



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

PROPUESTA DE RECUPERACIÓN DE CALOR RESIDUAL EN UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO REFRIGERADO, A PARTIR DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

TRABAJO FINAL DEL

Máster Universitario en Ingeniería del Diseño

REALIZADO POR

Francisco Javier Astorga Mendoza

TUTORIZADO POR

Bélgica Victoria Pacheco Blanco

CURSO ACADÉMICO: 2020/2021

Resumen

La industria portuaria es uno de los sectores clave para el mercado global, transportando cerca del 90% de los bienes comercializados. Esta actividad no ha sido ajena a la emergencia climática, declarando como prioridades el cuidado de la calidad del aire y el consumo de energía. Dentro de las actividades del sector logístico del puerto, se encuentra el almacenamiento en frío, el cual tiene asociado una alta demanda de electricidad para su operación. Con el objetivo de reducir los impactos ambientales asociados al ciclo de vida del almacén, se aplica la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV). Los resultados permiten contrastar escenarios en la operación, a fin de valorar propuestas que apunten a la recuperación del calor residual y reducir los impactos del ciclo de vida.

Palabras clave: ACV; puerto, calor residual, refrigeración, eficiencia energética.

Resum

La indústria portuària és un dels sectors clau per al mercat global, transportant prop del 90% de les mercaderies comercialitzades. Aquesta activitat no ha sigut aliena a l'emergència climàtica, declarant com a prioritats la cura de la qualitat de l'aire i el consum d'energia. Dins de les activitats del sector logístic del port, es troba l'emmagatzematge en fred, el qual té associat una alta demanda d'electricitat per a la seua operació. Amb l'objectiu de reduir els impactes ambientals associats al cicle de vida de l'emmagatzem, s'aplica la metodologia d'anàlisi de cicle de vida (ACV). Els resultats permeten contrastar escenaris en l'operació, a fi de valorar propostes que apunten a la recuperació de la calor residual i reduir els impactes del cicle de vida.

Paraules clau: ACV; port, calor residual, refrigeració, eficiència energètica.

Abstract

Port industry is one of the key sectors for global market, transporting about 90% of goods traded. This activity has been no stranger to the climate emergency, with air quality care and energy consumption being a priority. Within the port's logistic activities is cold storage, which is related to a high demand for electricity for its operation. To reduce environmental impacts associated with the warehouse life cycle, the Life Cycle Assessment (LCA) methodology is applied. The results allow for the contrasting of operation scenarios, in order to evaluate proposals that target the recovery of waste heat and reduce life cycle impacts.

Keywords: LCA; port, waste heat, cooling, energy efficiency.

Índice

1.	Introducción.....	7
1.1	Objetivos.....	9
1.2	Antecedentes.....	10
1.2.1	Economía Circular y Simbiosis Industrial.....	10
1.2.2	Recuperación del calor residual.....	11
1.2.3	Edificios y estudios de referencia.....	13
2.	Metodología y herramientas.....	16
2.1	Definición del alcance.....	18
2.1.1	Escenarios de estudio.....	19
2.1.2	Unidad funcional.....	19
2.1.3	Límites del sistema.....	20
2.1.4	Categorías de impacto.....	23
2.1.5	Calidad de datos.....	25
2.2	Inventario.....	25
2.2.1	Infraestructura.....	25
2.2.2	Operación.....	27
2.2.3	Recuperación de calor.....	29
2.2.4	Fin de vida.....	29
3.	Resultados.....	31
4.	Discusión.....	37
5.	Conclusiones.....	40
6.	Referencias.....	42

Índice de figuras

Figura 1: 10 puertos de contenedores en Europa con mayor volumen de carga manipulada (expresada en TEU) en 2020	8
Figura 2: Diagrama del sistema de economía circular.....	11
Figura 3: Red Ecluse, Puerto de Amberes.....	12
Figura 4: Esquema de un Ciclo Orgánico de Rankine.....	13
Figura 5: Interior de una planta de almacenamiento.....	14
Figura 6: Vista aérea planta Agro Merchants Westland, Países Bajos.....	15
Figura 7: Entradas y salidas evaluadas en un ACV	16
Figura 8: Marco de referencia ACV (fuente: ISO 14040, 2006).....	17
Figura 9: Límites del sistema.....	20
Figura 10: Ubicación puerto de Valencia, España.....	21
Figura 11: Estructura de generación eléctrica en España según tecnologías, promedio 2020.....	22
Figura 12: Infraestructura planta de almacenamiento.....	26
Figura 13: Panel fachada y techo.....	27
Figura 14: Participación de etapas del ciclo de vida en categorías de impacto escenarios 1 y 3.....	32
Figura 15: Participación de etapas del ciclo de vida en categorías de impacto escenarios 2 y 4.....	33
Figura 16: Participación de los componentes de la infraestructura en las categorías de impacto.....	34
Figura 17: Participación de etapas de la operación en categorías de impacto para los escenarios 1 y 3.....	35
Figura 18: Participación de etapas de la operación en categorías de impacto para los escenarios 2 y 4.....	36

Índice de tablas

Tabla 1: Escenarios de estudio.....	19
Tabla 2: Inventario infraestructura común.....	26
Tabla 3: Inventario Operación para escenarios 1 y 3	28
Tabla 4: Inventario Operación para escenarios 2 y 4	28
Tabla 5: Inventario Recuperación de calor para escenarios	29
Tabla 6: Escenarios de fin de vida en España	30
Tabla 7: Comparativo caracterización categorías de impactos	31

1.Introducción

Hoy en día existe un creciente sentido de urgencia por enfrentar los desafíos medioambientales, como lo son el aumento sostenido de la temperatura global y el cambio climático. Patrones de producción y consumo, marcados por altos niveles de contaminación y sobreexplotación de recursos naturales han impulsado a los países a tomar medidas que apunten a un desarrollo económico sostenible.

En un esfuerzo conjunto de los países miembros de las Naciones Unidas, y como consecuencia de años de trabajo, en septiembre de 2015 se ha firmado el acuerdo que establece los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), involucrando los aspectos medioambiental, social y económico para el desarrollo a través de 17 objetivos y 169 metas. Dentro de estos objetivos se establecen lineamientos para la protección de la vida submarina, la producción y consumo responsables, el uso de energías limpias, comunidades sostenibles, acción por el clima e innovación en las industrias, entre otros (Naciones Unidas, 2015).

Por otra parte, se ha aprobado en 2019 el Pacto Verde Europeo con miras a un desarrollo sostenible, con una serie de propuestas en materias de energía, transporte y clima entre otras, reafirmando así el compromiso adquirido por las naciones integrantes de la Comisión Europea en la consecución de los ODS (Comisión Europea, 2019). Con el mismo objetivo es que han nacido nuevas normativas como la recientemente aprobada ley que establece el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), instrumento de planificación para promover la acción coordinada y coherente frente a los efectos del cambio climático. Esta ley recoge la necesidad de adoptar medidas para la reducción de las emisiones generadas por el consumo de combustibles fósiles en el transporte marítimo y en puertos, de forma que los puertos de competencia del Estado en el año 2050 sean de cero emisiones directas, (Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, 2021) incorpora objetivos específicos para el transporte marítimo y puertos en el Artículo 16 de la misma, como también aborda medidas relacionadas con la transición energética y los combustibles.

En esta línea, industrias relacionadas al almacenamiento y transporte de productos perecederos, principalmente alimentación, cobran transcendental importancia en cuanto al uso de energías y combustibles, utilizados para la mantención de la cadena de frío en los sistemas logísticos a nivel global. En España, la ocupación media de los

almacenes de productos congelados en el sector de alimentos y bebidas, durante el primer trimestre de 2021 ha sido del 76,61%, destacando la Comunidad Valenciana con un 88,67% como la más alta (Asociación de Explotaciones Frigoríficas, Logística y Distribución de España, 2021). Respecto a estos, la eficiencia energética emerge como la medida más importante a nivel de edificios, dado que el consumo de energía es el principal agente de impacto ambiental y económico en la industria de la construcción (Burek & Nutter, 2018).

Los puertos juegan un rol protagónico en la economía mundial, transportando cerca del 90% del volumen de las mercancías transadas mundialmente (Williams, 2019). A nivel local, Valencia se ha asentado como el principal puerto de mercancías de España y el quinto a nivel europeo (Statista, 2021), tal como se muestra en la Figura 1, manipulando cerca de 5,4 millones de contenedores durante el año 2020 (carga expresada en contenedores equivalentes de 20 pies, o TEU por su acrónimo en inglés).

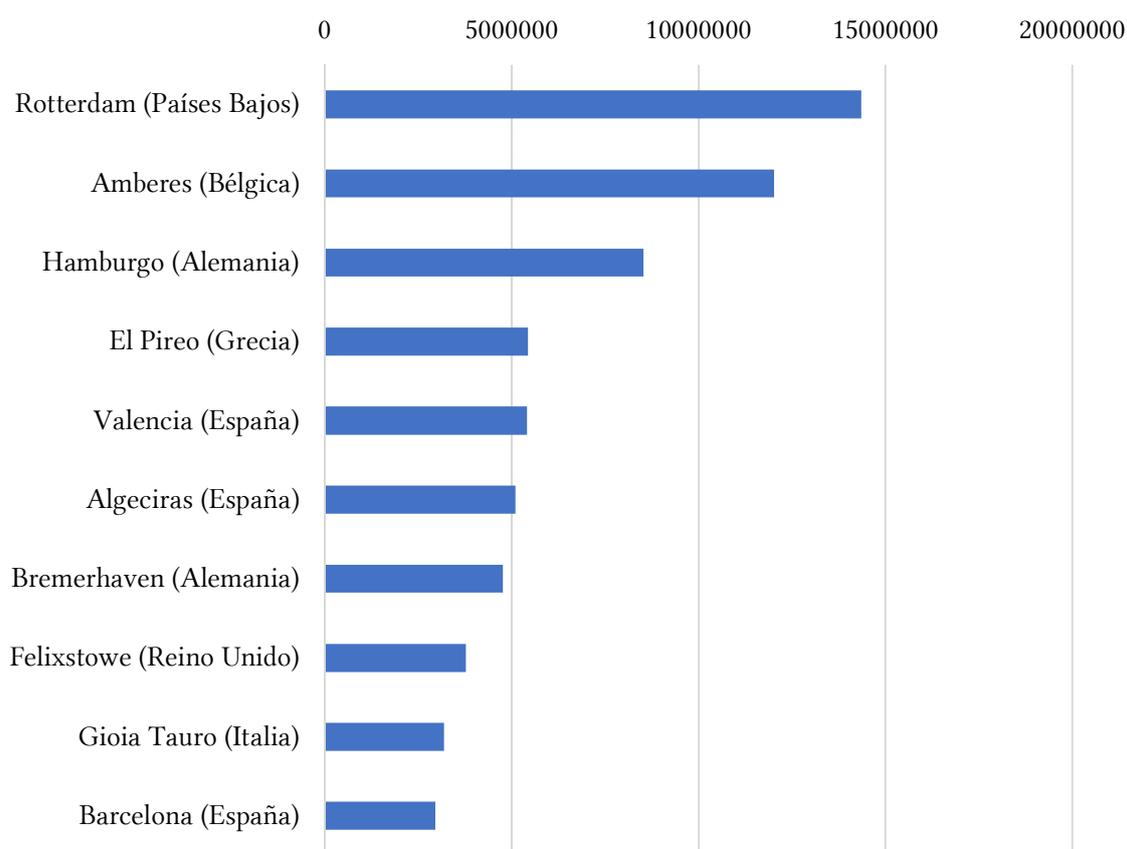


Figura 1: 10 puertos de contenedores en Europa con mayor volumen de carga manipulada (expresada en TEU) en 2020 (fuente: Statista, 2021).

Como actores relevantes en la cadena de suministro, los puertos son responsables de diversos impactos ambientales generados por las diferentes actividades portuarias como el manejo de carga, la conectividad entre las redes de transporte marítimo-terrestres, las actividades industriales, la infraestructura requerida para la distribución, almacenamiento y logística, así como la producción y distribución de energía (Notteboom et al., 2020). A pesar de lo anterior, esta industria no ha sido ajena al sentido de urgencia a nivel global por el deterioro del medioambiente. El cuidado de la calidad del aire y el consumo de energía, han estado dentro de las tres primeras prioridades medioambientales de la Organización Europea de Puertos Marítimos desde 2013 (Darbra et al., 2020).

