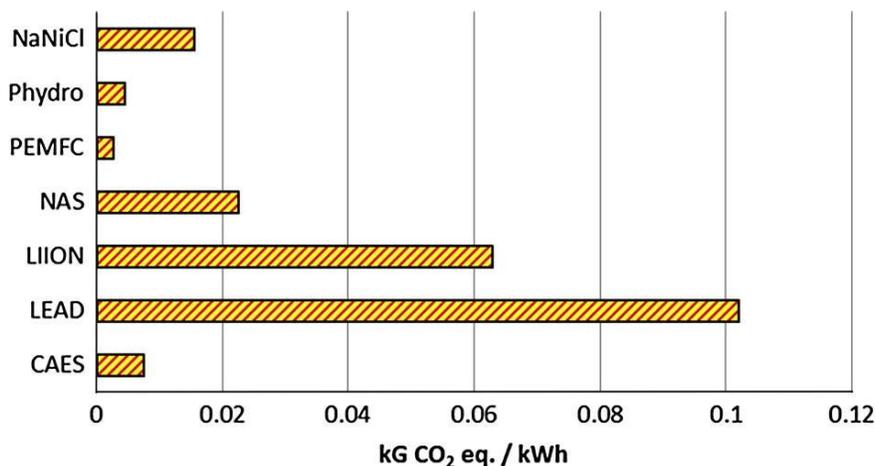


Figura 4.4. Infraestructure contribution to climate change. Fuente: (Oliveira et al., 2015).

4.3 Toxicidad humana (HT)

Como se indica en la **Figura 4.5**, sólo las tecnologías en las que la fabricación de la infraestructura no contribuye mucho para este impacto pueden lograr una puntuación más baja. El almacenamiento por compresión de aire (CAES), las baterías de sodio-azufre (NAS), las celdas de combustible (PEMFC) y el bombeo hidráulico (PHydro) tienen puntuaciones de infraestructura por debajo del HT promedio de Bélgica (0.45kg 1,4 $\text{DB}_{\text{eq}}/\text{kW h}$). La etapa de uso está influenciada, como en el cambio climático, por la eficiencia de la tecnología (Oliveira et al., 2015).

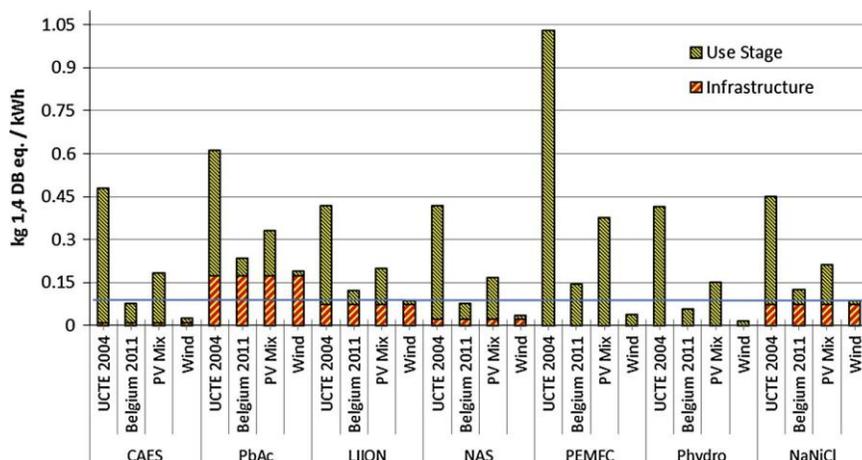


Figura 4.5. Infraestructura (inc. EOL) and use stage contributions to human toxicity. Fuente: (Oliveira et al., 2015).

