



Universidad de Valladolid

*Criterios para la sostenibilidad del proyecto de estructuras:
análisis del ciclo de vida con BIM.*

Alumna
Esther Herrería Palazuelos

Tutor
Leandro Morillas Romero

Grado en Fundamentos de la Arquitectura
Trabajo Fin de Grado - Diciembre 2017

RESUMEN

La construcción es uno de los sectores con mayor potencial de contribución al desarrollo sostenible. La construcción sostenible debe incluir las tres esferas de la sostenibilidad (medio ambiente, economía y sociedad) y los objetivos de proyecto (coste, plazo y calidad). Si bien la mayoría de cargas medioambientales se producen durante la fase de uso del edificio, cuanto más eficientes son, crece la importancia del resto de fases: fabricación, construcción, mantenimiento y fin de vida. El Análisis del Ciclo de Vida (LCA) es un proceso para la evaluación del impacto ambiental cuya aplicación en construcción es compleja debido, entre otros, a la singularidad de cada proyecto y la multitud de agentes y procesos involucrados. Este trabajo desarrolla un caso de estudio con un proceso iterativo en el que las decisiones se basan en criterios para la sostenibilidad. Con ayuda de un modelo de información del edificio (BIM) se realizan sucesivos LCA de propuestas en las que se reduce y cuantifica el impacto ambiental.

Palabras clave: Sostenibilidad, Análisis del Ciclo de Vida, Impacto Ambiental, Huella Ecológica, BIM.

ABSTRACT

The construction industry has one of the highest contribution potential to sustainable development. The sustainable construction must include the three levels of sustainability (environment, economy and society) and the project objectives (cost, time and quality). The majority of environmental impacts takes place during the use stage of a building. However, the more efficient a building is, the more important the other stages become: manufacturing, construction, maintenance and end of life. Life Cycle Assessment is a process to evaluate environmental impacts whose application in the construction industry is complex due to, among other reasons, the singularity of each project and the great number of processes and stakeholders involved. This work develops a case of study with an iterative method in which project decisions are based on sustainable criteria. By means of building information modelling (BIM), consecutive LCA are carried out to reduce and quantify environmental impacts.

Keywords: Sustainability, Life Cycle Assessment, Environmental Impact, Ecological Footprint, BIM.

ÍNDICE

RESUMEN / ABSTRACT	1
ÍNDICE	3
GLOSARIO	5
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	8
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. JUSTIFICACIÓN	9
1.2. ALCANCE Y OBJETIVOS	10
2. ESTADO DE LA CUESTIÓN	13
2.1. REPASO HISTÓRICO SOBRE LA SOSTENIBILIDAD	13
2.2. LA SOSTENIBILIDAD EN EL SECTOR AEC (ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN)	17
2.3. CÓMO MEDIR LA SOSTENIBILIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN	18
2.3.1. REVISIÓN DE SISTEMAS DE CERTIFICACIÓN, NORMAS Y ESTÁNDARES	20
3. METODOLOGÍA: ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	23
3.1. INTRODUCCIÓN	23
3.2. FASES DEL LCA	24
3.3. D.A.F.O. DEL ACTUAL LCA	24
3.4. INTEGRACIÓN DEL LCA EN BIM	25
3.5. INTRODUCCIÓN A TALLY	27
3.5.1. PROCESO Y LÍMITES DEL SISTEMA	28
3.5.2. METODOLOGIA DE CÁLCULO Y CATEGORIAS DE IMPACTO	29
4. CASO DE ESTUDIO	37
4.1. INTRODUCCIÓN AL PROYECTO	37
4.2. REPASO DE ARQUITECTURA DEPORTIVA RECIENTE	37
4.3. PROCESO DE TRABAJO	41
4.4. PROYECTO	42
4.4.1. ESTRUCTURA AÉREA	42
4.2.2. ELEMENTOS DE HORMIGÓN	48
4.2.3. ENVOLVENTE	49
5. RESULTADOS	57
5.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	57
5.2.1. ENERGÍA PRIMARIA DEMANDADA (PED)	58
5.2.2. POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (GWP)	59
5.2.3. POTENCIAL DE ACIDIFICACIÓN	60
5.2.4. POTENCIAL DE EUTROFIZACIÓN	61
5.2.5. POTENCIAL DE AGOTAMIENTO DEL OZONO (ODP)	62
5.2.6. POTENCIAL DE FORMACIÓN DE SMOG (SFP)	63
5.2. PROPUESTA DE PROYECTO	64
6. CONCLUSIONES	71
REFERENCIAS	73

GLOSARIO

- ▶ AP: Acidification Potencial; potencial de acidificación.
- ▶ EP: Eutrofization Potencial; potencial de eutrofización.
- ▶ GWP: Global Warming Potencial; potencial de calentamiento global.
- ▶ ISO: International Standard Organization; Organización Internacional de Normalización.
- ▶ Iteración: Acto de repetir un proceso con la intención de alcanzar una meta deseada, objetivo o resultado.
- ▶ LCA: Life Cycle Assessment; análisis del ciclo de vida.
- ▶ NRE: Non-renewable Energy; energía procedente de fuentes no renovables.
- ▶ ODP: Ozone Depletion Potencial; potencial de agotamiento de la capa de ozono.
- ▶ PED: Primary Energy Demanded; energía primaria demandada.
- ▶ RE: Renewable Energy; energía procedente de fuentes renovables.
- ▶ SFP: Smog Formation Potencial; potencial de formación de Smog.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

- ▶ Fig 1. Las tres escalas de la sostenibilidad.
- ▶ Fig 2. Posición de los países en 2011 respecto del Protocolo de Kioto. Fuente: portal de ingenieros españoles.
- ▶ Fig 3. Cartel de la Conferencia Río+20. Fuente: Instituto de la Juventud.
- ▶ Fig 4. Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030. Fuente: Organización de las Naciones Unidas.
- ▶ Fig 5. Las escalas de la sostenibilidad y los objetivos de proyecto.
- ▶ Fig 6. Temas fundamentales en las tres escalas de la sostenibilidad.

CAPÍTULO 3

- ▶ Fig 7. Esquema de un LCA. Fuente: certificadosenergeticos.
- ▶ Fig 8. Las dimensiones del BIM. Fuente: Iván Matias, consultor BIM, 2016.
- ▶ Fig 9. Fases del LCA. Fuente: Tally, 2016.
- ▶ Fig 10. Caracterización y clasificación de los impactos de materiales. Fuente: Tally, 2016.
- ▶ Fig 11. Esquema de formación y consecuencias de la acidificación. Fuente: Simonen, K., 2014.
- ▶ Fig 12. Esquema de formación y consecuencias de la eutrofización. Fuente: Simonen, K., 2014.
- ▶ Fig 13. Esquema de formación y consecuencias del calentamiento global. Fuente: Simonen, K., 2014.
- ▶ Fig 14. Esquema de formación y consecuencias del agotamiento de la capa de ozono. Fuente: Simonen, K., 2014.
- ▶ Fig 15. Esquema de formación y consecuencias de niebla tóxica (smog). Fuente: Simonen, K., 2014.
- ▶ Fig 16. Principales fuentes de energía primaria. Fuente: the Asian Age

CAPÍTULO 4

- ▶ Fig 18. Gimnasio en Vagney. Fuente: plataforma arquitectura, 2014.
- ▶ Fig 19. Campus nacional deportivo de La Defense. Fuente: plataforma arquitectura, 2015.
- ▶ Fig 20. Centro deportivo La Taule. Fuente: plataforma arquitectura, 2015.
- ▶ Fig 21. Centro deportivo Neumatt. Fuente: plataforma arquitectura, 2015.
- ▶ Fig 22. Frontón en Guipúzcoa. Fuente: plataforma arquitectura, 2016.
- ▶ Fig 23. Turnhalle Haiming. Fuente: plataforma arquitectura, 2016.
- ▶ Fig 24. Pabellón polideportivo y Aulario en la Universidad Francisco de Vitoria. Fuente: plataforma arquitectura, 2017.
- ▶ Fig 25. Comparativa de flujo de trabajo tradicional y con Tally. Fuente: Roderick, B., 2014.
- ▶ Fig 26. Elementos de la estructura aérea metálica.
- ▶ Fig 27. Elementos de la estructura aérea de madera.
- ▶ Fig 28. Gráfica de los impactos de los sistemas de cubierta.
- ▶ Fig 29. Comparativa de consumo de energía de dos sistemas con diferente vida útil.
- ▶ Fig 30. Comparativa de GWP durante el LCA del sistema Deck y el Sandwich.
- ▶ Fig 31. Gráfica de los impactos de los sistemas de cubierta.
- ▶ Fig 32. Comparativa de los impactos de los sistemas de fachada ventilada con panel exterior analizados.
- ▶ Fig 33. Gráfica resumen de los impactos de los distintos sistemas de envolvente.

CAPÍTULO 5

- ▶ Fig 34. Comparativa de PED.
- ▶ Fig 35. Proporción de energía procedente de fuentes renovables y no renovables.
- ▶ Fig 36. Comparativa de GWP.
- ▶ Fig 37. Comparativa de AP.
- ▶ Fig 38. Comparativa de EP.
- ▶ Fig 39. Comparativa de ODP.
- ▶ Fig 40. Comparativa de SFP.
- ▶ Fig 41. Imagen del espacio interior.
- ▶ Fig 42. Planta y alzados de la propuesta (E 1:200 aprox).
- ▶ Fig 43. Imagen exterior de la propuesta.
- ▶ Fig 44. Impactos según fases del ciclo de vida.
- ▶ Fig 45. Impactos según tipología de material.
- ▶ Fig 46. GWP y PED según tipología de material.
- ▶ Fig 47. Impactos según materiales.
- ▶ Fig 48. Impactos según sistema.
- ▶ Fig 49. Impactos según materiales de sistema.
- ▶ Fig 50. GWP y PED según materiales de sistema.

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 2

- ▶ Tabla 1. Sistemas de certificación de sostenibilidad.
- ▶ Tabla 2. Normas y estándares.

CAPÍTULO 3

- ▶ Tabla 3. Potencial de acidificación
- ▶ Tabla 4. Potencial de eutrofización.
- ▶ Tabla 5. Potencial de calentamiento global.
- ▶ Tabla 6. Potencial de agotamiento de la capa de ozono.
- ▶ Tabla 7. Potencial de formación de niebla tóxica (smog).
- ▶ Tabla 8. Energía primaria demandada.

CAPÍTULO 4

- ▶ Tabla 9. Descripción de los elementos de la estructura aérea metálica.
- ▶ Tabla 10. Descripción de los elementos de la estructura aérea de madera.
- ▶ Tabla 11. Comparativa de impactos ambientales de la estructura aérea.
- ▶ Tabla 12. Comparativa de impactos ambientales de los elementos de hormigón.
- ▶ Tabla 13. Sistemas de cubierta analizados.
- ▶ Tabla 14. Sistemas de fachada analizados.