A modo de respuesta a la actual crisis climática, se han desarrollado modelos de producción que propician la reducción en la generación de residuos y la sinergia entre industrias, como es el caso de la simbiosis industrial y la economía circular. La Fundación Ellen MacArthur (EMF por sus siglas en inglés), ha promovido el concepto de economía circular en los últimos años, definiéndolo como un sistema regenerativo por diseño, que apunta a mantener los productos, componentes y materiales en su utilidad y valor más alto por el mayor tiempo posible, distinguiendo ciclos en la tecnosfera y la biosfera (EMF, 2021).

El modelo de economía circular se ha posicionado durante los últimos años, presentando una oportunidad para la industria portuaria de asegurar su competitividad, mientras fomenta la innovación y reduce sus impactos ambientales (Carpenter et al., 2018). Dentro de las propuestas específicas que se han levantado para trabajar en los conflictos medioambientales de esta industria, se incluyen el optimizar actividades de almacenamiento y distribución de bienes, a través del diseño de bodegas que incluya el punto de vista de la sostenibilidad, la eficiencia energética y el reciclaje de materiales (Notteboom et al., 2020).

1.1 Objetivos

El presente trabajo de fin de máster pretende ser un aporte en la toma de decisiones y el avance a hacia una estrategia circular en el Puerto de Valencia. Este busca ofrecer información relevante respecto a los impactos ambientales asociados a construcción, operación y fin de vida de una planta de almacenamiento refrigerado ubicada en el puerto, así como evaluar la alternativa de recuperar el calor residual generado por la operación de la planta.

Para alcanzar lo descrito anteriormente, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar el ciclo de vida de una planta de almacenamiento refrigerado.
- Analizar el ciclo de vida de la planta, incorporando un sistema de recuperación de calor residual.
- Evaluar para ambos casos, dos escenarios de consumo eléctrico.
- Para cada propuesta, identificar las etapas que más aportan a las categorías de impacto seleccionadas.

Este estudio presenta en una primera sección el contexto en el cual se motiva su realización, introduciendo los conceptos asociados a la economía circular y ejemplando casos de recuperación de calor en la industria. En la segunda sección se desarrolla la metodología de ACV, detallando en particular el alcance e inventarios de los ciclos de vida estudiados, para dar lugar a una tercera sección de resultados. Estos son discutidos extensamente en la cuarta sección, para dar lugar a las conclusiones finales.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Economía Circular y Simbiosis Industrial

El concepto de economía circular ha tomado mayor relevancia en la última década al plantear alternativas que mitiguen las externalidades negativas del sistema productivo, pasando de un modelo lineal de tomar, de producir y descartar; a un sistema regenerativo desde su diseño, redefiniendo el concepto de crecimiento con énfasis en los beneficios para la sociedad. Esta alternativa apunta a mantener los productos, componentes y materiales útiles y en su valor más alto por el mayor tiempo posible (Figura 2), sustentándose en tres principios: eliminar residuos y contaminación desde el diseño, mantener productos y materiales en uso, y regenerar sistemas naturales (EMF, 2021).

Una serie de proyectos del programa “Observatorio en red de la ordenación del territorio europeo” (ESPON por su acrónimo en inglés) (ESPON, 2019), han estudiado la implementación del concepto de economía circular a nivel territorial, destacando el potencial que tienen los sectores como el de la alimentación, la movilidad y la construcción, de disminuir las emisiones de gases efecto invernadero en un 48% en 2030 y en un 83% para el 2050, comparados con los niveles de 2012. Para ello, resulta

clave el manejo y prevención de residuos, así como se propone la implementación de circuitos locales de residuos-a-recursos, y en particular, el desarrollo de simbiosis industrial en el sector productivo (Gravagnuolo et al., 2019).

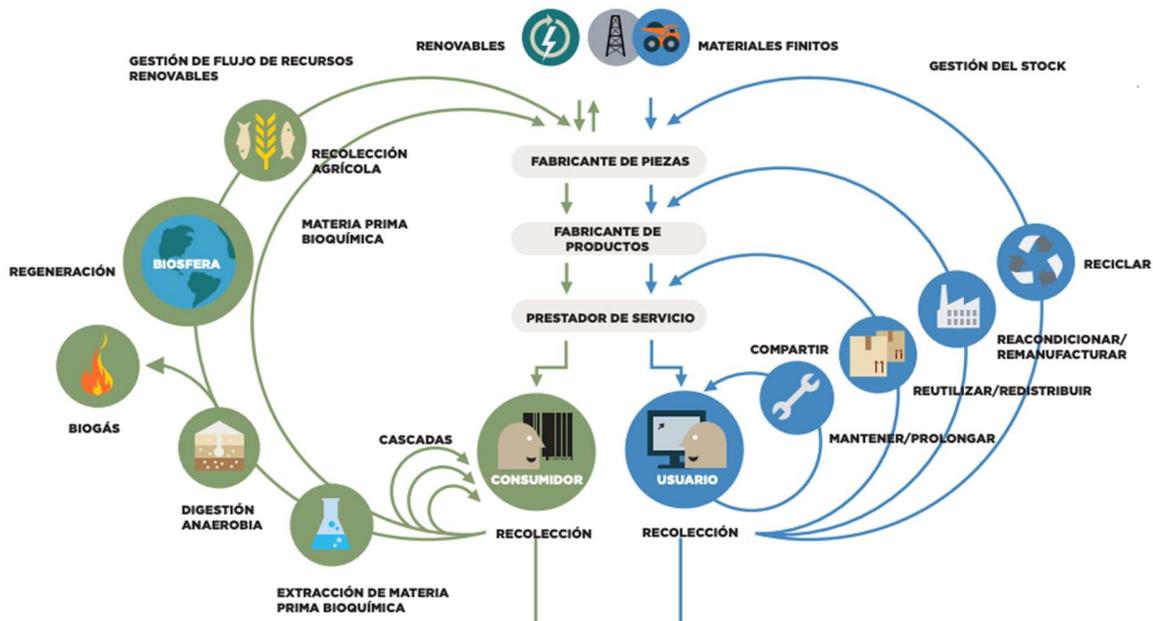


Figura 2: Diagrama del sistema de economía circular (fuente: EMF, 2019).

La simbiosis industrial busca optimizar recursos y el manejo de residuos en zonas geográficas acotadas, promoviendo el intercambio de materiales, energía o subproductos entre industrias. Estas incorporan a sus procesos como entradas, los residuos que otras industrias consideran salidas, dando lugar un sistema regenerativo y de mutuo beneficio.

1.2.2 Recuperación del calor residual

Un caso de simbiosis industrial ampliamente estudiado en la industria portuaria ha sido la recuperación del calor residual producto de los procesos industriales. En marzo de 2019, el Puerto de Amberes inauguró su primera red industrial de vapor, ECLUSE, la cual transporta el vapor a alta temperatura y presión (400°C y 40 bar respectivamente), el cual proviene desde seis plantas de la industria química en el puerto. Se ha estimado que esta red de 5 km de largo tiene el potencial de reducir las emisiones de las compañías involucradas en al menos 100000 toneladas CO₂/año (Port of Antwerp, 2019).



Figura 3: Red Ecluse, Puerto de Amberes (Ecluse, 2019).

El Puerto de Rotterdam estimó en 2017 que el calor residual del sector industrial portuario equivalía a al menos 2.361.111 MWh, suficientes para abastecer de calor a 230.000 hogares, así como reducir emisiones por 500.000 toneladas CO₂/año (Port of Rotterdam, 2020). En septiembre de 2018 se lanzó la “Iniciativa Calor Residual Pernis”, la cual aprovecha parte de la energía generada por la refinería de Shell en el puerto para proveer de calefacción a 16.000 hogares, y de paso, dejar de emitir 35.000 toneladas CO₂/año producto del uso de gas natural.

Iniciativas similares pueden ser identificadas de la misma manera en los puertos de Ámsterdam (Port of Amsterdam, 2021), Gante (*North Sea Port*, 2021) y Hamburgo (Port of Hamburg, 2021).

En España, el potencial de aprovechar el calor y frío residual a nivel industrial se estima en 3.806.294 MWh y 79.510 MWh respectivamente según datos oficiales (Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2016). En la Comunidad Valenciana, si bien industrias como la cerámica (Ferrando, 2021) han manifestado su interés por utilizar este recurso, no se han identificado iniciativas concretas en el entorno portuario que escalen al nivel de las iniciativas descritas en puertos del norte de Europa.

Con tal de aprovechar en parte esta energía residual, diversas tecnologías han sido estudiadas (Jouhara et al., 2018), siendo una de ellas el Ciclo Orgánico de Rankine. Este sistema consiste en un intercambiador de calor conectado en un ciclo a un evaporador y a un precalentador, así como un regenerador conectado a un condensador (Figura 4), los cuales contienen un fluido orgánico. Cuando el calor residual pasa a través del intercambiador de calor, el fluido contenido en el sistema es calentado, por lo que circula a través del evaporador, expandiéndose en forma de vapor y haciendo girar la turbina generadora de electricidad. Tras salir de la turbina, el ahora vapor orgánico pasa por el recuperador, reduciendo la temperatura en el condensador donde vuelve a su estado líquido, el cual pasa por una bomba que lo reingresa al circuito rumbo al regenerador. Tanto el diseño como el desempeño de estos equipos dependen entre otros de la selección del fluido orgánico óptimo, del cual se han identificado al menos 37 diferentes.

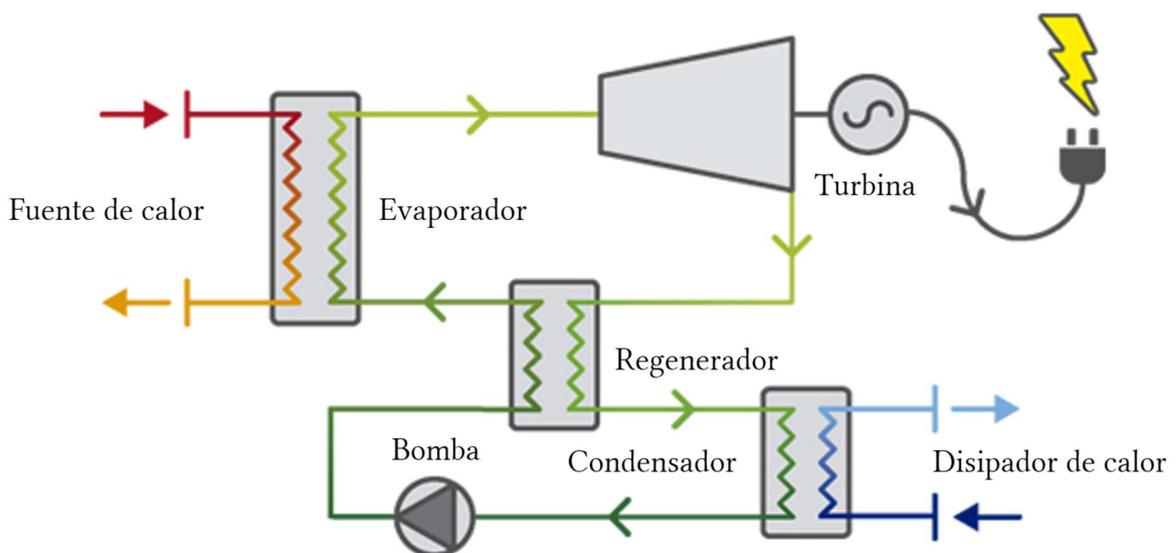


Figura 4: Esquema de un Ciclo Orgánico de Rankine (fuente: ORC Home, 2021).

1.2.3 Edificios y estudios de referencia

En los ACV a desarrollar en el presente informe, se tomarán como referencia datos de los centros de almacenamiento estudiados por Burek & Nutter (2018), así como la información publicada por el proveedor de almacenamiento refrigerado AGRO Merchants (2019).

Burek & Nutter (2018) han evaluado una red de centros de distribución de la cadena multinacional Wal-Mart en los Estados Unidos (Figura 5), categorizando los edificios según la mercancía para lo que están destinados (perecible, no-perecible), así como evaluando la influencia del clima donde se ubican las diferentes plantas. La información relacionada al consumo eléctrico utilizada sus publicaciones, se reporta obtenida desde modelos basados en el software EnergyPlusTM (*EnergyPlus*, s. f.).