Las celdas de combustible, cuando utilizan la electricidad UCTE presentan los mayores valores de HT, seguidas de las baterías PbAc, Li-ión y las NaNiCl, donde únicamente los impactos en la infraestructura son mayores que los valores de Bélgica. Curiosamente, los daños de cualquier tecnología combinada con una mezcla fotovoltaica completa son mayores que la mezcla de Bélgica 2011. Los grandes proveedores de energía como PHydro y CAES no pueden funcionar por debajo del valor límite con una alimentación de electricidad fotovoltaica. Las principales causas del daño ambiental son las actividades mineras de las materias primas necesarias para los paneles solares. El proceso de fabricación también consume mucha energía y, como punto adicional, las instalaciones de producción de paneles se encuentran en China principalmente (Oliveira et al., 2015).

Los valores de infraestructura relevantes para sistemas como las baterías de ácido de plomo, Li-ion, NAS y NaNiCl no reflejan la incidencia de los daños involucrados en los mismos lugares en la fase de uso. Son responsables de la extracción de materiales de diferentes ubicaciones en todo el mundo, su procesamiento, el transporte, el ensamblaje y la instalación en la ubicación de uso final. Los altos valores en la etapa de uso para todas las tecnologías con todas las mezclas, pero 100% de eólica muestra ser la mejor opción para utilizar como materia prima de electricidad para almacenar en todas las tecnologías. Ambientalmente hablando, puede que no sea beneficioso almacenar energía en baterías PbAc, Li-ión o NaNiCl, ya que el rendimiento ambiental relacionado es peor que 1 kW h proveniente directamente del mix eléctrico de Bélgica (Oliveira et al., 2015).

Los valores bajos de las tecnologías de aire comprimido y almacenamiento hidráulico se deben a la construcción del depósito y la cantidad necesaria de acero y el cemento para almacenar el agua y el aire, respectivamente, durante el tiempo de vida de energía total entregada (Oliveira et al., 2015).

4.4 Agotamiento de recursos fósiles



El impacto del agotamiento de los recursos fósiles es mayor en la etapa de uso de todas las tecnologías de almacenamiento que se evaluaron (Oliveira et al., 2015). Este impacto expresa la dependencia de las mezclas de energía utilizadas durante las etapas de uso y de construcción en combustibles fósiles, como, el carbón, el gas natural y el petróleo. Sólo se tienen valores relevantes en la etapa de construcción en las baterías Pb-Ac y Li-ión (Figura). En la siguiente figura se puede observar que existe una correlación entre el impacto y el origen de la energía utilizada (Oliveira et al., 2015).

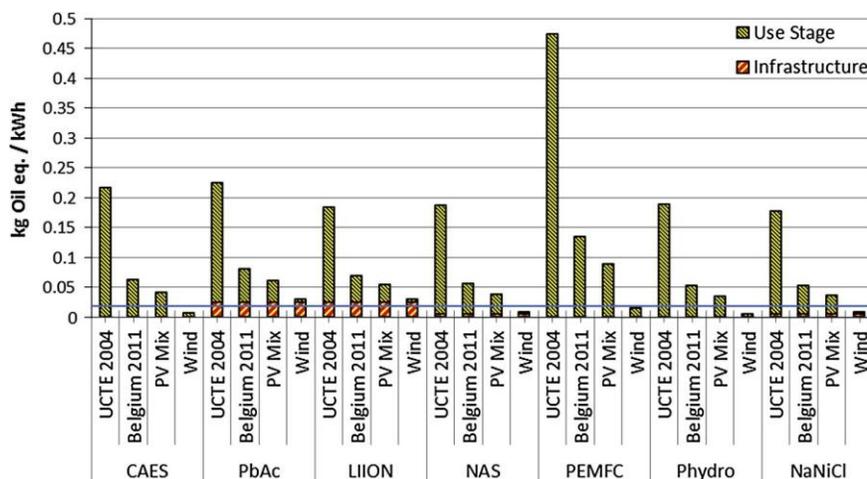


Figura 4.6. Infrastructure (inc. EOL) and use stage contributions to fossil depletion. Fuente: (Oliveira et al., 2015).