CAPÍTULO 5

- ▶ Tabla 15. ODP de los sistemas de cubierta.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN

El sector de la construcción es un sector clave en las economías nacionales y un sector que no solo consume una cantidad notable de recursos sino que, además, crea el entorno construido. Es uno de los sectores que más oportunidades presenta para reducir el consumo energético global (Observatorio de la Sostenibilidad, 2014). Por otro lado, es un sector con enormes consecuencias sobre el medio ambiente, la economía y la sociedad. Según la UNEP (2002), si los actuales patrones no cambian, la expansión de la construcción destruirá o perturbará hábitats naturales y vida salvaje en más de un 70 % de la superficie de la tierra para 2032, principalmente por el incremento de la población, la actividad económica y la urbanización. En cuanto al aspecto económico, la construcción representa más del 11% del PIB mundial y se predice que será un 13,2% del PIB mundial en el 2020 (Valdivieso, R., 2016). Estos datos muestran que el sector de la construcción es uno de los sectores con mayor potencial de contribución al desarrollo sostenible.

El problema que surge es cómo aplicar un concepto tan abierto y complejo como la sostenibilidad en un sector donde prima la calidad, el coste y el plazo, además de los requisitos técnicos, del promotor y de cada contexto particular.

La complejidad de los proyectos de construcción radica en la amplitud de industrias y actores involucrados en su ciclo de vida. Dada esta complejidad, la gestión exitosa de los objetivos relacionados con la sostenibilidad requiere esfuerzos conjuntos de los agentes involucrados (clientes, contratistas, proveedores, público en general...). Sin embargo, estas partes interesadas a menudo tienen preocupaciones diferentes, incluso conflictivas, con respecto al logro de la sostenibilidad. Según Yuan, H. (2017) es importante conocer cómo los principales interesados perciben la sostenibilidad de un proyecto y cómo difieren sus preocupaciones en cada una de sus dimensiones: económica, ambiental y social. Según Maydl, P. (2014), los inversores normalmente se centran en objetivos económicos a corto plazo, aunque se observa un cambio en su punto de vista: los aspectos de la vida útil del servicio, como el mantenimiento, la limpieza y el consumo de energía, influyen en las decisiones de planificación y desarrollo de proyectos. Respecto los inversores y las tendencias actuales en la evaluación de las empresas públicas, se observa que la sostenibilidad económica y ambiental puede dar como resultado una ventaja adicional (económica) a largo plazo que puede evaluarse en dinero.

Por supuesto, como cualquier otra actividad económica, la construcción debe generar valor para todas las partes interesadas que intervienen en el proceso. Sin embargo el fenómeno constructivo se presta a una generación rápida de rendimientos para unos pocos agentes, por lo que resulta difícil erradicar el aspecto especulativo de esta actividad (Valdivieso, R., 2016). Se hace, por tanto, esencial examinar cómo percibe cada uno de los interesados la sostenibilidad del proyecto y hacer que ésta sea un objetivo principal y beneficioso para cada agente, de manera que todos los involucrados trabajen por conseguirla.

Para que una construcción pueda considerarse sostenible ésta debe ser apta no solo desde el punto de vista estructural, ambiental o económico, sino también desde el punto de vista funcional, estético, y adaptado a su entorno. En palabras de Richard Rogers (2000), "las ciudades deben responder a determinados objetivos sociales, medioambientales, culturales, políticos, físicos y económicos. Una ciudad sostenible debe ser justa, bella, creativa, ecológica, favorecedora de contactos personales, compacta y policéntrica y diversa".

Como se observa, el sector de la construcción tiene una relación muy estrecha con los tres aspectos de la sostenibilidad. El pensamiento holístico (del todo o considerar algo como un todo, en este caso la sostenibilidad dentro de un proyecto) e interdisciplinar, así como la reflexión de las consecuencias de las acciones tomadas respecto a las dimensiones ambiental, económica y social es el desafío a enfrentar. Es importante dar el paso de reconocer los aspectos económicos a largo plazo y la correlación de la economía y la ecología al principio de la planificación para lograr el éxito de la construcción sostenible.

La introducción del desarrollo sostenible en la construcción es un nuevo desafío que trata de conciliar las necesidades del hombre con la capacidad del planeta. Este trabajo se centra en la dimensión ambiental de la sostenibilidad como clave en un enfoque de construcción sostenible, pues se considera que es necesario el desarrollo de procedimientos que permitan determinar con precisión las consecuencias ambientales de la construcción para poder reducir la huella ecológica de los proyectos de construcción.

1.2. ALCANCE Y OBJETIVOS

Parece claro que el ritmo de los procesos que se emplean en la actividad humana en general y en la ingeniería en particular no puede sostenerse indefinidamente tal y como se viene haciendo hasta ahora. Este trabajo se centra en el caso concreto del sector de la construcción, un sector que como se ha visto tiene un gran potencial para mejorar la sostenibilidad global si se trabaja en mejorar la sostenibilidad de los proyectos en particular.

Como explican Rodríguez, F. y Fernández G. (2010), la construcción es una industria muy particular pues cada proyecto que se diseña y construye es singular, diferente a todos los demás, y esto complica el establecimiento de unos indicadores que sean válidos para todos los proyectos. Existen diferentes tipologías, actividades, actores, situaciones, emplazamientos y prestaciones distintas en cada proyecto. Ejemplificando esto, Bunn (2003) apunta que una solución eficiente en materia de energía en la edificación no producirá los resultados esperados a menos que sea apropiada para el clima en que se encuentre, esté completamente detallado, instalado y encargado correctamente y cuyo nivel de complejidad pueda ser comprendido por los administradores y usuarios del edificio.

La tendencia más extendida en el sector de la edificación es el empleo de herramientas o sistemas de indicadores de sostenibilidad para calificar el edificio con diferentes grados de sostenibilidad. Sin embargo, se hace necesario ir más allá, lograr la integración de los criterios de sostenibilidad desde el inicio del proyecto, ya que se ha identificado un vacío en la aplicación de estos criterios en las etapas tempranas. De acuerdo con esto, la organización CRISP, Construction and City Related Sustainability Indicators (2006) apoya que la toma de decisiones en las etapas previas (planificación y diseño) tiene mayor repercusión en el éxito de la sostenibilidad del proyecto. La aplicación de un modelo holístico, que contemple todo el ciclo de vida del proyecto desde el diseño y que permita el estudio y análisis de las distintas alternativas desde el prisma de las variables de sostenibilidad, podría ser el camino a seguir. Si la complejidad es inherente al concepto de sostenibilidad, entonces se hace necesario simplificar su aplicación a la construcción. De manera práctica, esto significa que se hace necesaria una herramienta que permita al constructor, arquitecto o ingeniero proyectista desarrollar su trabajo aplicando criterios de sostenibilidad.

Tras una búsqueda de herramientas existentes actualmente en el mercado que permitan la integración de la sostenibilidad como un criterio de proyecto, se presenta Tally, desarrollada para trabajar en Revit. Como caso práctico, se utiliza el proyecto de una nave deportiva como unidad de estudio para medir, analizar y comparar los impactos ambientales de los materiales que componen el edificio y, de esta manera, tomar decisiones de proyecto para reducir los impactos totales.

Objetivo principal:

- ▶ Llevar a cabo un caso práctico en el que se parte del proyecto de una nave deportiva para comprobar cómo se puede realizar la integración de criterios de sostenibilidad desde la etapa de diseño y la repercusión que tienen en el edificio terminado las decisiones tomadas en cuanto a la elección de los materiales.

Objetivos secundarios:

- ▶ Realizar un repaso de la literatura sobre sostenibilidad en general y del sector de la construcción en particular para observar datos y conclusiones, medidas tomadas y recomendaciones a seguir, así como para detectar posibles faltas.
- ▶ Proponer alternativas o mejoras al modo en que se gestiona la sostenibilidad en el sector de la construcción, en caso de que se encuentren problemas sin resolver o procedimientos que no funcionen adecuadamente.
- ▶ Investigar y exponer información sobre Tally, una herramienta que permite realizar análisis del ciclo de vida en proyectos dentro de Revit.
- ▶ Proponer el proceso de proyecto de un edificio utilizando esta herramienta tal y como se haría en caso de buscar la integración de la sostenibilidad ambiental dentro de los objetivos del proyecto (método de trabajo iterativo).
- ▶ Comparar variaciones del mismo proyecto para sacar conclusiones de su impacto ambiental.
- ▶ Realizar una propuesta de proyecto en base a los resultados obtenidos, ejecutar el análisis del ciclo de vida con Tally en Revit y analizar los resultados.
- ▶ Exponer los resultados de los análisis y que estos sean comprensibles, fiables y comparables entre sí para poder ser utilizados en la toma de decisiones en el proyecto durante las fases tempranas.

2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

2.1. REPASO HISTÓRICO SOBRE LA SOSTENIBILIDAD

En 1984 se reúne por primera vez la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo (World Commission on Environment and Development) llamado por la Asamblea General de las Naciones Unidas con el objetivo de establecer una agenda global que sienta las bases para construir un futuro más próspero, justo y seguro.

Como resultado, en 1987 se publica el informe "Nuestro Futuro Común" (Our Common Future), que más tarde pasaría a llamarse Informe Brundtland y en el cual se define por primera vez el desarrollo sostenible como "aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades", definición que se hizo mundialmente conocida. El informe plantea la posibilidad de obtener un crecimiento económico basado en políticas de sostenibilidad y expansión de la base de recursos ambientales. Se trata de un llamamiento urgente a los políticos para tomar decisiones que permitan asegurar los recursos para sustentar a ésta generación y a las siguientes y, así, garantizar el progreso humano sostenible y la supervivencia del hombre en el planeta. Todo esto debe llevarse a cabo mediante acciones políticas que aseguren el adecuado manejo de los recursos ambientales, pues ya se había llegado a la convicción de que los temas desarrollo y medio ambiente son inseparables. La Fig 1 muestra las tres escalas de la sostenibilidad; debe lograrse el equilibrio entre el desarrollo medioambiental, económico y social para conseguir un verdadero desarrollo sostenible.

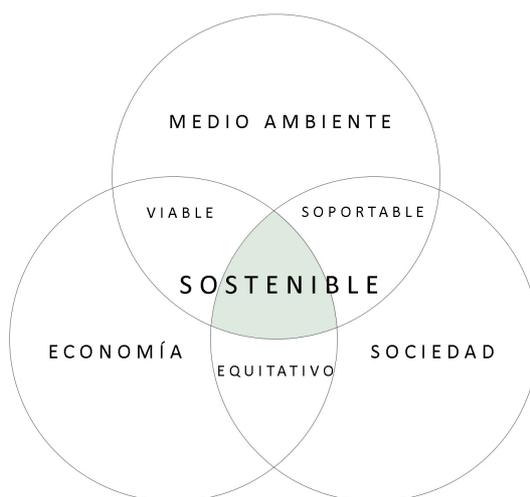


Fig 1. Las tres escalas de la sostenibilidad.