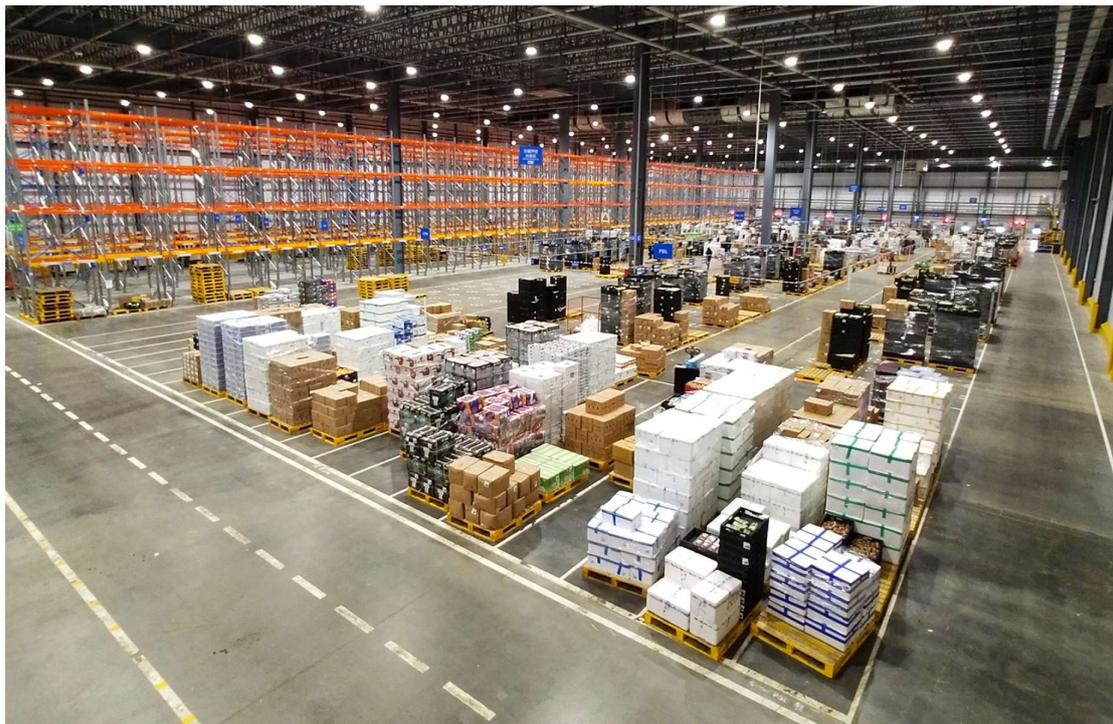


Figura 5: Interior de una planta de almacenamiento (fuente: Walmart, 2021).

Por otro lado, AGRO Merchants (2019), uno de los mayores proveedores de servicios de almacenamiento en frío del mundo, ha publicado un caso de estudio (AGRO Merchants, 2019) en donde detalla la ampliación de una planta de almacenamiento ubicada en Países Bajos. Esta ampliación ha puesto énfasis en la sostenibilidad, lo que la llevado a ser certificada como BREEAM “Excelente” (acrónimo en inglés para Metodología de Evaluación Ambiental Organización para la Investigación de la Construcción), alcanzando una puntuación superior al 74%. Entre otras, este edificio ha adoptado medidas para el ahorro en los consumos de agua y electricidad, uso compartido del espacio con la fauna local, así como mitigación de emisiones durante la construcción.



Figura 6: Vista aérea planta Agro Merchants Westland, Países Bajos (fuente: AGRO Merchants, 2019).

2. Metodología y herramientas

A modo de evaluar medioambientalmente las actividades industriales, así como adaptar mejoras eficientes, se propone el uso de la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Esta es una metodología estructurada, exhaustiva e internacionalmente estandarizada, la cual permite cuantificar las emisiones relevantes, los recursos consumidos, así como los impactos ambientales y a la salud asociados a cada una de las etapas de producción del objeto de estudio, desde la extracción de recursos hasta el fin de vida (European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability, 2010)

El marco teórico de esta metodología está establecido en las normas ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006). Estas definen análisis de ciclo de vida como la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema producto a través de sus etapas consecutivas e interrelacionadas, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final (Figura 7).

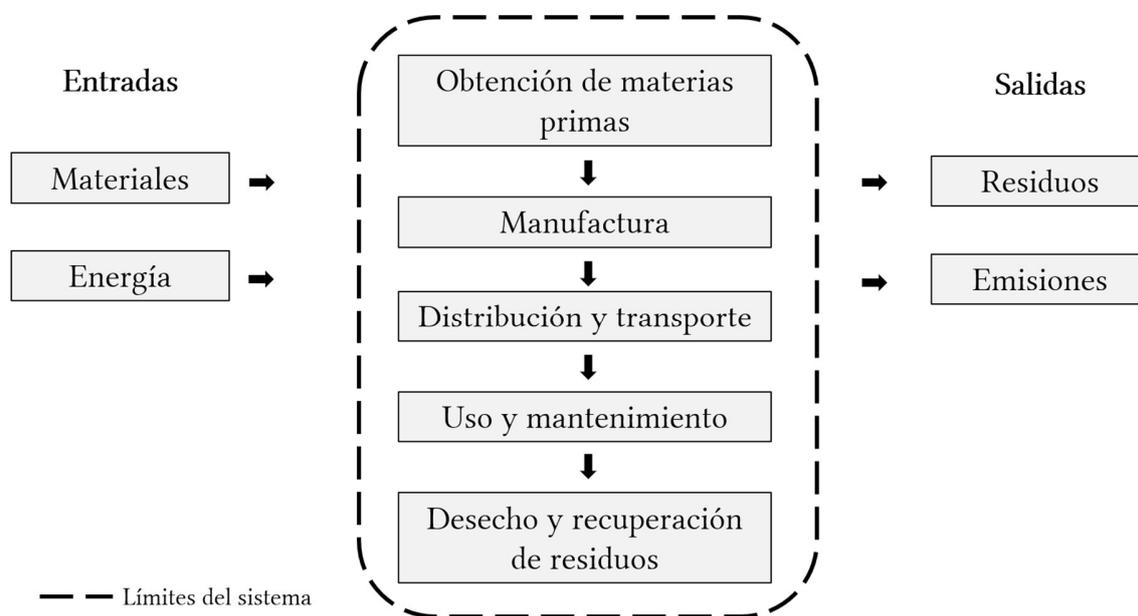


Figura 7: Entradas y salidas evaluadas en un ACV

El desarrollo del análisis es dividido en cuatro fases: definición de objetivos y alcance, análisis de inventario y evaluación de impacto, las cuales están esquematizadas en la Figura 8 y descritas a continuación.

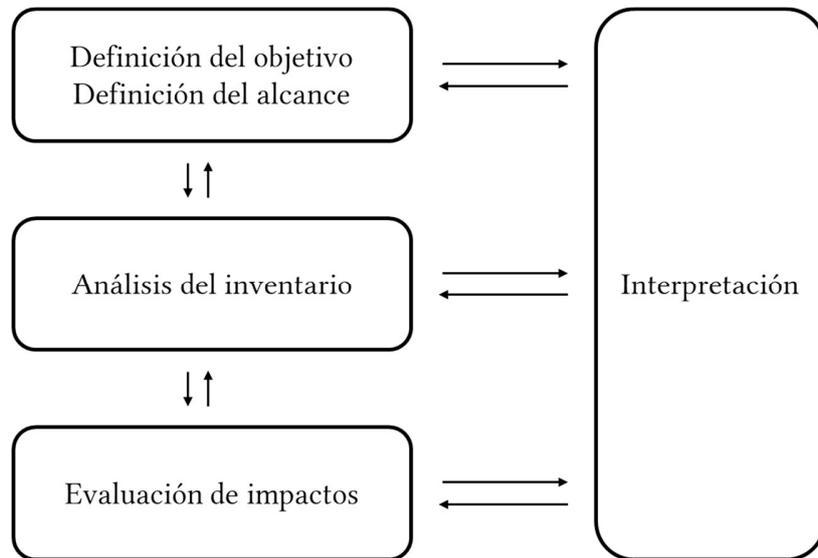


Figura 8: Marco de referencia ACV (fuente: ISO 14040, 2006).

El ACV comienza con la definición del objetivo del estudio (ver 1.1 Objetivos), en donde se declaran las razones para desarrollar el análisis, las aplicaciones esperadas, así como a quién va este dirigido. Esta sección es clave para una correcta interpretación de los resultados.

Con los lineamientos trazados en el objetivo, se define el alcance del estudio (ver 2.1 Definición del alcance), en el cual se incluye información específica respecto al nivel de detalle en el que se quiere profundizar, así como qué procesos o etapas del ciclo de vida estudiado serán parte de los límites del sistema, con tal de satisfacer los objetivos planteados. Uno de los puntos clave a definir en el alcance es la unidad funcional, la cual es una referencia precisa, cuantificable y comparable, que expresa la función del sistema producto a estudiar. En esta sección se definen metodologías de evaluación y categorías de impacto a estudiar, las cuales cuantifican los asuntos ambientales a evaluar, en línea con los objetivos definidos. Por último, supuestos y limitaciones del estudio, deben ser descritas en esta etapa.

Una vez descrito el marco en el cual se desarrollará el ACV, se procede a detallar en el inventario (ver 2.2 Inventario) cada uno de los ítems de las etapas que integran el ciclo

de vida. Este contiene toda información relevante asociada a los flujos de entrada y salida de los límites del sistema definidos, tales como consumos de agua, energía y materias primas, así como emisiones al aire, tierra y agua.

Por último, siguiendo los lineamientos definidos en el alcance, los impactos de las entradas y salidas del sistema descritas en el inventario, son cuantificadas y agrupadas a través de las categorías de impacto.

Tal como se muestra en la Figura 8, cada una de las etapas descritas anteriormente se ve enfrentada a una interpretación, la cual da espacio a una proceso crítico y alineado a los objetivos propuestos.

La metodología de ACV ha sido ampliamente utilizada para la evaluación de impactos en el sector de la edificación. Entre los principales motivos para su aplicación, se encuentran la creciente preocupación por las consecuencias medioambientales asociadas a la utilización de recursos durante el proceso de construcción, la energía consumida para la operación, así como los residuos generados en el fin de vida de los edificios (Hossain & Ng, 2018).

2.1 Definición del alcance

La categoría de edificios analizada en estudio tiene como función principal el almacenamiento climatizado de bienes perecibles, para lo cual se requiere mantener la temperatura de las salas de almacenaje en rangos entre los -21°C a $+14^{\circ}\text{C}$, con tal de conservar la cadena de frío de la mercancía manipulada (AGRO Merchants, 2019). La etapa descrita, la de uso y operación de estos edificios, es la mayor contribuyente a los impactos ambientales (Burek & Nutter, 2018), lo que ha motivado la propuesta de implementar la infraestructura requerida para la recuperación de calor residual desde la misma industria portuaria (Artacho-Ramírez et al., 2020). Complementariamente, dado el intenso consumo eléctrico, resulta relevante comparar las consecuencias de disminuir la demanda de energía, así como el buscar alternativas que apunten a la reintegro al sistema de los residuos operacionales. En específico, en este estudio se propone evaluar el potencial de utilizar la energía calorífica de baja temperatura ($T^{\circ} < 100^{\circ}\text{C}$; Jouhara, et al., 2018) para la producción de electricidad, la cual puede ser utilizada en la misma operación de la planta. El potencial de calor residual será estimado en base al consumo eléctrico del edificio (Miró et al., 2016).

2.1.1 Escenarios de estudio

Se han identificado dos escenarios de consumo eléctrico para plantas de almacenamiento refrigerado en la literatura estudiada. De esta manera se estudiarán cuatro escenarios (Tabla 1), contrastando el consumo eléctrico de la operación, así como la implementación o no de un sistema de recuperación de calor residual.

Escenario	Recuperación de calor	Escenario consumo eléctrico
1	NO	Burek y Nutter, 2018
2	NO	AGRO Merchants, 2019
3	SI	Burek y Nutter, 2018
4	SI	AGRO Merchants, 2019

Tabla 1: Escenarios de estudio.

Para la evaluación de la propuesta presentada en este documento, se han supuesto dimensiones de un edificio para almacenamiento genérico, lo cual permitirá trabajar los datos relacionados a la construcción en el inventario. Este tiene un área de 10.000 m² (40 m de ancho y 250 m de largo), una altura de 12 m de alto y está conformado por fundaciones de hormigón armado, estructura de acero y una envolvente aislante, detallado en el apartado 2.2.1 Infraestructura.

2.1.2 Unidad funcional

Como se ha indicado anteriormente, la unidad funcional expresa la función del sistema en estudio, sirviendo de referencia para los flujos de entrada y salida a analizar posteriormente en el inventario. En este caso, y tal como en otros análisis de edificios industriales (Bahramian & Yetilmezsoy, 2020), se normalizarán tanto el periodo de tiempo como el área de operación de la planta, con tal de simplificar la comparación con otros estudios y edificios de características similares.