Por un lado, la electricidad UCTE tiene los mayores impactos en todas las tecnologías analizadas. Por el otro lado, la fase de uso es afectada por la eficiencia de las tecnologías de almacenamiento por lo que, los daños están en función de esos factores. Analizando únicamente la etapa de construcción independientemente del origen de la energía usada en la fase de operación, se puede relacionar la energía necesaria en la fabricación y en el ensamblaje por kg de producto con el valor general. Las baterías de plomo-ácido requieren la mayor cantidad de energía durante el proceso de fundición del plomo. De manera análoga, la extracción de recursos y la fabricación de ánodos de las baterías de iones de litio tienen las mayores contribuciones, sólo el valor para la infraestructura representa la mitad del valor de un kW h producido a partir de la mezcla eléctrica de Bélgica 2011 para esta misma categoría de impacto. De nuevo se puede observar que las energías renovables tienen mejores valores que la electricidad producida mediante energías convencionales. En la mayoría de los casos, los valores de la etapa de uso sólo se contrarresta con la producción de la infraestructura a niveles más altos que el promedio de kW h de la mezcla de Bélgica (Oliveira et al., 2015).

5. Resumen de impactos ambientales por categoría



En la siguiente tabla, se muestran los valores recopilados de distintos autores, para las categorías de impacto seleccionadas, de cada una de las tecnologías estudiadas.

Tabla 5.1. Tabla resumen de los principales impactos ambientales de las tecnologías de almacenamiento estudiadas. Fuente: Elaboración propia, con datos de (Sternberg & Bardow, 2015), (Oliveira et al., 2015), (Wang et al., 2018), (Kourkoupas et al., 2018).

Technology	Climate change (kg CO _{2eq})	Ecotoxicity (kg 1,4-DBeq)	Abiotic depletion (Kg Sb _{eq})
Pumped hydro	3.2-4.8* (Sternberg & Bardow, 2015)		1.0 - 1.4* kgOil _{eq} (Sternberg & Bardow, 2015)
	0.66 UCTE 2004 0.23 Belgium 2001 kgCO _{2eq} /kWh (Oliveira et al., 2015) [^]		
Hydrogen storage	2.2 - 3.3* (Sternberg & Bardow, 2015)		0.9 - 1.3* kgOil _{eq} (Sternberg & Bardow, 2015)
Lead acid battery	102.76 (Wang et al., 2018)*	1.24 (Wang et al., 2018)	165.73 kg Fe _{eq} 41.01 kg oil _{eq} (Wang et al., 2018)
	0.78 UCTE 2004 0.32 Belgium 2001 kgCO _{2eq} /kWh (Oliveira et al., 2015) [^]		0.225 UCTE 2004 0.08 Belgium 2001 kg oil _{eq} /kWh (Oliveira et al., 2015) [^]
Litium-ion battery	36.1 - 76.7* (Sternberg & Bardow, 2015)		7.6 - 16.2* kgOil _{eq} (Sternberg & Bardow, 2015)
	0.69 UCTE 2004 0.23 Belgium 2001 kgCO _{2eq} /kWh (Oliveira et al., 2015) [^]		0.181 UCTE 2004 0.075 Belgium 2001 kg oil _{eq} /kWh (Oliveira et al., 2015) [^]
	12% (Kourkoupas et al., 2018)		
	40.5 [@] (Kourkoupas et al., 2018)		
Lithium manganese battery	27.80 (Wang et al., 2018)	0.76 (Wang et al., 2018)	86.90 kg Fe _{eq} 8.23 kg oil _{eq} (Wang et al., 2018)
	6% (Kourkoupas et al., 2018).		
Nickel cobalt manganese Li-ion	22% (Kourkoupas et al., 2018)		
Nickel-metal hydride	54.6 [@] (Kourkoupas et al., 2018)		
Lithium iron phosphate battery	16.10 (Wang et al., 2018)	0.58 (Wang et al., 2018)	10.70 kg Fe _{eq} 4.87 kg oil _{eq} (Wang et al., 2018)
	22% (Kourkoupas et al., 2018).		
LiFePO₄ (NMP solvent)	41.04% ^s (Kourkoupas et al., 2018).		
LiFePO₄ (water solvent)	31.71% ^s (Kourkoupas et al., 2018)		
Sodium sulfur battery	0.65 UCTE 2004 0.26 Belgium 2001 kgCO _{2eq} /kWh		0.185 UCTE 2004 0.055 Belgium 2001 kg oil _{eq} /kWh