Años más tarde, en 1992 se celebra en Río de Janeiro una de las Cumbres de la Tierra organizada por la ONU en la que participaron 178 países (Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, CMNUCC) que culmina con un programa de acción para el siglo XXI, llamado Programa 21. Este programa enumera algunas de las 2.500 recomendaciones relativas a la aplicación de los principios de la Declaración. Tiene en cuenta las cuestiones relacionadas con la salud, la vivienda, la contaminación del aire, la desertificación, la gestión de los mares, bosques y montañas, de los recursos hídricos y el saneamiento, de la agricultura y de los residuos. Dentro del propio documento, la Agenda 21 propone que la herramienta para la aplicación práctica de la sostenibilidad sean los indicadores; que permitan la evaluación, control y monitorización de las tres dimensiones del desarrollo sostenible: medioambiental, social y económica: "los indicadores de desarrollo sostenible necesitan ser desarrollados para proporcionar bases sólidas en la toma de decisiones en todos los niveles y para contribuir a una sostenibilidad autoregulada del medio ambiente y de los sistemas de desarrollo" (United Nations, 1992).

La aprobación durante la Cumbre de la Convención sobre el Cambio Climático, que afirma la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, conduce a la firma en 1997 del Protocolo de Kyoto.

El protocolo de Kyoto es la manera de poner en práctica las recomendaciones de la Convención. Es un acuerdo internacional que compromete a los países industrializados a estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero. El objetivo es reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan calentamiento global. Establece metas vinculantes de reducción de las emisiones teniendo en cuenta que no todos los países tienen la misma responsabilidad, es decir, "responsabilidad común pero diferenciada". La Fig 2 muestra la posición en la que se encontraba cada país en 2011 respecto a este protocolo.

En 2002 se celebra en Johannesburgo otra Cumbre de la Tierra, de la que puede decirse que "quedó solo en palabras pero dio vida al Protocolo de Kyoto" (Fundación Proteger, 2002).

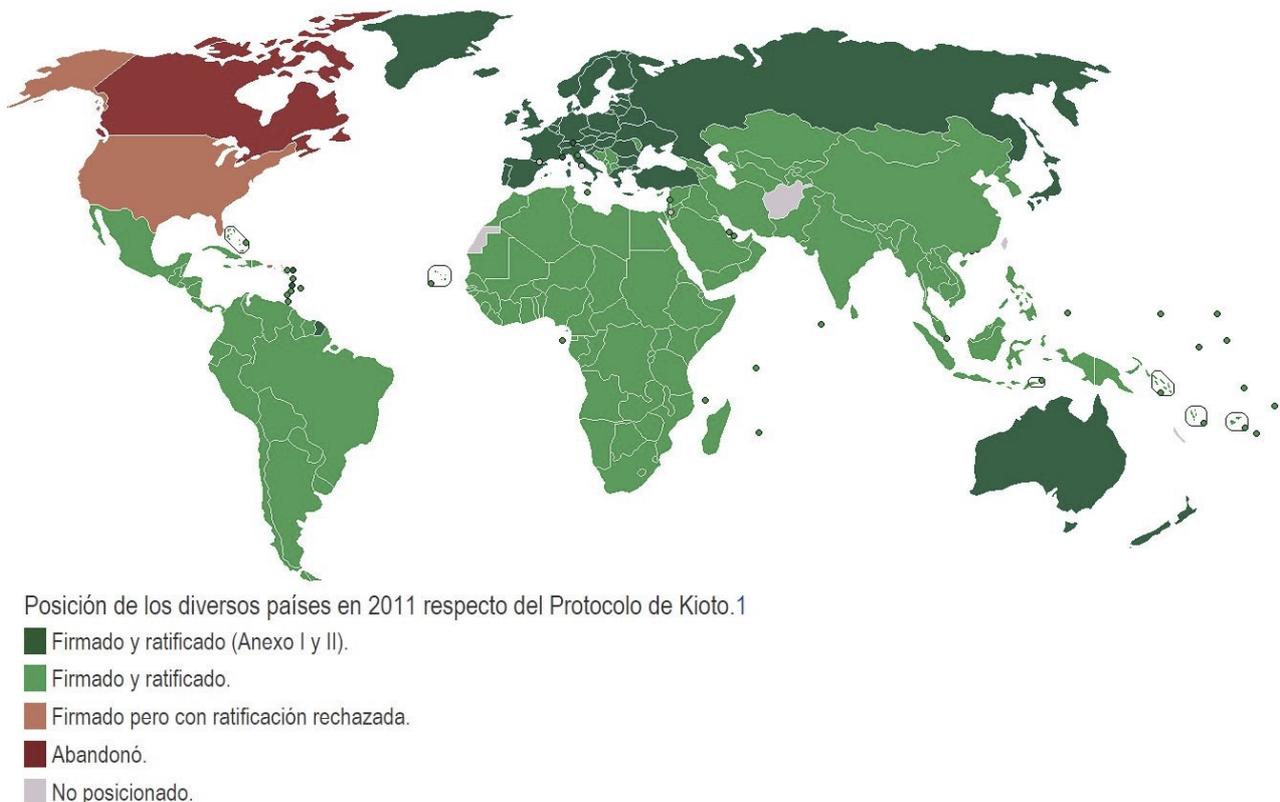


Fig 2. Posición de los países en 2011 respecto del Protocolo de Kioto. Fuente: portal de ingenieros españoles, 2011.

Diez años más tarde, en 2012, tiene lugar de nuevo en Río de Janeiro la Cumbre de la Tierra Río + 20, llamada oficialmente “Conferencia de Naciones Unidas sobre Desarrollo Sostenible” (Fig 3). En esta reunión, los Estados, la sociedad civil y los ciudadanos fueron llamados a “sentar las bases de un mundo de prosperidad, paz y sostenibilidad”, siguiendo dos ejes centrales:

- Una economía ecológica con vistas a la sostenibilidad y la erradicación de la pobreza.
- La creación de un marco institucional para el desarrollo sostenible.



Fig 3. Cartel de la Conferencia Río+20. Fuente: Instituto de la Juventud, 2012.

En el año 2015 se celebra la Conferencia de París, organizada por la CMNUCC y con 195 países participantes, con el objetivo de llegar a un acuerdo mundial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero: “mantener el aumento de la temperatura por debajo de los 2°C en 2100 y limitarla aún más, a 1,5°C, según los niveles anteriores a la época industrial”. La conferencia ha alcanzado su objetivo, logrando por primera vez un acuerdo universal sobre los métodos para reducir el cambio climático. Entra en vigor al año siguiente, 2016, al ser ratificado por más de 50 países, que representaban al menos el 55% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Para cada país que ratifique el Acuerdo habrá un mecanismo que lo forzará a cumplir los objetivos marcados. El acuerdo será aplicado a partir de 2020, fecha en la que termina el aplazamiento del protocolo de Kyoto firmado en la cumbre de Copenhague 2012.

En este mismo año 2015, la Asamblea General de la ONU adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, “un plan de acción a favor de las personas, el planeta y la prosperidad” (UN, 2015). La Agenda 2030 es el resultado del trabajo realizado desde la Declaración del Milenio, acordada por Jefes de Estado y de Gobierno reunidos en la sede la ONU en Nueva York en 2000. La Declaración del Milenio tiene una gran contribución en la concienciación, movilización y creación de políticas para luchar contra la pobreza, proponiendo tres prioridades que se refuerzan mutuamente:

- ▶ Crecimiento inteligente: desarrollo de una economía basada en el conocimiento y la innovación.
- ▶ Crecimiento sostenible: promoción de una economía que haga un uso más eficaz de los recursos, que sea más verde y competitiva.
- ▶ Crecimiento integrador: fomento de una economía con alto nivel de empleo que tenga cohesión social y territorial.

Estas prioridades muestran que el medio ambiente, la economía y la sociedad están estrechamente relacionadas y van de la mano en el objetivo de un desarrollo sostenible. Para el caso concreto del medio ambiente la Declaración del Milenio establece en uno de sus objetivos: “Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente”.

La Agenda 2030 plantea los 17 objetivos que aparecen en la Fig 4), elaborados en más de dos años de consultas públicas, interacción con la sociedad civil y negociaciones entre los países; con 169 metas de carácter integrado e indivisible que abarcan las esferas económica, social y ambiental. La nueva estrategia regirá los programas de desarrollo mundiales durante los próximos 15 años. Al adoptarla, los Estados se comprometen a movilizar los medios necesarios para su implementación mediante alianzas centradas especialmente en los más necesitados. La Agenda implica un compromiso común y universal, no obstante, el mismo texto dispone que "puesto que cada país enfrenta retos específicos en su búsqueda del desarrollo sostenible, los Estados tienen soberanía plena sobre su riqueza, recursos y actividad económica, y cada uno fijará sus propias metas nacionales, apegándose a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)."

Los Estados señalaron en la resolución estar "resueltos a poner fin a la pobreza y el hambre en todo el mundo de aquí a 2030, a combatir las desigualdades dentro de los países y entre ellos, a construir sociedades pacíficas, justas e inclusivas, a proteger los derechos humanos y promover la igualdad entre los géneros y el empoderamiento de las mujeres y las niñas, y a garantizar una protección duradera del planeta y sus recursos naturales."



Fig 4. Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030. Fuente: Organización de las Naciones Unidas, 2016.

Por su parte, en Europa, el desarrollo sostenible lleva tiempo siendo reconocido como una necesidad creciente por todos los sectores económicos. La Unión Europea ha otorgado importancia a este tema y, por ello, la Comisión Europea planea acciones concretas para los próximos años.

En cuanto a España, el Gobierno, con el objetivo de profundizar en la transformación del modelo productivo, entra en vigor en 2011 la Ley de Economía Sostenible (LES) cuya estrategia para una economía sostenible articula un amplio programa de reformas, entre cuyos objetivos principales se encuentran el incremento en la inversión en investigación, desarrollo e innovación (I+D+I) o el fomento de actividades relacionadas con energías limpias y el ahorro energético. Dentro de la Ley se establece la Estrategia para una Economía Sostenible, conformando un marco estratégico del sistema productivo más amplio a medio plazo, que pretende contar con la participación de toda la sociedad y contempla cambios estructurales en todos los sectores económicos. Algunos de los objetivos para el año 2020 son reducir un 20% las emisiones de gases de efecto invernadero respecto de los niveles de 1990, alcanzar un consumo del 20% de energías renovables sobre el total de consumo de energía o que al menos un 10% de consumo de energía en el sector transporte provenga de fuentes renovables.