La unidad funcional definida para el presente estudio es “1 m² de almacenamiento refrigerado, durante un año de operación”.

2.1.3 Límites del sistema

El presente ACV abarca la infraestructura y operación de la planta de almacenamiento refrigerado. Tal como se presenta en la Figura 9, el estudio tiene un enfoque “de la cuna a la tumba”, es decir, considera desde la construcción de las instalaciones, incluyendo la fabricación de materias primas, hasta la demolición del y fin de vida del edificio.

No se considerarán en este estudio los equipos ni las instalaciones mecánico-eléctricas requeridas para la operación de la planta, tales como racks de acopio o módulos de climatización, así como también ha sido excluido el sistema de valorización de calor. De esta manera, la recuperación del calor residual solo se verá reflejado en el consumo eléctrico de la operación (ver 2.2.3 Recuperación de calor). Esta decisión se toma apuntando a una simplificación del modelo del ACV, desestimando el aporte que pueda tener un mayor nivel de detalle al modelar el mobiliario de la planta de almacenamiento, y basándose en la evidencia antes mencionada de que es el consumo eléctrico el que tiene un mayor aporte a los impactos a estudiar.

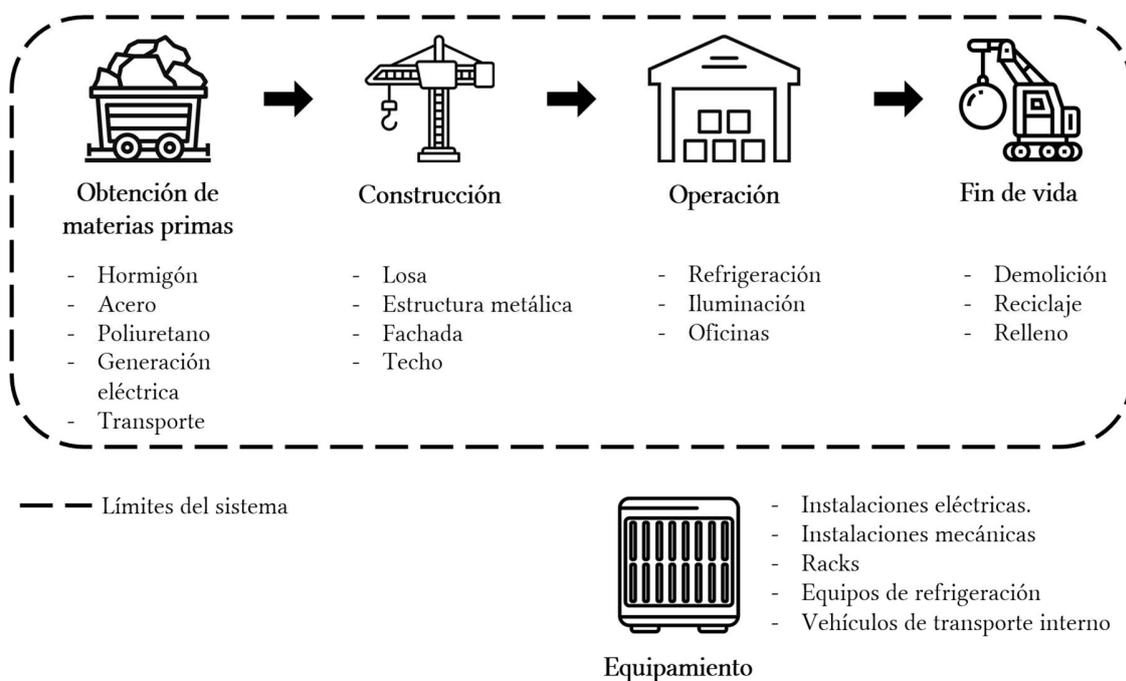


Figura 9: Límites del sistema.

A modo de referencia geográfica, se tomará como ubicación de la planta de almacenamiento las instalaciones del Puerto de Valencia (Figura 10).

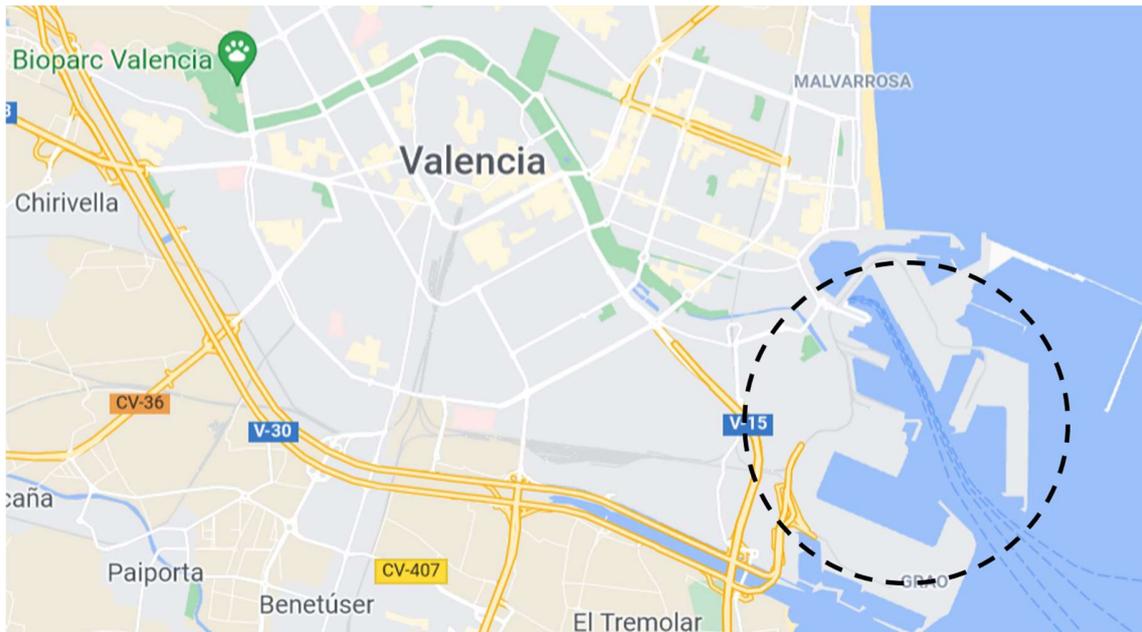


Figura 10: Ubicación puerto de Valencia, España (fuente: Google).

En relación a supuestos relacionados al transporte de materias primas, se considera una distancia de 100 km, desde el proveedor hasta el puerto.

Como referencia para valorar el consumo eléctrico asociado al ciclo de vida de la planta de almacenamiento, se utiliza la información reportada en por la Red Eléctrica de España (Red Eléctrica de España, 2021). En esta se indica que la matriz promedio del año 2020 (Figura 11) tuvo un perfil compuesto principalmente por las siguientes fuentes: generación nuclear (22%), eólica (22%), ciclo combinado (18%), hidráulica (12%), cogeneración (11%) y solar fotovoltaica (6%).

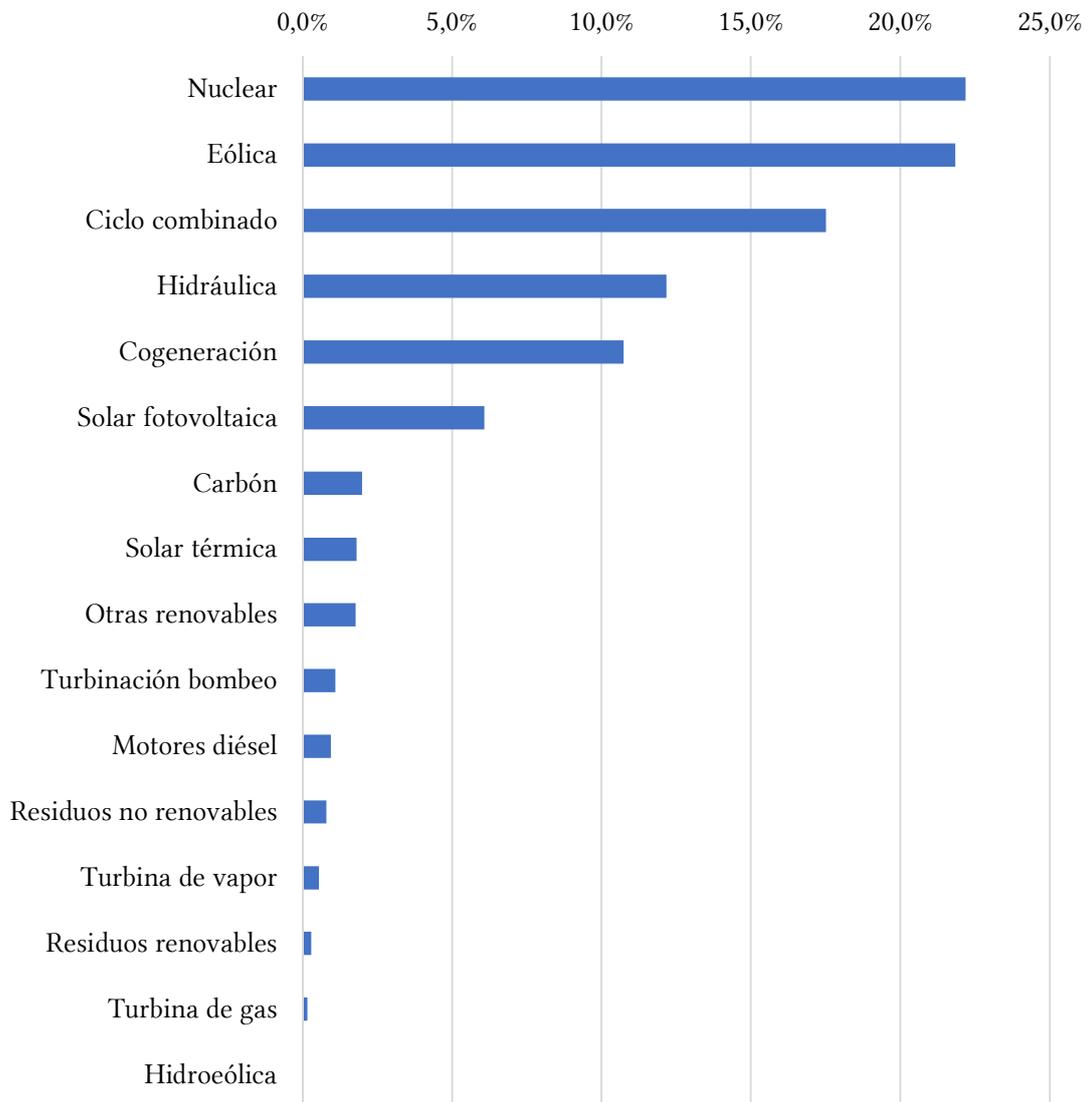


Figura 11: Estructura de generación eléctrica en España según tecnologías, promedio 2020 (fuente: Red Eléctrica de España, 2021).

Para tomar en cuenta los efectos temporales, se ha asumido una vida útil del edificio de 50 años, tal como se ha reportado en estudios similares (Hossain & Ng, 2018). Esto afectará principalmente al inventario asociado a la infraestructura y demolición, el cual es dividido para representar el aporte asociado a un año, con tal de ser coherente con la unidad funcional definida. Faenas de mantención se ponderarán en el inventario de acuerdo a la relación entre su periodicidad y entre vida útil del edificio (Burek & Nutter, 2018).

2.1.4 Categorías de impacto

El método de evaluación de impacto aplicado en este estudio es ReCiPe 2016 Midpoint H (Goedkoop et al., 2016). La perspectiva “jerarquista” (“H” del inglés hierarchist) es considerada un modelo de consenso para efectos temporales (PRé, 2020), siendo uno de los métodos más utilizados en este tipo de estudios (Hossain & Ng, 2018). Este entrega información relacionada a 18 indicadores medioambientales a nivel global, los que permiten evaluar problemas específicos (llamados de punto medio o “midpoint” en inglés), sin despreocupar otras variables. Las categorías de impacto a evaluar y los indicadores asociadas a estas, son descritas brevemente a continuación (Goedkoop et al., 2016).

Calentamiento global: Se utiliza el indicador “potencial de calentamiento global”, el cual mide el incremento de gases efecto invernadero, expresado en [kg CO₂ equivalente].

Agotamiento del ozono estratosférico: El indicador es “potencial de agotamiento de ozono”, expresa la disminución integrada en el tiempo de la concentración de ozono estratosférico, expresado en [kg CFC-11 equivalente].

Radiación ionizante: El factor “potencial de radiación ionizante” es la estimación de las emisiones de radio nucleidos, expresado en [Cobalto-60 equivalente].