Technology	Climate change (kg CO _{2eq})	Ecotoxicity (kg 1,4-DBeq)	Abiotic depletion (Kg S _{beq})
	(Oliveira et al., 2015) [^]		(Oliveira et al., 2015) [^]
Sodium Nickel Chloride Battery	0.61 UCTE 2004 0.21 Belgium 2001 kgCO _{2eq} /kWh (Oliveira et al., 2015) [^]		0.183 UCTE 2004 0.051 Belgium 2001 kg oil _{eq} /kWh (Oliveira et al., 2015) [^]
Vanadium redox flow battery	24.8 - 58.8* (Sternberg & Bardow, 2015)		8.2 - 19.6* kgOil _{eq} (Sternberg & Bardow, 2015)
Flywheel			

- * For construction of energy storage systems. All values are per MWh surplus electricity. Supplementary information from (Sternberg & Bardow, 2015).
- + From production process, (Wang et al., 2018)
- [^] impacts of the construction, disposal/end of life, and usage of each of the systems. Values to infraestructura and use stage. Climate change [kgCO_{2eq}/kWh]; Fossil resource depletion [kg oil_{eq}/kWh]; (Oliveira et al., 2015).
- % Manufacturing;
- & Manufacturing and end-of-life;
- @ Manufacturing, operation and end-of-life

6. Conclusiones

En lo que se refiere al ESOI que es la relación entre la energía eléctrica almacenada durante la vida útil de un dispositivo de almacenamiento y la cantidad de energía primaria incorporada requerida para construir el dispositivo las que mejor desempeño muestran son las baterías de Ion-Litio (32) que puede ser 3 veces mayor que el de las baterías de flujo Vanadio Redox (10) y hasta seis veces mayor que las baterías de plomo ácido.

En cuanto a las emisiones por MJ las baterías de Ion Litio tienden a tener mayores emisiones entre 17 a 27 kgCO_{2e}/MJ que por ejemplo las de plomo ácido con emisiones entre 5 -7 kgCO_{2e}/MJ o las de Sodio Azufre con aproximadamente 2 kg CO_{2e}/MJ.

En cuanto a las emisiones durante las etapas de manufactura, operación o posoperación las baterías de Ion-Litio presentan emisiones de 40.5 kg CO_{2e}/ kg de batería a lo largo de las tres etapas: solamente en la etapa de la fabricación presentan emisiones de 12 kg CO_{2e}/ kg de batería.

El grado del impacto depende del origen de la energía utilizada durante la fabricación. En la etapa de uso el mix de electricidad utilizado juega un papel distintivo den los impactos climáticos. Cuando los sistemas de almacenamiento están acoplados a fuentes de energías renovables variables como lo son solar y eólica tiene a reducirse su impacto climático.

El impacto climático en el caso de las baterías de ácido de plomo y de las baterías de ión-litio se debe a las actividades mineras y la producción de energía necesaria para el proceso de fabricación.



Al utilizar un mix de energía con un rendimiento ambiental “malo” (más combustibles fósiles) las celdas de combustible (PEMFC), presentan más del doble de emisiones que las otras tecnologías, usando la misma fuente de electricidad, esto se puede explicar debido a la baja eficiencia del proceso de producción del hidrógeno y a la baja eficiencia de conversión de la celda de combustible.

Las tecnologías PEMFC, Rebombeo, CAES tienen a tener los menores impactos climáticos en lo que se refiere a la infraestructura (fabricación e instalación). En cambio, para la etapa de uso las tecnologías que presentan menores impactos climáticos son las baterías (Li-Ion, NaNiCl, NaS) seguidas por el Rebombeo.