2.2. LA SOSTENIBILIDAD EN EL SECTOR AEC (ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN)

Se estima que los edificios consumen entre el 20% y el 50% de los recursos físicos de su entorno. La actividad constructora es, dentro de las actividades industriales, la mayor consumidora recursos como madera, minerales, agua y energía. Se calcula que el 40% de arena, grava y piedra; 25% de madera y 16% de agua se extrae para su empleo en construcción (Alarcón, D.B., 2005).

En cuanto a energía, el sector de la edificación en los países desarrollados ha alcanzado cifras entre el 20% y el 40% del consumo energético total y ha superado los principales sectores, como son la industria y el transporte. (Valdivieso, R., 2016). Según datos del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, en la Unión Europea, el sector industrial supone aproximadamente un 24% del consumo total de energía; el del transporte un 33%; el sector residencial un 27%; el del sector servicios un 13%, y la agricultura un 3%.

Además, la construcción y el derribo de los edificios originan una gran cantidad de residuos. El 25% de los residuos de Europa son residuos de construcción y demolición (Alarcón, D.B., 2005). El reciclaje y la reutilización de estos residuos reduciría el impacto ambiental que tiene el vertido y la incineración de los mismos.

Se pueden identificar dos tipos de impactos que tiene toda actividad de construcción: consumo de recursos; y emisiones durante la producción, utilización y eliminación. Ambos impactos son peligrosos tanto para el ecosistema como para la economía y la sociedad.

El sector de la construcción es un sector clave en las economías nacionales y tiene una fuerte relación con los aspectos medioambientales, económicos y sociales, los tres pilares de la sostenibilidad. En 1994 aparece por primera vez el concepto de “Construcción Sostenible” aplicado fundamentalmente al sector de la edificación y, mínimamente, a la ingeniería civil. Comienzan a surgir así nuevos requisitos que relacionan la sostenibilidad con los objetivos específicos de los proyectos de construcción: coste, plazo y calidad (ver Fig 5). De aquí surge la necesidad de nuevas técnicas y herramientas de gestión que permitan una correcta toma de decisiones durante toda la vida útil del proyecto.

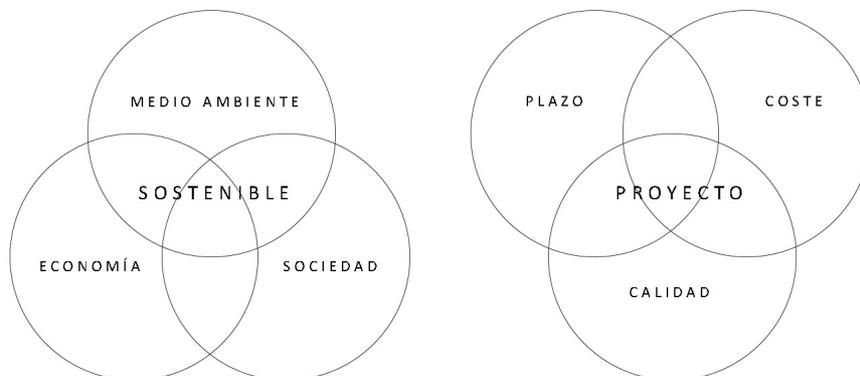


Fig 5. Las escalas de la sostenibilidad y los objetivos de proyecto.

En el campo de la edificación y desde la década de los años 90, se vienen desarrollando métodos de certificación y evaluación sostenible que, a día de hoy, están muy avanzados e implantados en el desarrollo de proyectos de obra nueva y rehabilitación. En el caso de los edificios, la mayor parte del consumo de energía se produce durante la fase de uso y mantenimiento, es decir, los edificios continúan siendo una causa directa de contaminación por las emisiones que se producen en los mismos y el impacto sobre el territorio, e indirecta por el consumo de energía y agua necesarios para su funcionamiento. Una de las conclusiones de la mayoría de estudios sobre las cargas medioambientales en las distintas fases de la vida de un edificio es que durante la fase de uso de un edificio estándar se produce entre el 60-90% del total de cargas medioambientales, principalmente contribuyendo al calentamiento global. Sin embargo, cuanto más se avanza en la reducción del consumo de energía en la fase de uso, crece la importancia relativa de las otras fases del ciclo de vida, por ejemplo las fases de fabricación, construcción o fin de vida (Buyle, M. et al, 2013).

En el caso de la construcción de estructuras e infraestructuras se observa que el mayor consumo energético tiene lugar en la fabricación de los productos de construcción. Esta fase incluye la extracción de materias primas y su manipulación para convertirlas en productos de construcción. En todo el proceso de fabricación hay unos impactos medioambientales importantes, con un contenido muy intensivo en energía. Tanto la extracción de los recursos minerales (canteras, minas, etc.) como su manufactura y la deposición de los residuos originados tienen unos costes ecológicos muy elevados. En el tema de la gestión de fin de vida de los materiales y productos se han realizado varios estudios. Un repaso a los mismos muestra los beneficios de reutilizar frente a reciclar (Buyle, M. et al, 2013). y se habla incluso del potencial de “diseñar para desmontar”.

Como se ha dicho, los avances de los últimos años en materia de ahorro energético se han centrado en mejorar la eficiencia energética de los edificios, sobre todo en la fase de uso y mantenimiento: edificios pasivos, diseñados y orientados siguiendo principios de ahorro de energía, envolventes especializadas, etc. En el campo de la construcción de estructuras e infraestructuras, en cambio, los métodos para la evaluación de la sostenibilidad están mucho menos desarrollados y los proyectos actuales basan su peso en el factor económico (Fernández, G. y Rodríguez-López, F., 2011).

En la mencionada Agenda 2030 se recogían una serie de objetivos, algunos de los cuales afectan directamente al sector AEC. Estos tienen un carácter integrador y global, como se muestra a continuación:

Objetivo 8: Promover un crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, logrando un empleo completo y productivo y un trabajo decente para todos.

Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover una industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación.

Objetivo 11: Construir ciudades y asentamientos humanos inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.

Objetivo 12: Asegurar un consumo y patrón de producción sostenibles.

Objetivo 13: Actuar urgentemente para combatir el cambio climático y sus impactos.

Objetivo 14: Conservar y hacer un uso sostenible de los océanos, mares y recursos marinos según un desarrollo sostenible.

Objetivo 17: Reforzar los medios de implementación y revitalizar una asociación global para el desarrollo sostenible.

2.3. CÓMO MEDIR LA SOSTENIBILIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN

Desde su aparición en la década de los 90, las herramientas o métodos para calificar la construcción sostenible se han enfocado básicamente a la certificación de edificios completos. Por otro lado, los proyectos de infraestructuras se han enfocado desde un “macro nivel”, rara vez llegando al nivel de las etapas de diseño y construcción que, como se ha dicho, son las que más impacto tienen en este tipo de proyectos.

Tras un repaso a los estudios llevados a cabo sobre el tema de la construcción de proyectos de estructuras e infraestructuras, (en nuestro caso podemos aplicar a proyectos de edificación en los que predomina la estructura, como pueden ser las naves) sus conclusiones muestran la importancia de:

- ▶ Considerar todas las fases del proyecto, desde la planificación y diseño (que es cuando más peso tienen las decisiones tomadas) a lo largo de toda la vida útil hasta su fin de vida, incluido.

- ▶ Mantener una colaboración interdisciplinar de todos los actores presentes en el proyecto: proyectistas, proveedores, promotores, constructores... creando un escenario en el que haciendo construcción sostenible todos ganen, de manera que no se interpongan otros intereses (p.ej. económicos) en la meta común.
- ▶ Dar especial importancia al entorno social, económico y medioambiental afectado.
- ▶ Desarrollar indicadores a nivel de proyecto (cualitativos o cuantitativos) con el objetivo de poder comparar materiales, procesos, etc. que no se presentan en las mismas unidades.

Así, se considera que una metodología orientada a lograr una construcción sostenible debería tener en cuenta y aplicar estos puntos. Por otro lado, hay que destacar que la singularidad de cada proyecto hace inviable el empleo de una metodología universal. Ha de partirse del objetivo específico y del ámbito de influencia directa de la estrategia en cada proyecto como criterios para la clasificación de los requerimientos, valorando también la repercusión de la estrategia o acción en los ámbitos de análisis.

Dentro de cada uno de los tres ámbitos que engloba la sostenibilidad (medio ambiente, economía y sociedad) se pueden clasificar una serie de temas fundamentales, como se muestra en la Fig 6.

Así pues, podemos entender por estructura sostenible aquella medioambientalmente responsable, rentable y saludable para las personas y el medio en el que se ubica.

En el presente trabajo nos centraremos en el ámbito del medio ambiente, teniendo en cuenta estos tres temas fundamentales:

- ▶ Territorio: requerimientos relacionados con la localización del desarrollo urbano, el uso y la ocupación de suelo, respetando el emplazamiento y entorno de lo construido.
- ▶ Biodiversidad: requerimientos que abordan la conservación o potenciación de hábitats y recursos naturales, planeamiento y gestión del ambiente natural.
- ▶ Calidad Ambiental: requerimientos para el control de todas las variables físicas y el confort ambiental, los productos empleados, fase de montaje, etc.

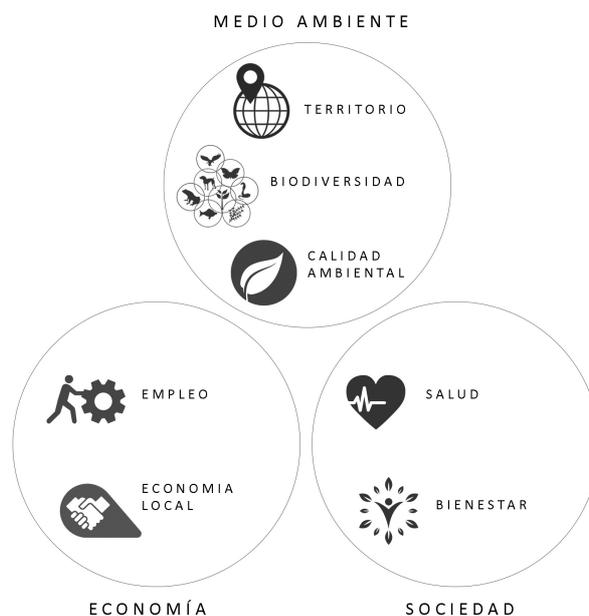


Fig 6. Temas fundamentales en las tres escalas de la sostenibilidad.

2.3.1. REVISIÓN DE SISTEMAS DE CERTIFICACIÓN, NORMAS Y ESTÁNDARES

A continuación se realiza una revisión de los sistemas de certificación, normas y estándares más extendidos cuya función es medir la sostenibilidad en edificios y/o en procesos industriales.