Formación de ozono y salud humana: El indicador “potencial de formación de ozono y salud humana” considera el consumo de ozono por parte de la población, midiendo los cambios en la concentración ambiental de óxidos de nitrógeno o compuestos orgánicos volátiles (no-metano), siendo expresado en [kg NO_x equivalente].

Formación de material particulado fino: El “potencial de formación de material particulado fino” es expresado en [kg PM_{2.5}-equivalente].

Formación de ozono y ecosistemas terrestres: Tal como para la salud humana, el “potencial de formación de ozono y ecosistemas terrestres” es medido en [kg NO_x equivalente] y tiene relación con las diferencias entre la media horaria de concentración de ozono.

Acidificación de los suelos: El “potencial de acidificación” tiene relación con la emisión de contaminantes a la atmósfera y a los suelos, incluyendo óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y amoníaco. Este es expresado en [kg SO₃ equivalente].

Eutrofización de agua dulce: El “potencial de eutrofización de agua dulce” estima las emisiones de fósforo que puedan llegar a superficies acuáticas, siendo expresado en [kg P equivalente].

Eutrofización marina: Tal como el factor descrito anteriormente, el “potencial de eutrofización marina” hace relación con concentraciones de fósforo, expresadas en [kg P equivalente].

Toxicidad: Los potenciales de Ecotoxicidad terrestre, Ecotoxicidad de agua dulce, Ecotoxicidad marina, Toxicidad humana cancerígena y Toxicidad humana no-cancerígena, son expresados en [kg 1,4 dicloro-benceno equivalente] (1,4DCB-eq). Para los primeros tres mencionados, este estima el potencial de desaparición de especies debido al aumento en la concentración medioambiental del químico. Para los indicadores asociados al humano, se busca reflejar los fallecimientos producto del consumo de estos químicos.

Uso de terreno: Este indicador busca representar la pérdida de especies a causa del uso de suelo, siendo expresado en [m² año de acres de cultivo equivalente].

Escasez de recursos minerales: El factor “potencial de superávit de mineral”, expresado en [kg Cu equivalente], considera el mineral que debe ser extraído a futuro, producto del uso del recurso.

Escasez de recursos fósiles: El “potencial de combustible fósil” es expresado en [kg petróleo equivalente].

Consumo de agua: Este indicador busca reflejar tanto el agua consumida como el agua extraída, siendo expresado en [m³ de agua].

2.1.5 Calidad de datos

Los datos utilizados en este estudio son primariamente obtenidos desde artículos académicos, o bien información publicada por compañías del rubro del almacenamiento. Estos son modelados en el software especializado de ACV SimaPro versión 9.2 (*SimaPro*, 2021), utilizando a la base de datos Ecoinvent 3.6. Tanto el software como la base de datos han sido reportados como los más utilizados para la investigación (Bahramian & Yetilmezsoy, 2020).

2.2 Inventario

El ciclo de vida de la planta de almacenamiento refrigerado ha dividido en tres etapas: construcción, operación y fin de vida. Estas son descritas a continuación, detallando cada uno de los ítems incluidos en los límites del sistema.

2.2.1 Infraestructura

La presente etapa incluye la fabricación, traslado y montaje de los componentes de la planta de almacenamiento. Al tratarse del mismo edificio tipo, los valores son comunes para los cuatro escenarios a estudiar. Estos han sido separados en losa de fundación, estructura metálica, fachada y techo (Figura 12).

La losa de fundación de la nave es la estructura de que hace de suelo en el edificio y por sobre se levanta la estructura. Está conformada por un elemento de hormigón armado proyectado sobre un aislante térmico. El espesor de hormigón de la losa se estima de 23 cm (Locmanis et al., 2020), no detallándose en este estudio la cuantía de acero de la armadura de la losa. Para modelar el aislante, se consideran planchas de 15 cm de poliestireno expandido de densidad 20 kg/m³ (Jordán-Sánchez, 2018).

La estructura de acero corresponde al conjunto de vigas y columnas que componen el marco que da soporte al edificio. Se ha reportado que, en una nave industrial de altura entre 10 y 13 m, el peso correspondiente a la estructura metálica varía entre los 40 y 50 kg por m² (Oldham & Welch, 2011). Para este estudio, se tomará el mayor de entre estos valores.

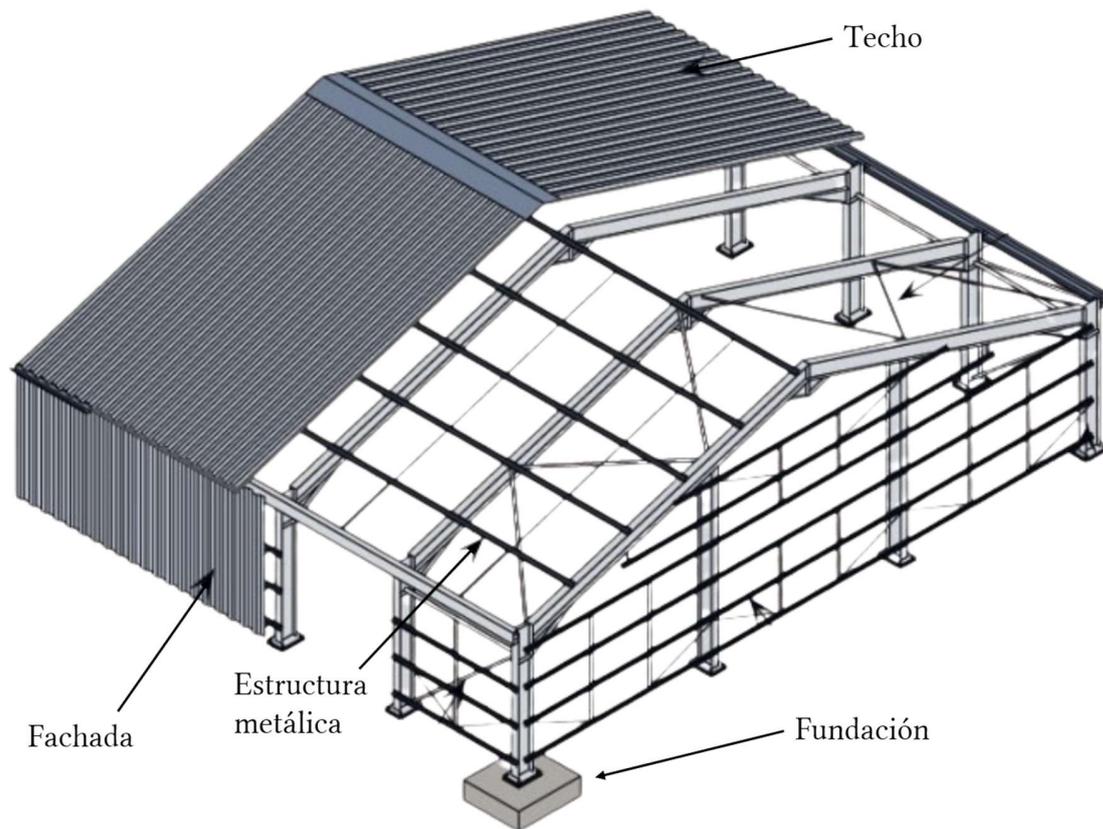


Figura 12: Infraestructura planta de almacenamiento.

Ítem	Cantidad	Ud	Material / Proceso	Inventario Ecoinvent 3.6
Losa	0,23	m3	Hormigón armado	Concrete slab {RoW}
	3	kg	Poliestireno expandido	Polystyrene foam slab {RER}
Estructura metálica	50	kg	Acero	Steel, low-alloyed {RER}
Fachada	10,4	kg	Acero	Steel, low-alloyed {RER}
	5,8	kg	Material aislante	Polystyrene foam slab for perimeter insulation {RoW}
Techo	15	kg	Acero	Steel, low-alloyed {RER}
	8,4	kg	Material aislante	Polystyrene foam slab for perimeter insulation {RoW}

Tabla 2: Inventario infraestructura común.

Los resultados de la envolvente del edificio se dividen en fachada y techo. Ambos están compuestos por un panel de dos láminas de acero de 1 mm de espesor y un relleno de poliuretano de densidad 20 kg/m^3 y conductividad térmica de 0.034 W/mK (Grupo Estisol, 2015), similar al exhibido en la Figura 13. Para cumplir con los estándares de aislación de $12,68 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ para la fachada y techo (AGRO Merchants, 2019), se requiere un espesor de poliuretano de 42 cm.

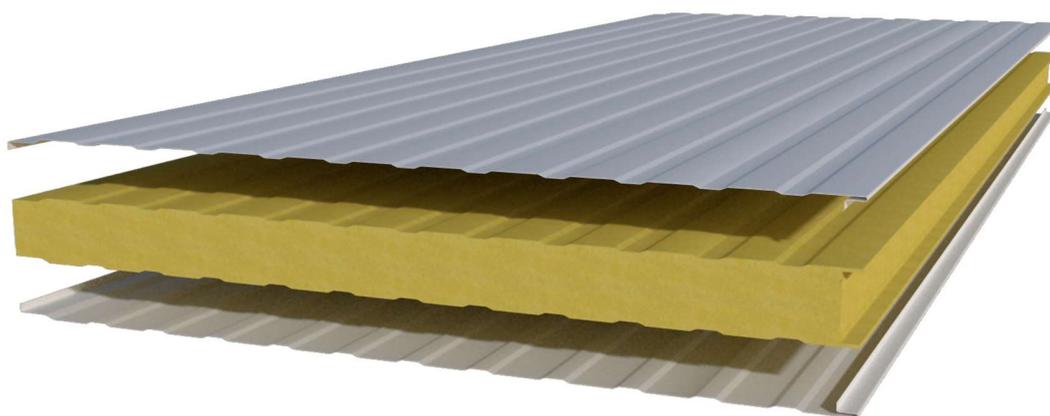


Figura 13: Panel fachada y techo.

El resumen del inventario de la infraestructura es presentado en la Tabla 2.

2.2.2 Operación

En el presente apartado se incluyen dos escenarios de consumo eléctrico para las faenas de refrigeración. Para los casos de estudio 1 y 3 (Tabla 1), los valores asociados al consumo eléctrico han sido reportados por (Burek & Nutter, 2018), indicando un requerimiento de 3381 MJ para la refrigeración del edificio (Tabla 3). Respecto a los escenarios 2 y 4, el consumo reportado para refrigeración (AGRO Merchants, 2019) alcanza los 443 MJ (Tabla 4). Para los cuatro escenarios se considera el mismo consumo de agua y gas refrigerante, los cuales se estiman 5365 lt y 240 gr NH_3 respectivamente, debiéndose este último renovar cada 20 años.

Ítem	Cantidad	Ud	Material / Proceso	Inventario Ecoinvent 3.6
Refrigeración	3381	MJ	Electricidad	Electricity, medium voltage {ES}
	14	g	Gas refrigerante	Ammonia, liquid {RER}
	17	m3	Gas natural	Natural gas, high pressure {ES}
	5365	kg	Agua	Water, decarbonised {ES}
Iluminación	75	MJ	Electricidad	Electricity, medium voltage {ES}
Oficinas	72	MJ	HVAC	Electricity, medium voltage {ES}
	139	kg	Agua	Tap water {Europe without Switzerland}

Tabla 3: Inventario Operación para escenarios 1 y 3.

Ítem	Cantidad	Ud	Material / Proceso	Inventario Ecoinvent 3.6
Refrigeración	443	MJ	Electricidad	Electricity, medium voltage {ES}
	14	g	Gas refrigerante	Ammonia, liquid {RER}
	17	m3	Gas natural	Natural gas, high pressure {ES}
	5365	kg	Agua	Water, decarbonised {ES}
Iluminación	75	MJ	Electricidad	Electricity, medium voltage {ES}
Oficinas	72	MJ	HVAC	Electricity, medium voltage {ES}
	139	kg	Agua	Tap water {Europe without Switzerland}

Tabla 4: Inventario Operación para escenarios 2 y 4.

Otros ítems en común asociados a la operación de la planta son el consumo eléctrico relacionado a la iluminación y a la climatización de las oficinas, los cuales se han valorado en 75 MJ y 72 MJ respectivamente. El consumo de agua no asociado a la refrigeración, es de 139 lt. Por último, se incluye el uso de gas natural como fuente de energía complementaria, del cual se requieren 17 m³ (Burek & Nutter, 2018).

El resumen de los inventarios de la operación para cada escenario, es presentado en las Tabla 3 y Tabla 4.