El acoplamiento de sistemas de almacenamiento y sistema de energía renovable tiene a disminuir significativamente el impacto climático en la etapa de uso. Es por ello que es de considerar que durante su operación las tecnologías de almacenamiento no estén siendo operadas por ejemplo durante la carga con un mix de energía que tienden a mayores emisiones por ejemplo en sistemas con una proporción alta de combustibles fósiles en particular carbón.

Algunas tecnologías presentan aspectos negativos ya que ocupan grandes extensiones y tienen impacto en el cambio climático debido a, por ejemplo, los embalses para los sistemas de almacenamiento con rebombeo hidráulico, a la contaminación química que acompaña al uso de baterías o a por la creación de subproductos ambientalmente dañinos para el ambiente por transformaciones químicas y, además, presentan sus principales impactos ambientales durante la fase de fabricación.

Las baterías de níquel metal híbrido (NiMH) son una alternativa viable a las baterías de níquel-cadmio porque su funcionamiento es mejor y son ambientalmente inocuas. En comparación con las baterías de plomo-ácido y de níquel-cadmio, la batería de NiMH es ecológica debido a la falta de sustancias tóxicas como el cadmio, el plomo o el mercurio.

En general, las tecnologías de almacenamiento de energía no tienen efectos ambientales; sin embargo, presentan emisiones importantes durante la etapa de fabricación.



7. Referencias

Aneke, M., & Wang, M. (2016, October 1). Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. *Applied Energy*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>

Baumann, M., Weil, M., Peters, J. F., Chibeles-Martins, N., & Moniz, A. B. (2019). A review of multi-criteria decision making approaches for evaluating energy storage systems for grid applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 516–534. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.016>

Dehghani-Sani, 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(November 2018), 192–208. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.023>

Guinée, J. B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., ... Udo de Haes, H. A. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards*. (S. S. & B. Media, Ed.) (Vol. 7). Kluwer Academic Publishers.

Guney, M. S., & Tepe, Y. (2017). Classification and assessment of energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1187–1197. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.102>

Hauschild, M., Rosenbaum, R., & Olsen, S. (2018). *Life Cycle Assessment Theory and Practice*. (M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, & I. OlsenStig, Eds.), *Life Cycle Assessment - Theory and Practice*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>

Kourkoumpas, D. S., Benekos, G., Nikolopoulos, N., Karellas, S., Grammelis, P., & Kakaras, E. (2018, December 1). A review of key environmental and energy performance indicators for the case of renewable energy systems when integrated with storage solutions. *Applied Energy*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.043>

Kousksou, T., Bruel, P., Jamil, A., El Rhafiki, T., & Zeraouli, Y. (2014, January 1). Energy storage: Applications and challenges. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. North-Holland. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.015>

Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137, 511–536. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>

Oliveira, L., Messagie, M., Mertens, J., Laget, H., Coosemans, T., & Van Mierlo, J. (2015). Environmental performance of electricity storage systems for grid applications, a life cycle approach. *Energy Conversion and Management*, 101, 326–335. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.063>

Pennington, D. W., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Jolliet, O., Rydberg, T., & Rebitzer, G. (2004). Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. *Environment International*, 30(5), 721–739. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2003.12.009>

Prasad, A. D., Jain, K., & Gairola, A. (2013). *Pumped Storage Hydropower Plants*



Environmental Impacts using Geomatics Techniques: An Overview. International Journal of Computer Applications (Vol. 81).

Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., ... Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), 701–720. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2003.11.005>

Sternberg, A., & Bardow, A. (2015). Power-to-What?-Environmental assessment of energy storage systems. *Energy and Environmental Science*, 8(2), 389–400. <https://doi.org/10.1039/c4ee03051f>

Wang, Q., Liu, W., Yuan, X., Tang, H., Tang, Y., Wang, M., ... Sun, J. (2018). Environmental impact analysis and process optimization of batteries based on life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 174, 1262–1273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.059>