SISTEMAS DE CERTIFICACIÓN DE SOSTENIBILIDAD		
	Metodología	Clasificación
LEED  Leadership in Energy and Environmental Design Organización: USGBC (United States of Green Building Council) Fundación: 1993	Lista de control. Comités específicos creados para cada uno de los diferentes sistemas: Parcelas sostenibles, Eficiencia en agua, Energía y atmósfera, Materiales y recursos, calidad ambiental interior, Innovación en diseño, Prioridad regional.	Lista de verificación con 100 puntos básicos. Adicionalmente, plus de hasta 10 puntos en los créditos de Innovación en el diseño y Prioridad regional. En función del resultado, se otorga una clasificación al proyecto: Certificado, Plata, Oro o Platino.
SBTool  Sustainable Building Tool 2007 Organización: iiSBE (International Initiative for a Sustainable Built Environment) Fundación: 1998	Siete categorías de evaluación, cada una cubre una serie de criterios, que es calificado y ponderado: Regeneración y desarrollo del sitio, diseño urbano e infraestructura; Consumo de energía y recursos; Carga ambiental; Calidad ambiental interior; Calidad del servicio; Aspectos sociales, culturales y perceptivos; Costos y aspectos económicos. También tiene un protocolo para evaluar las características del sitio.	Puntuación aplicada a cada criterio basada en una comparación entre las características del edificio y una referencia nacional o regional aceptable. Los puntos se ponderan según las prioridades locales, se suman y se normalizan (del 1 al 10) obteniendo: Certificado, Bronce, Plata y Oro.
BREEAM En España: BREEAM ES  Building Research Establishment Environmental Assessment Method Organización: BRE (Building Research Establishment) del Reino Unido Fundación: 1990, el más antiguo	Lista de control con adaptación regional. Evalúa el diseño, la construcción y el uso. Incluye 10 categorías: Gestión, Salud y Bienestar, Energía, Transporte, Agua, Materiales, Residuos, Uso ecológico del suelo, Contaminación, e Innovación.	Se calcula la puntuación final y se envía el informe a BRE Global, que realiza una auditoría para verificar la calidad. En caso positivo, expide el Certificado para la fase en que se encuentre el desarrollo.

<p>CASBEE </p>	<p>Valoración de impactos utilizando el concepto de eco-eficiencia: Los parámetros de evaluación se organizan a partir de dos temas base: la Calidad ambiental interior del proyecto “Q” y la Carga ambiental al exterior.</p>	<p>La certificación se obtiene a partir del valor del indicador BEE final, resultado de la media ponderada de los indicadores BEE de cada categoría y la puntuación va de 1 a 5 estrellas.</p>
<p>Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency</p>		
<p>Organización: Institute for Building Environment and Energy Conservation-IBEC (Japón)</p>		
<p>Fundación: 2001</p>		
<p>GBCe </p>	<p>Los criterios a evaluar se estructuran en dos grandes grupos: los relacionados con la parcela y los asociados al edificio agrupados en distintas categorías: Energía y atmósfera, Recursos naturales, Calidad del ambiente interior, Calidad del servicio, Aspectos sociales y económicos.</p>	<p>Los resultados se expresan en base a la reducción de impacto ambiental del edificio comparado con uno de referencia. El peso asignado a cada impacto está relacionado con su importancia en la situación mundial en impactos globales y en la situación del entorno en impactos locales y regionales. La ponderación de los criterios e impactos asigna una puntuación final al edificio: 0 a 5 hojas VERDE</p>
<p>Green Building Council España</p>		
<p>Organización: WGBC (World Green Building Council)</p>		
<p>Fundación: 2009</p>		

Tabla 1. Sistemas de certificación de sostenibilidad.

NORMAS Y ESTÁNDARES		
	Función	Sector de la construcción
ISO  Organización Internacional de Normalización Fundación: 1947	Promover el desarrollo de normas internacionales de fabricación (productos y servicios), comercio y comunicación para todas las ramas industriales (excepto el electrónico y el electrotécnico) Buscar la estandarización de normas de productos y seguridad para las empresas u organizaciones.	ISO 14000, con dos vertientes: <ol style="list-style-type: none"> 1. Certificación del Sistema de Gestión Ambiental, mediante el cual las empresas reciben el certificado. 2. Sello Ambiental, mediante el cual son certificados los productos (Sello verde, DAP).
EN  CEN Comité Europeo de Normalización Fundación: 1961	Desarrollar los estándares europeos en varios sectores para mejorar el entorno del mercado único europeo para mercancías y servicios.	CEN/TC 350. Sostenibilidad en la construcción, que incluye: <ol style="list-style-type: none"> 1. Normas europeas relativas a la evaluación de la sostenibilidad de las obras de construcción. 2. Enfoque de ciclo de vida con los indicadores cuantificables. 3. Normas relacionadas con los materiales, teniendo en cuenta las políticas de la UE relacionadas con productos de construcción y edificación.

Tabla 2. Normas y estándares.

3. METODOLOGÍA: ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

3.1. INTRODUCCIÓN

Las primeras ideas y esquemas del Análisis del Ciclo de Vida (LCA) surgieron a finales de la década de los 60. Desde entonces el LCA ha atraído la atención de agentes en todas las esferas: política, industria, academia, etc. En 1997 el LCA es estandarizado por primera vez como un proceso para la gestión medioambiental por la norma ISO 14040 y, posteriormente, las normas ISO 14041-42-43, publicadas entre 1998 y 2000.

ISO 14040:2006 describe el LCA como la “recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida”. Esto incluye todas las etapas de los materiales: extracción, transformación, almacenaje, puesta en obra, recuperación, reutilización y desperdicio.

Con esta técnica que analiza los potenciales impactos medioambientales asociados a los productos o servicios se recopila un inventario de inputs (entradas) y outputs (salidas) relevantes. Los inputs pueden ser ingredientes o procesos como sustancias químicas, energía, trabajo, agua, etc: cualquier cosa que se incluya en el sistema. Los outputs son emisiones, humos, etc. Cada impacto es entonces medido de acuerdo a categorías de impacto ambiental potencial (calentamiento global, acidificación, eutrofización...) o de impacto en la salud de las personas. El objetivo del LCA es evaluar todos estos impactos, crear un inventario y ofrecer unos resultados que permitan observar e interpretar el peso de estos impactos en las distintas fases del proyecto de acuerdo a los objetivos del estudio. En otras palabras, el LCA analiza las cargas a lo largo de todo el ciclo de vida del edificio, cuantificando los impactos medioambientales que se han incorporado al edificio, tanto directamente como indirectamente a través de los materiales que lo constituyen. La Fig 7 muestra las entradas, salidas y procesos de un LCA.

El LCA puede hacerse desde dos tipos de enfoque: por atribución o por consecuencia. El LCA por atribución se enfoca a la descripción de los flujos medioambientales relevantes dentro de una ventana temporal escogida, mientras que el LCA por consecuencia se orienta a describir cómo los flujos medioambientales relevantes cambian en respuesta a distintas soluciones posibles, es decir, sería más apropiado para el tema de decisiones en el proyecto. Entender un edificio o un producto desde la perspectiva de todo su ciclo de vida es el primer paso en el desarrollo de edificios sostenibles y regenerables (Simonen, K., 2014).

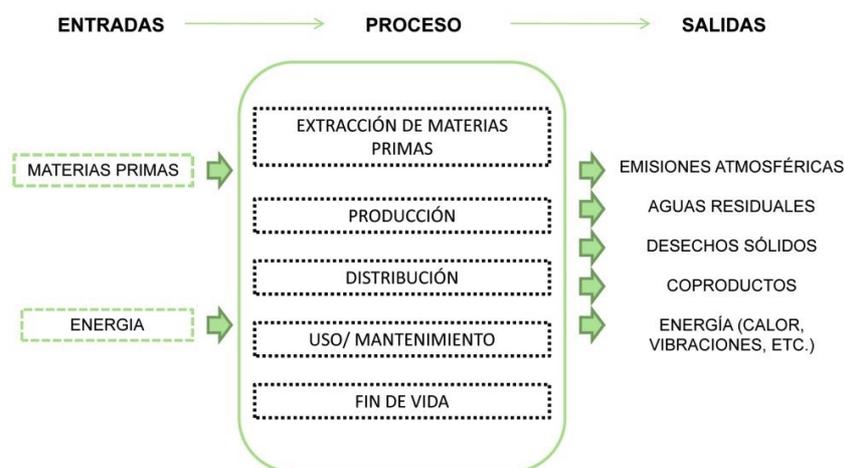


Fig 7. Esquema de un LCA. Fuente: certificadosenergeticos, 2016.

3.2. FASES DEL LCA

La serie de normas ISO 14040, establece cuatro fases en el estudio del ciclo de vida completo de productos y procesos para hacer posible su comparación con otros LCAs.

1. **Objetivo y alcance:** establecer el propósito, objetivos, unidades funcionales y límites del sistema. Una de las ventajas del LCA es que permite definir los productos a estudiar en base a su función en vez de basarse en sus características físicas. De esta manera, los productos que son inherentemente distintos pero que cumplen la misma función pueden ser comparados.
2. **Inventario del Ciclo de Vida (LCI):** consiste en recolectar, describir y verificar todos los datos de los entradas, procesos, emisiones, etc. que tengan relación con el ciclo de vida completo. Suele ser la fase más complicada, cara y extensa en tiempo.
3. **Análisis del Impacto del Ciclo de Vida (LCIA):** los impactos y recursos son cualificados en base al análisis de inventario. Este paso contiene tres partes obligatorias: selección de las categorías de impacto dependiendo de los parámetros de objetivo y alcance, asignación de los resultados del LCI a las categorías de impacto seleccionadas (clasificación) y cálculo de los indicadores de las categorías (caracterización). En la práctica, hay una lista de categorías comúnmente utilizadas, pero si las categorías existentes no son suficientes la ISO 14044 establece que se pueden definir nuevas categorías. El LCIA contiene además dos pasos opcionales: normalización y ponderación. La normalización es el cálculo de la magnitud de los resultados de los indicadores de categoría relativos a una información de referencia, por ejemplo, la media de impacto medioambiental de un ciudadano europeo en un año. La ponderación es el proceso de convertir los resultados de los indicadores de diferentes categorías de impacto en cuestiones más globales o simples puntos, mediante el empleo de factores matemáticos o elecciones de valor. En resumen, en esta fase el inventario de entradas y salidas es clasificado y agrupado en base a su contribución a las categorías de impacto establecidas.
4. **Interpretación de los resultados.**

3.3. DEBILIDADES, AMENAZAS, FORTALEZAS Y OPORTUNIDADES (D.A.F.O.) DEL ACTUAL LCA

Como hemos visto, los materiales de construcción consumen importantes cantidades de recursos naturales y energía durante su fabricación y utilización. La preocupación en los últimos años se ha centrado en reducir al máximo la energía que utilizan los edificios en su fase de uso y mantenimiento, pero pocos estudios han analizado profundamente el impacto ambiental que tienen las decisiones sobre la elección de los materiales. Mientras en los proyectos de arquitectura la eficiencia energética se vuelve más y más crucial y los códigos energéticos se vuelven más exigentes, los impactos ambientales que incorporan los materiales de construcción se convertirán en un factor que debe ser proactivamente calculado y bien entendido para reducir la cantidad de recursos consumidos por los edificios.