2.2.3 Recuperación de calor

Estudios realizados por Miró et al. (2016) y Hong et al. (2020), han evaluado el potencial de calor residual de las industrias, a partir de su consumo de energía o bien de las emisiones de CO₂, indicando valores entre un 8% y un 28% según el sector productivo. Tecnologías actuales, tales como el Ciclo Orgánico Rankine, han sido ampliamente reconocidas por su capacidad de transformar esta energía residual en electricidad, con una tasa de eficiencia del orden del 10% (Hong et al., 2020).

Con tal de valorar cuantitativamente la energía recuperada, en el presente estudio se estima que el calor residual disponible equivale al 10% del consumo eléctrico de la planta. Se considera que el 10% de este calor es posible reingresarlo al sistema, tras transformarlo en energía eléctrica. De esta manera, en los escenarios a estudiar que consideren recuperación de calor (3 y 4), el consumo eléctrico se ve disminuido en un 1% tal como se indica la Tabla 5.

Ítem	Cantidad	Ud	Material / Proceso	Inventario Ecoinvent 3.6
Escenario 1	0	MJ	Calor recuperado	Electricity, medium voltage {ES}
Escenario 2	0	MJ	Calor recuperado	Electricity, medium voltage {ES}
Escenario 3	35,3	MJ	Calor recuperado	Electricity, medium voltage {ES}
Escenario 4	5,9	MJ	Calor recuperado	Electricity, medium voltage {ES}

Tabla 5: Inventario Recuperación de calor para escenarios.

2.2.4 Fin de vida

Una vez cumplidos 50 años usabilidad definidos para el uso del edificio, se propone un escenario de demolición y tratamiento de los residuos resultantes, los cuales son desechos metálicos ferrosos y desechos minerales provenientes de la construcción.

Complementariamente, en esta categoría se incluye el tratamiento del agua utilizada en la operación del edificio.

Eurostat (Comisión Europea, 2021) reporta que, durante el tratamiento de los materiales provenientes de la construcción, en promedio en España el 23% va a vertedero y el 77% es recuperado para su reciclaje o relleno (ver Tabla 6). Los procesos modelados en la base de datos Ecoinvent para el tratamiento de residuos, consideran el desmantelamiento y demolición del edificio.

Año	Total	Relleno		Reciclaje	
	[ton]	[ton]	%	[ton]	%
2012	27393000	4354000	0,16	23038000	0,84
2014	7097000	2193000	0,31	4933000	0,70
2016	9148000	1940000	0,21	7206000	0,79
2018	14493000	3676000	0,25	10817000	0,75

Tabla 6: Escenarios de fin de vida en España.

3. Resultados

Con los datos expuestos en el inventario, se calculan los resultados de los indicadores para cada una de las 18 categorías de impacto, utilizando los modelos de caracterización definidos en el alcance (2.1.4 Categorías de impacto). Estos son presentados en la Tabla 7.

Categoría de impacto	Unidad	E1	E2	E3	E4
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	164	44	163	43
Agotamiento del ozono estratosférico	g CFC11 eq	0,08	0,03	0,08	0,03
Radiación ionizante	kBq Co-60 eq	164	29	163	28
Formación de ozono y salud humana	kg NO _x eq	0,34	0,10	0,33	0,10
Formación de material particulado fino	kg PM2.5 eq	0,25	0,06	0,25	0,06
Formación de ozono y ecosistemas terrestres	kg NO _x eq	0,34	0,10	0,34	0,10
Acidificación de los suelos	kg SO ₂ eq	0,49	0,13	0,48	0,13
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	0,052	0,017	0,052	0,017
Eutrofización marina	kg N eq	0,033	0,028	0,033	0,028
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	374	109	371	109
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DCB	10,1	2,5	10,0	2,5
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB	12,8	3,3	12,7	3,2
Toxicidad humana cancerígena	kg 1,4-DCB	9,5	4,7	9,5	4,7
Toxicidad humana no-cancerígena	kg 1,4-DCB	149	48	148	48
Uso de terreno	m ² a crop eq	20,0	5,2	19,8	5,1
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	0,87	0,32	0,86	0,32
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	70	29	70	29
Consumo de agua	m ³	2,8	1,9	2,8	1,9

Tabla 7: Comparativo caracterización categorías de impactos

Con tal de valorar la participación en los impactos de las etapas en la que se ha dividido el inventario, se presenta a continuación la proporción en la que tanto la infraestructura, la operación y el fin de vida influyen en los valores de la Tabla 7. Para contrastar los resultados tomando en cuenta las dos propuestas de consumo eléctrico (Tabla 3 y Tabla 4), la Figura 14 muestra la relación para los escenarios 1 y 3, y la Figura 15 para los escenarios 2 y 4.

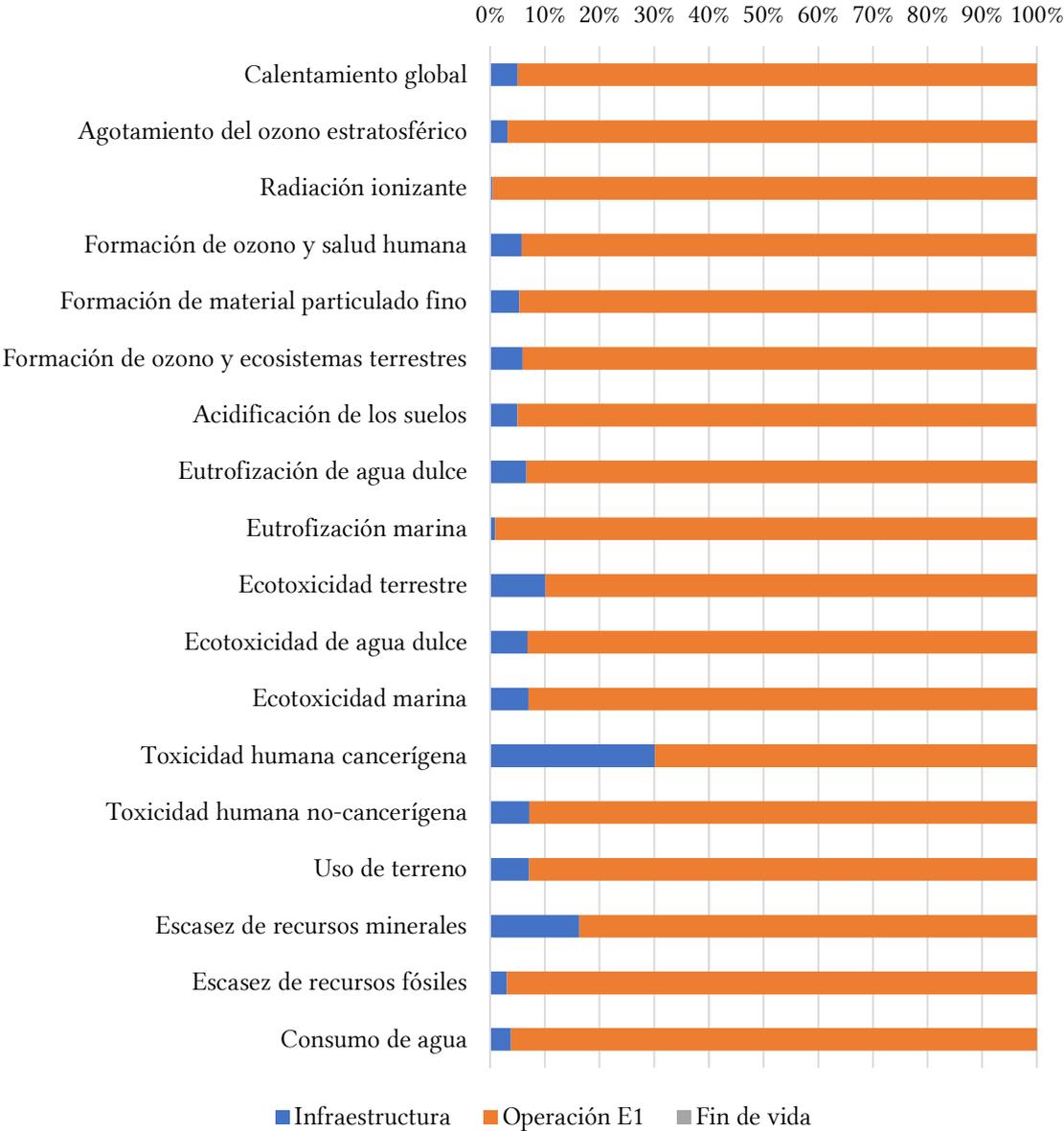


Figura 14: Participación de etapas del ciclo de vida en categorías de impacto escenarios 1 y 3.

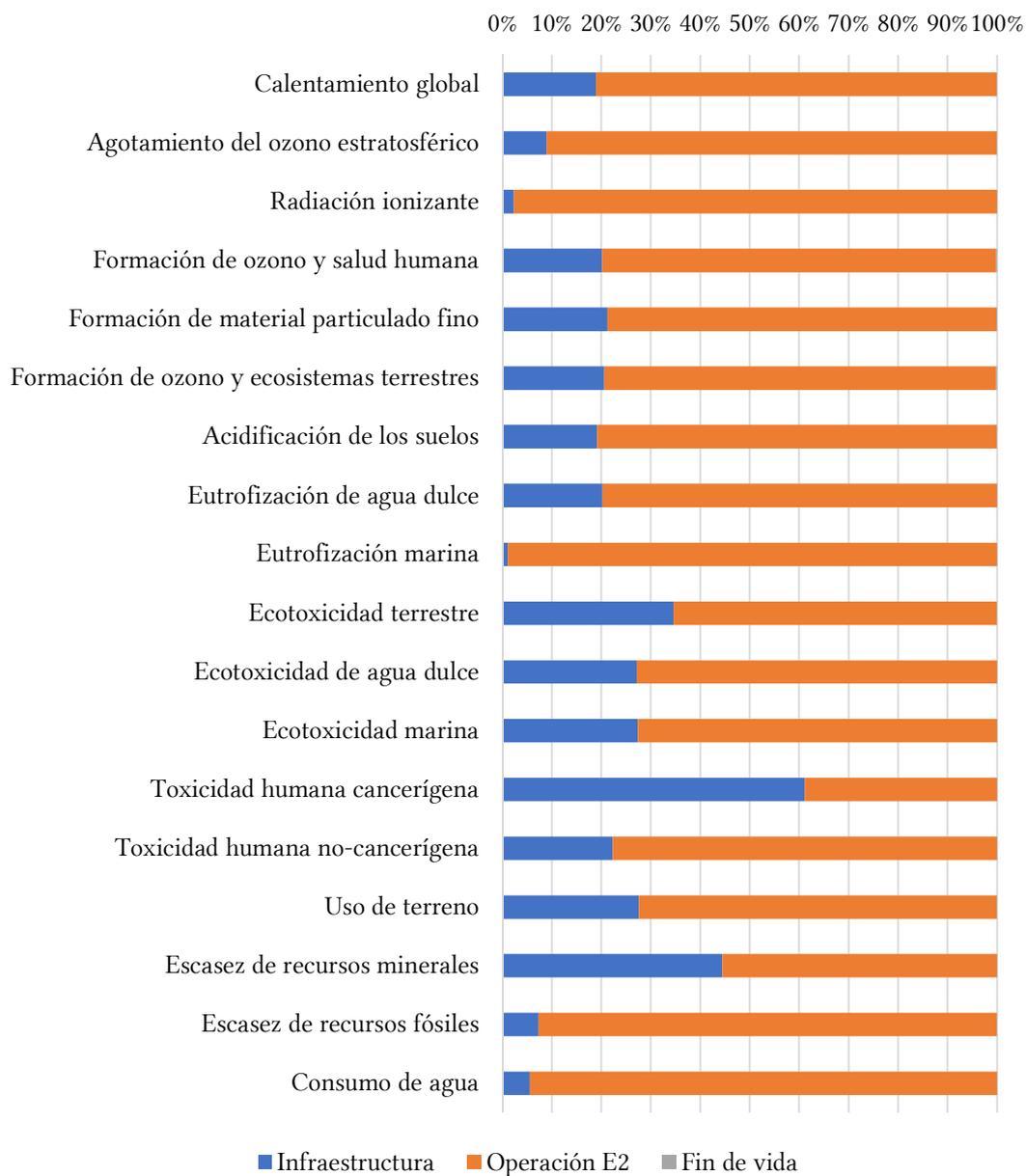


Figura 15: Participación de etapas del ciclo de vida en categorías de impacto escenarios 2 y 4.

Tanto la infraestructura como la operación del edificio han sido divididas en subetapas, cuyos impactos son ponderados a continuación. En particular, la participación los componentes de la infraestructura (estructura metálica, fachada, losa y techo) son presentados en la Figura 16. En el caso de la operación, al presentar dos escenarios de consumo eléctrico, la participación de las subetapas (refrigeración, iluminación y

oficinas) se presenta en para los escenarios 1 y 2 en las Figura 17 y Figura 18 respectivamente.