El LCA está ampliamente extendido y es utilizado en procesos industriales con el objetivo de evaluar el impacto medioambiental de productos y procesos. Sin embargo, los edificios son un tipo "especial" de producto y esto hace que el proceso mucho más complejo debido, entre otras cosas, a que la vida útil de un edificio es muy larga (se hace más complicado predecir variables o parámetros a lo largo del tiempo), la vida útil de alguno de sus componentes es más corta, se utilizan numerosos materiales y procesos distintos, el carácter de cada edificios único, las distancias a las fábricas y el transporte pueden variar mucho, etc. Además, la investigación del LCA tiene una naturaleza internacional, pero en el caso de los edificios su aplicación es necesariamente local y, por tanto, se aplica en combinación con las cadenas de producción locales. Esto da lugar a que se produzcan muchas variaciones según características locales y se hace más complicada la comparación del LCAs. Por ejemplo, un estudio de Ortiz-Rodríguez et al. (2010) muestra que la electricidad utilizada en la fase de construcción puede hacer variar los resultados significativamente. En

su estudio se comparan dos viviendas iguales situadas una en España y otra en Colombia, en las cuales el 20% del total de energía requerida es eléctrica. La producción de energía eléctrica difiere significativamente en los dos países. Las cargas medioambientales que tiene la producción de electricidad es dos veces mayor en España que en Colombia para la mayoría de las categorías de impacto. Como resultado, para el mismo proyecto los resultados variaban significativamente según la localización.

Esto muestra que el LCA convencional, que funciona correctamente aplicado a materiales y productos en la industria, no permite obtener resultados directamente comparables en el caso de la construcción, es necesario un marco de estudio más delimitado. Organizaciones internacionales como ISO y CEN están trabajando en una estandarización del LCA en el sector de la construcción con el objetivo de mejorar la comparación entre LCAs de edificios. El EN 15978:2011 dice que "el propósito de este estándar europeo es proporcionar reglas de cálculo para el análisis del comportamiento medioambiental de edificios nuevos y existentes". Estas reglas consisten en la descripción de equivalentes funcionales, límites del sistema, procedimientos a utilizar para el análisis de inventario, una lista de indicadores y procedimientos para el cálculo de las categorías de impacto, cómo reportar y comunicar los resultados, etc. Este marco es muy similar al de EPD (Producto con Declaración Ambiental certificada), que facilita y anima a la incorporación de resultados de informes externos. La mencionada regulación es parte de una lista más amplia de estándares, enfocados no solo al aspecto medioambiental sino también a los aspectos económicos y sociales, tanto a nivel del edificio completo como de los productos que lo integran.

En resumen, la aplicación del LCA a edificios completos es una manera de conocer los productos que conforman el edificio y ayudar en la toma de decisiones en cuando a la reducción de cargas medioambientales. Sin embargo, la metodología tradicional del LCA tiene limitaciones y los resultados deben ser utilizados e interpretados con cuidado. El LCA es un modelo que simplifica la realidad y, por tanto, se asumen suposiciones que generan incertidumbres en las distintas etapas. También cabe mencionar que el actual LCA dentro del sector de la construcción tiene un enfoque medioambiental aislado, sin tener en cuenta otros aspectos que tienen alto impacto en el caso de la construcción como requerimientos estéticos, de calidad, etc.

3.4. INTEGRACIÓN DEL LCA EN BIM

Los materiales y productos sostenibles han sido tradicionalmente evaluados en términos de características como distancia de transporte, contenido reciclado o materiales "bio", asumiéndose que es correlativo a un menor impacto medioambiental, ahora estamos viendo un giro gradual hacia una mayor transparencia en el uso de datos medioambientales, es decir, pasar de las autorizaciones ambientales a intentar medir, específicamente, el impacto ambiental. Pero el LCA es una técnica relativamente nueva para la mayoría de profesionales involucrados en el sector de la construcción, y se observa una falta de recursos, formación y herramientas para ayudar al uso e interpretación de los resultados.

Es cierto que en el pasado los LCA consumían mucho tiempo y coste, pero las nuevas técnicas simplificadas y automáticas están orientadas a facilitar estos aspectos, ayudando a que más profesionales incorporen el LCA en sus proyectos, sobre todo en las fases tempranas, de planificación y diseño, fases en las cuales pueden tener más influencia las decisiones tomadas. Un arquitecto necesita estos datos de impacto ambiental en el momento de la selección de materiales. Sin embargo, el proceso tradicional era tan largo y complicado que se hacía muy costoso realizarlo en ellas etapas tempranas. Los beneficios de utilizar una herramienta de LCA integrada incluyen mejoras en velocidad, sencillez, exactitud, colaboración y coste.

Por un lado, hemos visto el potencial del LCA, una metodología con más de 30 años pero que no siempre se ha aplicado en el sector de la construcción. Las limitaciones de su aplicación en este sector son debidas a la elevada cantidad de materiales, productos, agentes involucrados, fases, etc. de que constan los edificios, así como a su larga vida útil, influencia de su localización, etc.

Por otro lado, el Building Information Modelling (BIM) tiene un gran potencial para mejorar el flujo de información entre todos los agentes involucrados en un proyecto, ayudando en la toma de decisiones, la calidad, transparencia y colaboración en las tareas. Igualmente, permite la comprobación de datos en todo momento y en todas las fases, con lo que se reducen errores al ser más fácilmente localizables. En la actualidad no se está sacando el mayor rendimiento a las posibilidades de BIM en materia de sostenibilidad debido principalmente a la falta de interoperabilidad. La Fig 8 muestra una versión de las dimensiones del BIM (otras versiones llegan hasta 8, incluyendo estudios de Seguridad y Salud como la 8D). Como se ve, la sostenibilidad aparece en la 6D, como un análisis del edificio a posteriori.

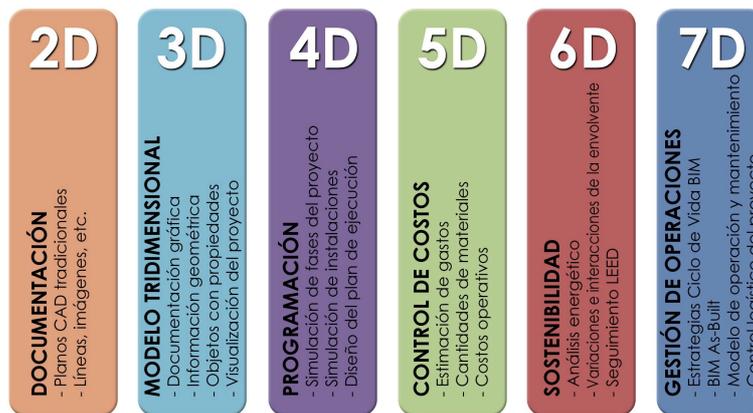


Fig 8. Las dimensiones del BIM. Fuente: Iván Matias, consultor BIM, 2016.

En los últimos años, varias empresas de software han trabajado en materia de integración del LCA en BIM, mostrando que es posible desarrollar herramientas que permitan realizar LCA de manera automática, integrada y dinámica en el proyecto mediante su aplicación a un modelo realizado en BIM. Esto permite la generación automática de datos y la obtención de feedback desde las primeras fases del proyecto, permitiendo a los usuarios obtener resultados de las decisiones tomadas desde fases tempranas, comparar opciones, realizar cambios, etc.

Esto requiere información actualizada y fidedigna de la industria y/o la investigación de manera que se consiga una base de datos o biblioteca donde se puedan comparar los diferentes materiales y sistemas, en función de su LCA (Maroto, P., 2014). Además debe conseguirse que esto sea un proceso sencillo, automatizado y con resultados interpretables por todos los agentes del proyecto.

Realizar un proyecto en BIM supone un proceso de prueba de opciones antes de que el diseño del edificio sea fijado, el cual incluye el estudio de los materiales, los ensamblajes y la evaluación de alternativas. BIM está pensado para facilitar la obtención de información, pero no alcanza el nivel de detalle de un LCA. Añadiendo LCA a un proceso de trabajo iterativo, el usuario de BIM es capaz de pasar de tomar decisiones ambientales "por regla general" a obtener análisis real de tantas opciones como desee.

Un repaso al software disponible en el mercado que permite integrar el LCA en BIM muestra distintas maneras de enfocar esta integración. Algunas de estas herramientas son:

- ▶ LCADesign: software desarrollado por la empresa australiana ECquate Pty Ltd. Extrae la información directamente del modelo BIM, utilizando IFC (Industry Foundation Classes), un formato de datos de especificación abierta, para compartir los datos.

- ▶ OpenDAP: proyecto a nivel europeo para generar una red de trabajo que armonice los datos de carácter ambiental. Esto incluye normativa común para el formato de los datos y una alta compatibilidad de los mismos. Entre sus objetivos está el ser “Integrado en BIM siguiendo estructuras de datos de IFC”.
- ▶ Tally: desarrollada por KT Innovations, permite a los usuarios de BIM definir las relaciones entre los elementos en BIM y los materiales de construcción desde la base de datos de Tally integrada en BIM. Esta relación es usada para cuantificar los impactos medioambientales dentro de varias categorías. La herramienta transforma los materiales BIM en materiales y cantidades reales y crea una lista de materiales empleados en el conjunto del edificio o una parte aislada, la cual se actualiza automáticamente cuando el modelo en BIM cambia. En el siguiente apartado se explica la herramienta en detalle.

3.5. INTRODUCCIÓN A TALLY

Tally es una herramienta que “permite a arquitectos e ingenieros que trabajan con Revit cuantificar el impacto medioambiental de los materiales del edificio mediante el análisis del edificio completo así como mediante la comparativa entre opciones de proyecto. Mientras se trabaja en el modelo de Revit, el usuario define relaciones entre elementos BIM y los materiales de construcción que los componen, que se encuentran dentro de la base de datos de Tally. El resultado es un LCA “a la carta”, con una amplia cantidad de información que puede ser utilizada para la toma de decisiones.

La tarea de cuantificar el impacto medioambiental que llevan asociados los materiales en un edificio requiere realizar un LCA, pero los resultados normalmente no están disponibles para los diseñadores, pues la mayoría se realizan una vez los componentes del edificio o incluso el edificio completo están construidos.

Motivados por el deseo de que Revit proporcione a sus usuarios información del impacto de los materiales durante todo su ciclo de vida desde el proceso de diseño, KT Innovations, una empresa afiliada a KieranTimberlake, comenzó a desarrollar Tally en 2008. En respuesta a las crecientes preocupaciones de la industria en cuanto a consideraciones del LCA, KT Innovations se asoció con Autodesk Sustainability Solutions y thinkstep (antiguo PE Internacional) para crear una herramienta comprensible y fácil de utilizar que permita obtener datos precisos del ciclo de vida durante la realización del proyecto.” (choosetally.com, 2017)

Así, la base de datos de Tally contiene información fidedigna proporcionada por thinkstep, una empresa que trabaja en el campo de la sostenibilidad, el LCA y la innovación desde hace más de 20 años. Esta base de datos contiene información de materiales, detalles de ensamblaje y especificaciones con datos de impacto medioambiental para su uso en ingeniería y arquitectura. thinkstep ofrece dos soluciones:

- ▶ GaBi para la información sobre sostenibilidad de los productos (LCI), el cual está ampliamente extendido y es utilizado en todo el mundo para aplicaciones industriales y científicas a través del software GaBi 6. Los datos que proporciona están cotejados, a su vez, con otras bases de datos de la industria y la ciencia.
- ▶ SoFi para la corporativa y de logística, es decir, distancias de transporte, medios de transporte, materiales o sistemas con sellado EPD, etc.

Beta testers de otras empresas de la industria involucrada y de organizaciones académicas proporcionan feedback sobre la funcionalidad de Tally y la facilidad de su uso en comparación con otros métodos de análisis. Además, la metodología de Tally concuerda con los estándares de las normas ISO 14040-14044.

Hay que mencionar que, por ahora, la información que proporciona la herramienta representa como área de estudio los Estados Unidos y como fecha el año 2013. Si algún dato no está disponible, se utilizan datos

de un representante, habiendo examinado que son tecnológicamente consistentes y fiables para su entrada en el proceso.

Existe un grado de incertidumbre, que puede radicar tanto en los datos utilizados como en la forma de aplicación de los mismos. La calidad de los datos obtenidos variará en función de la precisión de las entradas (medición, cálculo o estimación), totalidad de información de los elementos (p.ej. emisiones no reportadas), consistencia (grado de uniformidad de la metodología aplicada a un estudio) y representatividad (geográfica, temporal y tecnológica). Por tanto, queda una parte de responsabilidad al usuario de aplicar los materiales predefinidos de manera apropiada en el modelo de estudio.

La unidad funcional del estudio es el conjunto de elementos modelados en Revit. En el LCI se incluye la cantidad de material requerido para construir un edificio según el diseño, objetivos y alcance establecidos para el análisis, durante la vida útil que se defina para el edificio. Los resultados del LCA representan el análisis de un edificio único o el análisis comparativo de dos o más opciones de proyecto de edificios. El edificio individual puede representar los sistemas arquitectónicos, estructurales y de acabado completos de un edificio o subconjunto de esos sistemas, y se puede usar para comparar los impactos ambientales relativos asociados con los componentes del edificio o para un estudio comparativo con uno o más edificios de referencia. Las opciones de proyecto pueden representar una construcción completa en varias etapas del proceso de proyecto, o pueden representar múltiples esquemas de un edificio completo o parcial que se comparan entre sí a través de un rango de criterios de evaluación.

Una diferencia respecto a otras herramientas de análisis medioambiental que presentan los resultados en hojas de cálculo difíciles de manejar es que Tally presenta estos datos clasificados, agrupados y de manera gráfica. Así se obtienen informes comprensibles y personalizables, convirtiendo la información abstracta en información definida y precisa, mostrada tanto gráficamente como en una hoja de cálculo.

3.5.1. PROCESO Y LÍMITES DEL SISTEMA

Tally permite realizar un análisis completo de las fases del ciclo de vida “de la cuna a la tumba” y ofrece la posibilidad de incluir los impactos de la construcción y la energía empleada en el funcionamiento del edificio. Cada fase incluye extracciones y emisiones al medio natural. A continuación se muestran las partes del proceso que incluye Tally en el análisis y los límites en cada una de ellas.

- ▶ Materiales y montaje: todos los materiales necesarios para su uso o la fabricación de productos; incluyendo maquinaria, siliconas, adhesivos, revestimientos y acabados. Se incluyen todos los materiales que representan más del 1% de la masa total, a excepción de materiales que tienen un alto impacto medioambiental a niveles bajos, que se incluyen aunque su masa sea menor al 1%.
- ▶ Fabricación (EN 15804 A1-A3): incluye la extracción de materiales y su procesamiento, transporte intermedio, confección final y montaje. El alcance de la fabricación es detallado para cada entrada, especificando cualquier inclusión o exclusión que esté fuera del alcance establecido. La infraestructura (maquinaria y edificios) requerida para la fabricación y montaje no está incluida y se considera fuera del alcance de estudio.
- ▶ Transporte (EN 15804 A4): entre el fabricante y el emplazamiento del edificio, es incluido en el análisis como una fase diferenciada y puede ser modificada por el usuario. El transporte en la etapa de fin de vida de los productos está excluido de esta fase.
- ▶ Construcción (EN 15804 A4): calcula o anticipa la energía y agua consumidos durante la construcción del edificio (es opcional).
- ▶ Mantenimiento y sustitución (EN 15804 B2-B5): abarca la sustitución de los materiales de acuerdo a la vida útil establecida para cada producto. Incluye el tratamiento del fin de vida de los productos

a reemplazar (EN 15804 C2-C4), el transporte y la fabricación (de la cuna a la tumba) de los productos que los reemplazan.

- ▶ Energía de las operaciones de tratamiento (EN 15804 B6): se basa en la energía estimada que será consumida en el edificio durante su vida útil. Cada conjunto de datos asociado incluye los impactos relevantes asociados a la extracción de recursos energéticos, incluyendo refinamiento, combustión, transmisión, pérdidas y otros factores asociados (es opcional).
- ▶ Tratamiento de fin de vida (EN 15804 C2-C4): basado en la media de los métodos de tratamiento de desechos de construcción y demolición en Estados Unidos. Esto incluye índices de materiales en cuanto a su posible reciclaje, procedimientos requeridos a materiales reciclados, tasas de incineración o transporte a vertedero. Junto a los requerimientos del proceso, el reciclaje de materiales es modelado utilizando una estrategia de "evitar cargas", es decir, las cargas medioambientales de la producción del material primario son asignadas al posterior ciclo de vida en base a la cantidad de material secundario recuperado. La incineración de materiales incluye créditos para las tasas promedio de recuperación de energía. Para los impactos asociados con la eliminación en vertederos se tienen en cuenta las propiedades del material, como desperdicios plásticos, desperdicios biodegradables o materiales inertes. Otros escenarios de fin de vida pueden ser detallados para cada entrada en el programa.

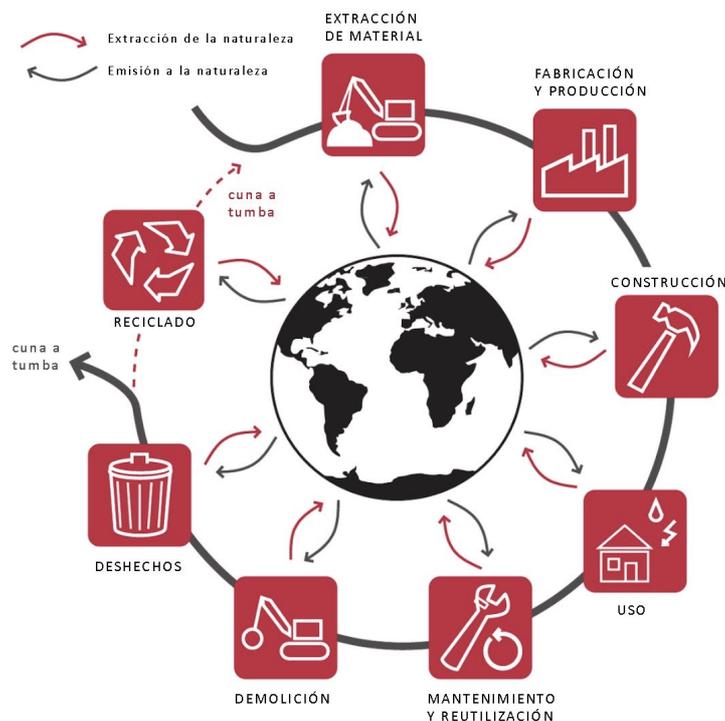


Fig 9. Fases del LCA. Fuente: Tally, 2016.

3.5.2. METODOLOGIA DE CÁLCULO Y CATEGORIAS DE IMPACTO

Para realizar el LCA de un edificio en Revit, la unidad funcional es el conjunto de elementos del modelo. En el caso de una comparación de opciones parcial de un edificio, la unidad funcional es el conjunto completo de sistemas de construcción que realiza una función dada.

El inventario es la cantidad de material requerido para producir un edificio o parte del mismo, y está diseñado de acuerdo con el objetivo y el alcance de la evaluación durante toda la vida útil del edificio. Si los impactos de la construcción se incluyen en la evaluación, el inventario también incluye la energía, el agua y

el combustible consumidos en el sitio de construcción durante la construcción. Si se incluye la energía operacional, el flujo de referencia incluye la energía eléctrica y térmica consumidas (como se ha dicho, estos dos últimos datos son opcionales y se incluyen manualmente para el emplazamiento del edificio). Debe tenerse especial cuidado en que los edificios de referencia o las opciones a comparar sean funcionalmente equivalentes en términos de alcance, tamaño y rendimiento relevante.

La vida útil del edificio tiene un valor predeterminado en la herramienta de 60 años pero puede ser modificado por el usuario.

Para comunicar los potenciales impactos ambientales de un producto o proceso, primero se extraen los datos brutos del LCI y se convierten en cifras más significativas mediante esquemas de caracterización, como TRACI, ReCiPe e IMPACT, que establecen factores de conversión entre las cantidades de recursos consumidos o emitidos y los indicadores de impacto ambiental. En el caso de productos químicos que contribuyen al calentamiento global, se calcula su equivalencia de CO₂ y así se pueden sumar (en términos de kg CO₂ eq). Por otro lado, algunas sustancias químicas contribuyen a múltiples categorías de impacto ambiental, en este caso se calcula la equivalencia para cada una de ellas. La Fig 10 muestra los pasos a seguir en el proceso de caracterización y clasificación de los impactos de los materiales.

Finalmente, los resultados del LCA se muestran en términos de demanda de energía primaria (dividida en energía renovable y no renovable) y cinco indicadores de potencial impacto ambiental según TRACI. Estos indicadores son establecidos por la EPA (Agencia de Protección del Medio Ambiente de EEUU).