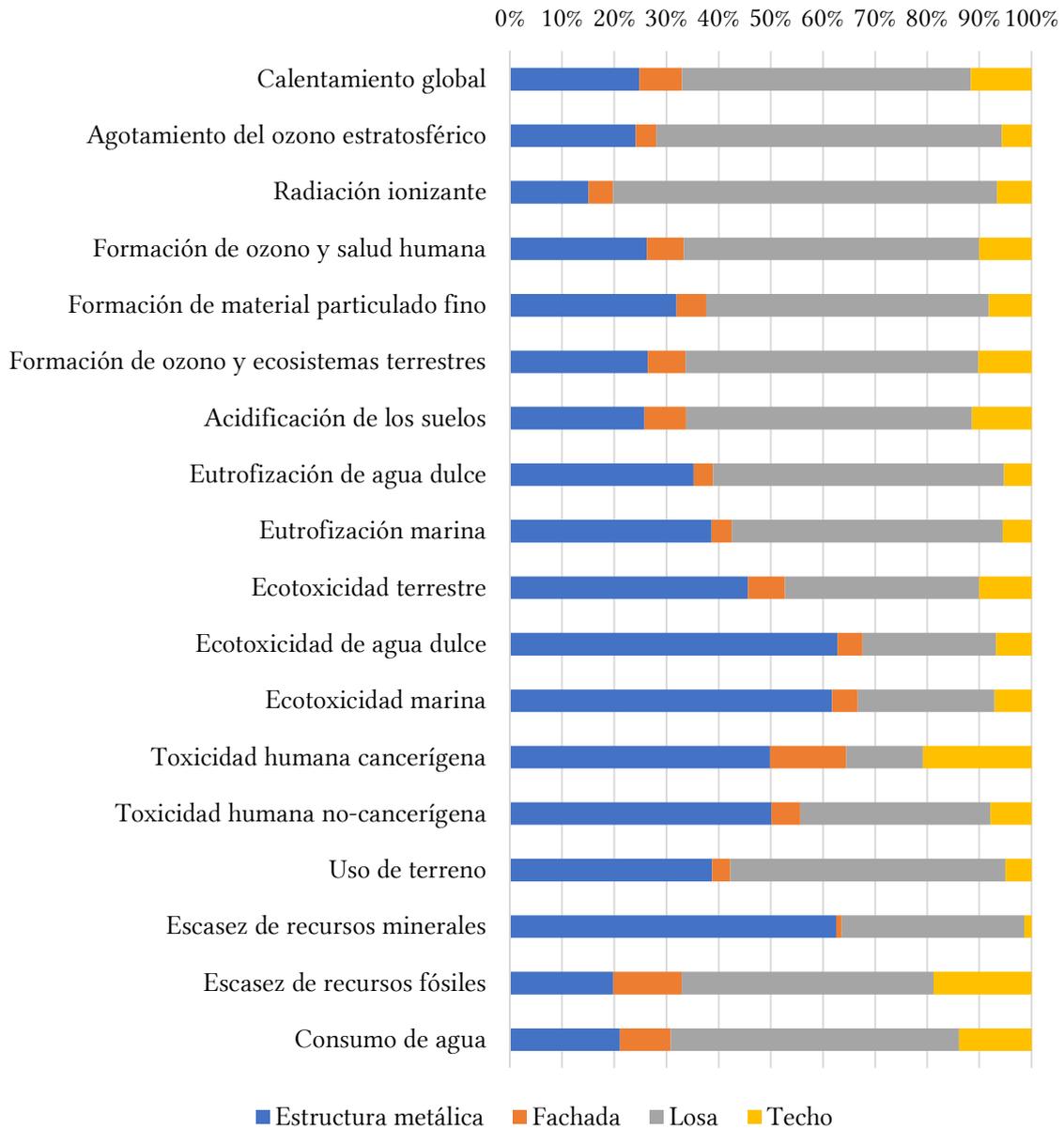


Figura 16: Participación de los componentes de la infraestructura en las categorías de impacto.



Figura 17: Participación de etapas de la operación en categorías de impacto para los escenarios 1 y 3.

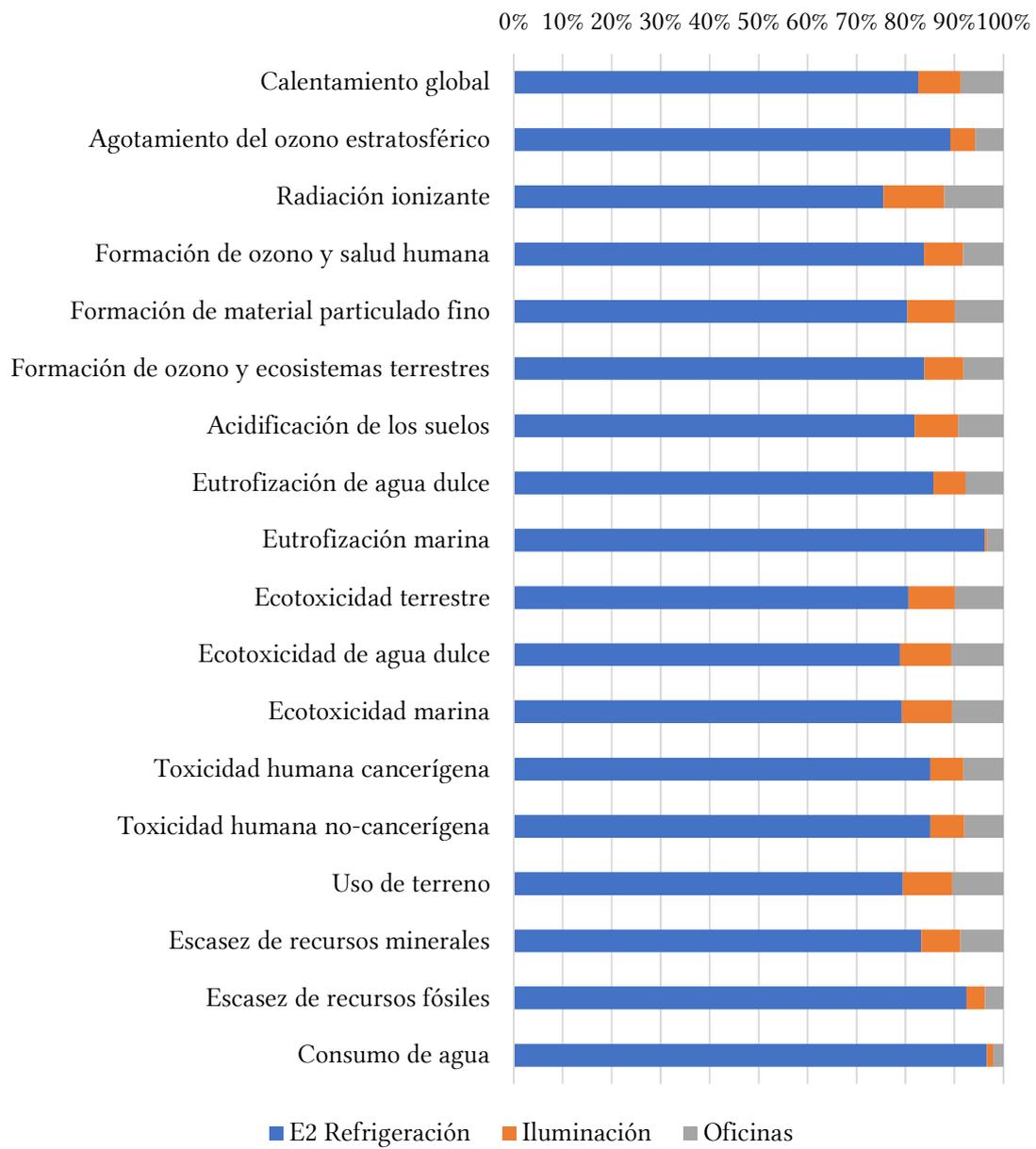


Figura 18: Participación de etapas de la operación en categorías de impacto para los escenarios 2 y 4.

4. Discusión

Finalmente, se identifican los hallazgos de la evaluación de impacto, en busca de conclusiones y recomendaciones alineadas con los objetivos y alcances definidos en un comienzo. Estos son clasificados en aquellos relacionados a los resultados (4.1), a la recuperación del calor (4.2) y a los modelos utilizados (4.3).

4.1 Resultados

Los resultados obtenidos para cada uno de los cuatro escenarios expuestos en el presente estudio, evidencian la predominante influencia de la operación en el ciclo de vida de la planta de almacenamiento, la cual representa en promedio un 93% de las categorías de impacto estudiadas en el caso de los escenarios 1 y 3 (Figura 14), y un 78% en el caso de los escenarios 2 y 4 (Figura 15). El impacto más afectado por la operación es el relacionado a la radiación ionizante, en donde a la operación de la planta tiene una influencia del 99,6% para los escenarios 1 y 3 (Figura 14), disminuyendo levemente hasta un 97,6% en los escenarios 2 y 4 (Figura 15).

En un mayor nivel de detalle, el impacto de la refrigeración es por lejos el ítem que más influye en los indicadores presentados, representando en promedio un 96% del aporte de la operación en los escenarios 1 y 3, y un 84% cuando se revisan los escenarios 2 y 4. Al considerar los impactos del ciclo de vida completo, la refrigeración alcanza una media de influencia de un 89% en los escenarios 1 y 3, y un 66% en los escenarios 2 y 4.

Tras la operación, la etapa con mayor participación en las categorías de impacto es la infraestructura, la cual se ve directamente influenciada por las diferencias en los escenarios de consumo eléctrico, representando en promedio un 7% para los escenarios 1 y 3 (mayor consumo) alcanzando un 22% para los escenarios 2 y 4 (menor consumo). La categoría de impacto más afectada por la infraestructura es la relacionada a la toxicidad humana cancerígena, en donde a la construcción del edificio se le asocia el 30% de la participación para los escenarios 1 y 3 (Figura 14), llegando hasta un 61% en los escenarios 2 y 4 (Figura 15).

En relación a los impactos asociados a la infraestructura, la división que alcanza un mayor aporte es la losa de hormigón armado, la cual representa en promedio un 48%

de los impactos asociados a la infraestructura (Figura 16), así como aporta entre un 3% (escenarios 1 y 3) y un 9% (escenarios 2 y 4) a los impactos del ciclo de vida del edificio.

El aporte del fin de vida del edificio a los impactos estudiados es casi imperceptible. Este no pasa del 0,05% en los escenarios de mayor consumo (Figura 14), ni del 0,16% en los de menor consumo (Figura 15).

Dada la alta influencia del consumo eléctrico en los impactos asociados al ciclo de vida de la planta de almacenamiento refrigerado, el presente estudio ha evaluado la alternativa de recuperar el calor residual de la planta, apuntando a mejoras en la eficiencia energética. Los resultados expuestos en la Tabla 7 reflejan que el recuperar como electricidad el calor residual de la planta, tiene el potencial de reducir los impactos estudiados en promedio entre un 0,7% (escenarios 1 y 3) y un 0,3% (escenarios 2 y 4).

4.2 Recuperación del calor

Entre otras alternativas para aprovechar el calor residual del centro de almacenamiento, se ha propuesto la climatización de una piscina cercana al puerto (Artacho-Ramírez et al., 2020). Tomando como ejemplo una piscina de 144 m³ (12m x 8m x 1,5m), como la presentada en López et al. (2012), se requieren del orden de 305.000 MJ/año para su climatización. A la vez, si se considera una planta de almacenamiento de un área de 10.000 m², el calor residual asociado a los escenarios de consumo eléctrico, es decir, el 10% de lo planteado para los escenarios 1 y 2, sería 3.528.000 MJ y 590.000 MJ respectivamente. Dado lo anterior, para climatizar la piscina mencionada, se requeriría el 9% del calor residual estimado para el escenario 1 o al 52% del calor estimado para el escenario 2.

En la Memoria Ambiental 2018 presentada por la Autoridad Portuaria de Valencia (Valenciaport & Ecoport, 2019) se indica que el consumo eléctrico asociado a las operaciones del puerto de aquel año asciende a 26.781.235 MJ. Considerando un edificio de 10.000 m² de área, los escenarios 1 y 2 presentados en este estudio equivaldrían al 132% y 22% del consumo eléctrico anual de todo recinto portuario. Lo anterior, sumado a la alta participación que tiene el consumo eléctrico en los impactos asociados al edificio, refuerza la importancia de estudiar medidas que apunten a la eficiencia energética y a la disminución del consumo eléctrico. Así mismo, considerando los supuestos de esta investigación para estimar el potencial de calor

residual, se podría inferir que las instalaciones del Puerto de Valencia tienen un potencial de calor a recuperar del orden de los 2.678.123 MJ.

4.3 Modelos

En el presente estudio se ha utilizado la metodología ACV, en la cual se han definido diferentes suposiciones, detalladas el apartado de “Metodología y herramientas”. Estas consideraciones afectan directamente la incertidumbre que pueda tener los resultados obtenidos, así como la replicabilidad del estudio.

Dentro de estas, las que mayor incidencia tiene en las categorías de impacto estudiadas, son las relacionadas al consumo eléctrico, en donde se ha asumido a modo de simplificación, el promedio para el año 2020 de la matriz energética para el territorio español. Si bien ha declarado que el edificio tiene una vida útil estimada de 50 años, la generación eléctrica del país no permanecerá estática durante este periodo, por lo que existe un grado de incertidumbre al asumir que el promedio 2020 será siquiera cercano al promedio real de lo consumido por el edificio durante este periodo de tiempo. Para suplir esto, se requeriría confeccionar un modelo dinámico en el tiempo, el cual estime tanto las tecnologías utilizadas en el pasado, como proyecte la evolución de las fuentes de generación futuras.

Si bien se ha declarado que la ubicación de la planta de almacenamiento es en el Puerto de Valencia, esto no ha tenido influencia en las etapas del inventario, en particular por considerar una distancia fija de 100 km desde el proveedor de materias primas hasta el lugar de construcción. Lo anterior, complementado por las consideraciones de la matriz energética, simplifican la comparación de este estudio, con otros de patrones de consumo eléctrico similares. En ese sentido, la Asociación de Explotaciones Frigoríficas, Logística y Distribución de España (2021) ha reportado 97 socios, a los cuales la información levantada en este estudio podría ayudar a tomar decisiones que apunten a un estrategia de desarrollo enmarcada en la economía circular. De la misma manera y como se indica en la Figura 1, en España se ubican tres de los diez puertos con mayor tránsito de contenedores de Europa, en donde podrían estar ubicados edificios similares al detallado en el presente informe.

A nivel de infraestructura, no se han considerado ni las instalaciones electro-mecánicas del edificio, ni el mobiliario requerido para su operación. Estos podrían llegar a tener una influencia considerable, en particular para escenarios con menor intensidad de

consumo eléctrico, tal como es el caso de los escenarios 2 y 4. De la misma manera, a medida que las tecnologías permitan un menor consumo eléctrico, o bien una generación con menores impactos ambientales asociados, las etapas asociadas a la infraestructura tendrán mayor relevancia.

5. Conclusiones

En el presente estudio se han evaluado y contrastado las categorías de impacto asociadas a una planta de refrigeración utilizando la metodología de ACV. Para lo anterior se ha tomado en cuenta dos escenarios de consumo eléctrico reportados en la literatura, así como se ha modelado la alternativa de reutilizar el calor residual estimado proveniente desde la operación del edificio en estudio. Esto permite tomar decisiones basadas en la investigación, al tener información de cuales son las etapas de mayor relevancia respecto a los impactos ambientales propuestos.

Se ha identificado que la operación del edificio, y particularmente la faena de refrigeración de este, es la etapa del ciclo de vida que mayor participación tiene en las categorías de impacto estudiadas, en los cuatro escenarios modelados. En esta línea, también ha quedado en evidencia que cuanto menor es consumo eléctrico, mayor es la participación de la infraestructura del edificio en los impactos. La envolvente (techo y fachada) ha sido identificado como el ítem de menor participación en los impactos estudiados, sin embargo, esta cumple una función crítica en la eficiencia energética al contribuir directamente en la aislación térmica del edificio.

Por otro lado, ha quedado en evidencia que la disminución en el consumo eléctrico, tiene una relevancia categóricamente mayor en los impactos ambientales, que el aprovechar y reincorporar el residuo de calor, al menos con las tecnologías actuales. Esto implica tomar decisiones desde la etapa de diseño del edificio, en la cual se puede tomar como referencias estándares internacionales de construcción como BREEAM, tal como lo ha hecho AGRO Merchants en su planta ubicada en Westland, Países Bajos.

Si se quisiera disminuir la incertidumbre de los resultados, así como obtener información de un edificio específico, se propone que futuros estudios tomen información de primera fuente relacionada al consumo eléctrico, así como valoren la opción de incluir el mobiliario e instalaciones electro-mecánicas.

6. Referencias

Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. (2021, mayo). *Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética*. (BOE-A-2021-8447). <https://www.boe.es/eli/es/l/2021/05/20/7>

AGRO Merchants. (2019, abril). *AGRO Merchants Group / Cold Storage Warehousing*. AGRO Merchants Group. <https://agromerchants.com/>

Artacho-Ramírez, M. A., Pacheco-Blanco, B., Cloquell-Ballester, V. A., Vicent, M., & Celades, I. (2020). Quick Wins Workshop and Companies Profiling to Analyze Industrial Symbiosis Potential. Valenciaport's Cluster as Case Study. *Sustainability*, *12*(18), 7495. <https://doi.org/10.3390/su12187495>

Asociación de Explotaciones Frigoríficas, Logística y Distribución de España. (2021, 1 julio). *Un sector estratégico para la sociedad y la economía españolas* [Comunicado de prensa]. https://www.aldefe.org/wp-content/uploads/2021/07/Observatorio-del-Frio_InformeTrim_21-1_DEF_NotadePrensa-V1.pdf

Bahramian, M., & Yetilmezsoy, K. (2020). Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research (1995–2018). *Energy and Buildings*, *219*, 109917. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109917>

Burek, J., & Nutter, D. (2018). Life cycle assessment of grocery, perishable, and general merchandise multi-facility distribution center networks. *Energy and Buildings*, *174*, 388–401. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.021>

Carpenter, A., Lozano, R., Sammalisto, K., & Astner, L. (2018). Securing a port's future through Circular Economy: Experiences from the Port of Gävle in contributing to sustainability. *Marine Pollution Bulletin*, *128*, 539–547. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.01.065>

Comisión Europea. (2019, diciembre). *El Pacto Verde Europeo* (COM(2019) 640). https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=S

Comisión Europea. (2021). *Eurostat Database*. Eurostat. <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>

Darbra, R., Wooldridge, C., & Puig, M. (2020, octubre). *ESPO Environmental Report 2020*. ESPO. <https://www.espo.be/media/Environmental%20Report-WEB-FINAL.pdf>

Ecluse. (2019, 14 marzo). *Ecluse*. <https://www.ecluse.be/homepage/>

Ellen MacArthur Foundation. (2021). *Ellen MacArthur Foundation*. <https://ellenmacarthurfoundation.org/>

EnergyPlus. (s. f.). EnergyPlus. Recuperado 7 de septiembre de 2021, de <https://energyplus.net/>

ESPON. (2019). *Observatorio en red de la ordenación del territorio europeo*. Observatorio en red de la ordenación del territorio europeo. <http://espon.fgua.es/>

European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General Guide for Life Cycle Assessment - Detailed Guidance*. Publications Office. <https://doi.org/10.2788/38479>

Ferrando, R. (2021, 23 abril). Porcelanosa busca sustituir hasta el 50% del consumo de gas con hidrógeno verde. *Levante-EMV*. <https://www.levante-emv.com/economia/2021/04/23/porcelanosa-busca-sustituir-50-consumo-48577267.html>

Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., & Meijer, E. (2016, enero). *Introduction to LCA with SimaPro*. PRé. <https://pre-sustainability.com/files/2014/05/SimaPro8IntroductionToLCA.pdf>

Google. (s. f.). *Google Maps*. Google Maps. Recuperado 2021, de <https://www.google.com/maps>

Gravagnuolo, A., Angrisano, M., & Fusco Girard, L. (2019). Circular Economy Strategies in Eight Historic Port Cities: Criteria and Indicators Towards a Circular City Assessment Framework. *Sustainability*, 11(13), 3512. <https://doi.org/10.3390/su11133512>

Grupo Estisol. (2015, 3 diciembre). *Grupo Estisol*. <https://grupoestisol.com/>

Hong, G. B., Pan, T. C., Chan, D. Y. L., & Liu, I. H. (2020). Bottom-up analysis of industrial waste heat potential in Taiwan. *Energy*, *198*, 117393. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117393>

Hossain, M. U., & Ng, S. T. (2018). Critical consideration of buildings' environmental impact assessment towards adoption of circular economy: An analytical review. *Journal of Cleaner Production*, *205*, 763–780. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.120>

ISO. (2006). *ISO 14044:2006*. Gestión Ambiental Análisis Del Ciclo de Vida Requisitos y Directrices. <https://www.iso.org/standard/38498.html>

ISO 14040:2006. (2006). Gestión Ambiental Análisis Del Ciclo de Vida Principios y Marco de Referencia. <http://www.iso.org/standard/37456>

Jordán-Sánchez, E. (2018). *Diseño de tres cámaras frigoríficas de conservación y una de congelación para almacenamiento de productos avícolas situada en la población de Hellín (Albacete)*. Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/>

Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., & Tassou, S. A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, *6*, 268–289. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017>

Locmanis, J., Pease, B. J., & Cepuritis, R. (2020). Optimal design of conventional warehouse floors: concrete flooring solutions and racking anchors. *19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development Proceedings*. Published. <https://doi.org/10.22616/erdev.2020.19.tf127>

López, F., García, J., Segador, C., Encinas, D., & Cuadros, L. (2012, julio). *Análisis de la eficiencia energética de una piscina pública climatizada mediante energía solar térmica y biomasa*. XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Valencia, España.

Ministerio de Industria, Energía y Turismo. (2016, abril). *Evaluación completa del potencial de uso de la cogeneración de alta eficiencia y de los sistemas urbanos de calefacción y refrigeración eficientes*. https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/idae/tecnologias/ahorro_y_eficiencia_energetica/transformacion_de_la_energia/evaluacion_completa_potencial_cogeneracion_y_redes.pdf

Miró, L., Brueckner, S., McKenna, R., & Cabeza, L. F. (2016). Methodologies to estimate industrial waste heat potential by transferring key figures: A case study for Spain. *Applied Energy*, 169, 866–873. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.089>

Naciones Unidas. (2015, octubre). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* (A/RES/70/1). https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=S

North Sea Port. (2021). North Sea Port. <https://en.northseaport.com/>

Notteboom, T., van der Lugt, L., van Saase, N., Sel, S., & Neyens, K. (2020). The Role of Seaports in Green Supply Chain Management: Initiatives, Attitudes, and Perspectives in Rotterdam, Antwerp, North Sea Port, and Zeebrugge. *Sustainability*, 12(4), 1688. <https://doi.org/10.3390/su12041688>

Oldham, R., & Welch, C. (2011, octubre). Steel Insight Structural Steelwork. *The Steel InSight Series*. https://www.steelconstruction.info/images/0/09/Steel_InSight-1.pdf

ORC Home. (2021, 19 febrero). Rank® Organic Rankine Cycle (ORC) Equipment, Modules and Systems. <http://www.rank-orc.com>

Port of Amsterdam. (2021). *Port of Amsterdam*. <https://www.portofamsterdam.com/en>

Port of Antwerp. (2019). Port of Antwerp. <https://www.portofantwerp.com/language>

Port of Hamburg. (2021). *Hamburg*. <https://www.hamburg.com/>

Port of Rotterdam. (2020). *Port of Rotterdam*. <https://www.portofrotterdam.com/en>

PRé. (2020, enero). *SimaPro Database Manual*. <https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/06/DatabaseManualMethods.pdf>

Red Eléctrica de España. (2021). *Red Eléctrica de España*. <https://www.ree.es/es>

SimaPro (9.2). (2021). [Software]. PRé. <https://simapro.com/>

Statista. (2021, 25 marzo). *Puertos de contenedores más grandes de Europa por volumen de carga manipulada en 2020*. <https://es.statista.com/estadisticas/864375/puertos-de-contenedores-mas-grandes-de-europa-por-volumen-de-carga-manipulada/>

Valenciaport & Ecoport. (2019). *Memoria Ambiental 2018*.
<https://www.valenciaport.com/wp-content/uploads/Memoria-Ambiental-2018ESP.pdf>

Walmart. (2021). *Walmart*. <https://www.walmart.com/>

Williams, J. (2019). The Circular Regeneration of a Seaport. *Sustainability*, *11*(12), 3424. <https://doi.org/10.3390/su11123424>