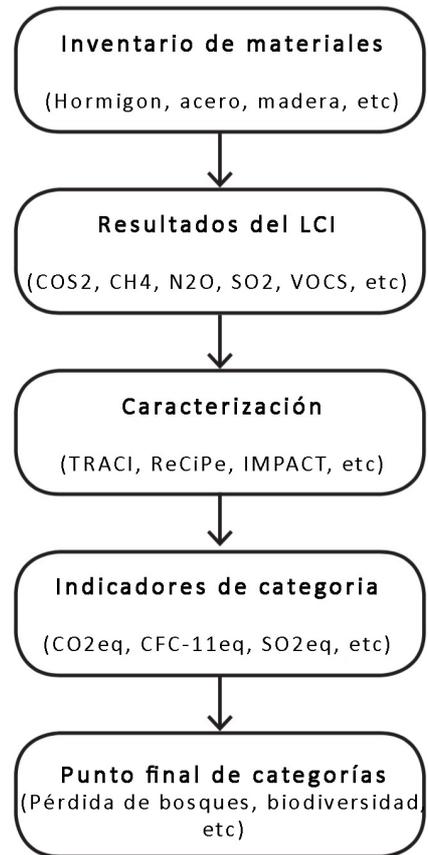


Fig 10. Caracterización y clasificación de los impactos de materiales.
Fuente: Tally, 2016.

TRACI (Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts) es, por tanto, una herramienta que proporciona factores de caracterización para la evaluación de impacto del ciclo de vida (LCIA), la ecología industrial y mediciones de sostenibilidad. Los factores de caracterización cuantifican los impactos potenciales que tienen los consumos y las emisiones en categorías de impacto específicas en unidades de equivalencia comunes. Las categorías de impacto que clasifica TRACI se explican a continuación y son:

- ▶ Potencial de acidificación.
- ▶ Potencial de eutrofización.
- ▶ Potencial de calentamiento global.
- ▶ Potencial de agotamiento de la capa de ozono.
- ▶ Potencial de formación de niebla tóxica (smog).

POTENCIAL DE ACIDIFICACIÓN	
Proceso de formación	<p>1 Azufre (S) y Nitrógeno (N) pasan al suelo y a la atmósfera a través de la lluvia ácida y residuos urbanos e industriales</p> <p>2 S y N filtran nutrientes (Calcio, Potasio, Magnesio) del suelo y el agua</p> <p>3 SUELO Los contaminantes pasan al ciclo de la comida. La lixiviación⁽¹⁾ de nutrientes hace que el suelo sea menos productivo, amenazando a la población de lombriz de tierra</p> <p>4 AGUA La eliminación de Calcio influye en la producción de cáscaras y huesos, lo que lleva a una disminución de la población de coral, peces y moluscos</p> <p><small>(1) Tratamiento de una sustancia compleja con un disolvente obteniendo la separación de sus partes solubles e insolubles.</small></p>
Qué es	Pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra, en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera. Este retorno se produce en forma de lluvia ácida, la precipitación de ácidos en la superficie con motivo de la emisión de gases contaminantes a la atmósfera.
Efectos	Mortalidad de peces, declive de bosques, deterioro de los materiales de construcción, efectos sobre el patrimonio histórico y cultural.
Unidad	kg SO ₂ eq
Fuentes principales	<p>Naturales: erupciones volcánicas, incendios naturales, relámpagos y diferentes procesos microbianos contribuyen al aporte de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno a la atmósfera.</p> <p>Antropogénicas: las más importantes son las emisiones de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno procedentes de la utilización de combustibles fósiles en actividades industriales y en el transporte. En Europa, más del 70% de las emisiones atmosféricas de SO₂ proceden de la combustión de carbón en las centrales eléctricas, y el 50% de las emisiones atmosféricas de NOx son generadas por vehículos de motor.</p>
Medidas de reducción	La UE está tomando medidas relativas a la reducción de emisiones de azufre, que incluyen reducir el contenido de azufre de los productos derivados del petróleo, disminuir las emisiones de las grandes plantas de combustión y fijar límites a la emisiones de los vehículos rodados.

Tabla 3. Potencial de acidificación

POTENCIAL DE EUTROFIZACIÓN	
Proceso de formación	<p>1 Los residuos urbanos, industriales y agrarios añaden un exceso de nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) al agua</p> <p>2 Este exceso de nutrientes causa picos en el crecimiento de vida vegetal (algas, bacterias, etc)</p> <p>3 La nueva población vegetal consume todo el oxígeno disponible creando zonas muertas (hipoxia) y causando la huida o muerte de otras especies</p>
Fig 12. Esquema de formación y consecuencias de la eutrofización. Fuente: Simonen, K., 2014	
Qué es	Aumento de niveles de macronutrientes, siendo los más importantes el nitrógeno (N) y el fósforo (P), que puede causar un cambio indeseable en la composición de las especies y la producción elevada de biomasa en los ecosistemas acuáticos y terrestres.
Efectos	Afecta sobre todo a ecosistemas acuáticos; el aumento de la producción de biomasa puede llevar a niveles deprimidos de oxígeno debido al consumo adicional de oxígeno en la descomposición de esta biomasa. El efecto de eutrofización aumenta en verano.
Unidad	kg N _{eq}
Fuentes principales	<p>Naturales: proceso que se va produciendo lentamente de forma natural en todos los lagos del mundo, porque todos van recibiendo nutrientes.</p> <p>Antropogénicas: vertidos urbanos, que llevan detergentes y desechos orgánicos; vertidos ganaderos y agrícolas, que aportan fertilizantes, desechos orgánicos y otros residuos ricos en fosfatos y nitratos.</p>
Medidas de reducción	<p>Disminuir la cantidad de fosfatos y nitratos en los vertidos, usando detergentes con baja proporción de fosfatos, empleando menor cantidad de detergentes, no abonando en exceso los campos, usando los desechos agrícolas y ganaderos como fertilizantes, en vez de verterlos, etc.</p> <p>Tratar las aguas residuales en EDAR que incluyan tratamientos biológicos y químicos que eliminan el fósforo y el nitrógeno.</p> <p>Cambiar las prácticas de cultivo a otras menos contaminantes.</p> <p>Reducir las emisiones de NOx y amoníaco.</p>

Tabla 4. Potencial de eutrofización.

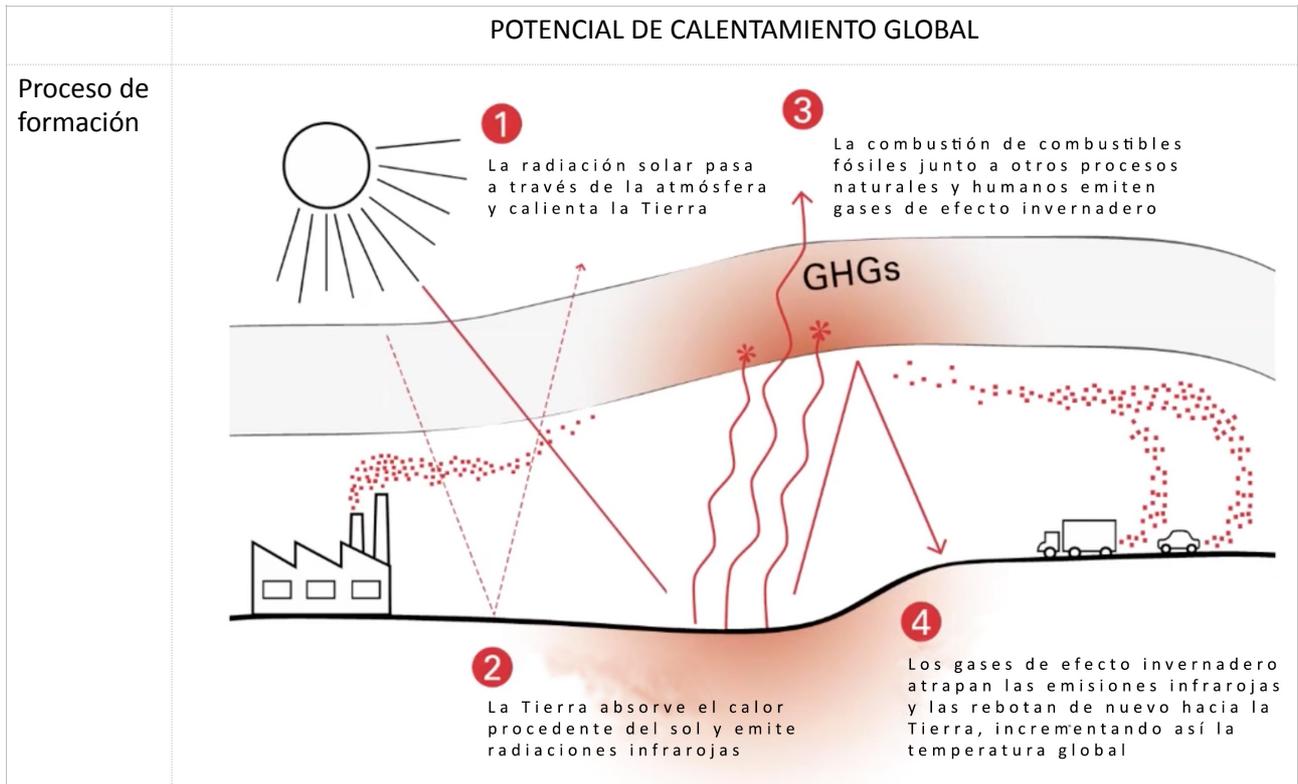


Fig 13. Esquema de formación y consecuencias del calentamiento global. Fuente: Simonen, K., 2014

Qué es	Emisiones de gases de efecto invernadero, como el CO ₂ y el metano, que causan un aumento en la absorción de la radiación emitida por la tierra, aumentando el efecto invernadero natural y elevando la temperatura del plan
Efectos	Impactos adversos sobre la salud del ecosistema, la salud humana y el bienestar material.
Unidad	kg CO ₂ eq
Fuentes principales	<p>Naturales: el efecto invernadero es un proceso natural y siempre ha habido gases invernadero, pero la cantidad de los mismos en la atmósfera se ha disparado desde la Revolución industrial.</p> <p>Antropogénicas: gases como el metano producidos por prácticas de agricultura; otros como el CO₂ por la quema de combustibles fósiles, como el petróleo y el gas. La producción de electricidad es responsable del 70% de las emisiones de dióxido de azufre en estados unidos, del 13% de la las emisiones de oxido nitroso y del 40% de la emisiones de dióxido de carbono, según la EPA.</p> <p>La segunda causa que libera CO₂ es la deforestación, según la Universidad de Duke.</p> <p>La industria de la construcción produce el 33% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (Pearce, Ahn y HammiGlobal, 2012)</p>
Medidas de reducción	La reforestación y otras buenas prácticas del uso de la tierra contrarrestan ligeramente las emisiones de gases invernadero, pero los bosques no pueden retener todo el CO ₂ que emite la quema de combustibles fósiles. Se debe reducir, por tanto, la quema de combustibles fósiles y reemplazar esta fuente de energía por otras renovables: eólica, geotérmica, etc.

Tabla 5. Potencial de calentamiento global.

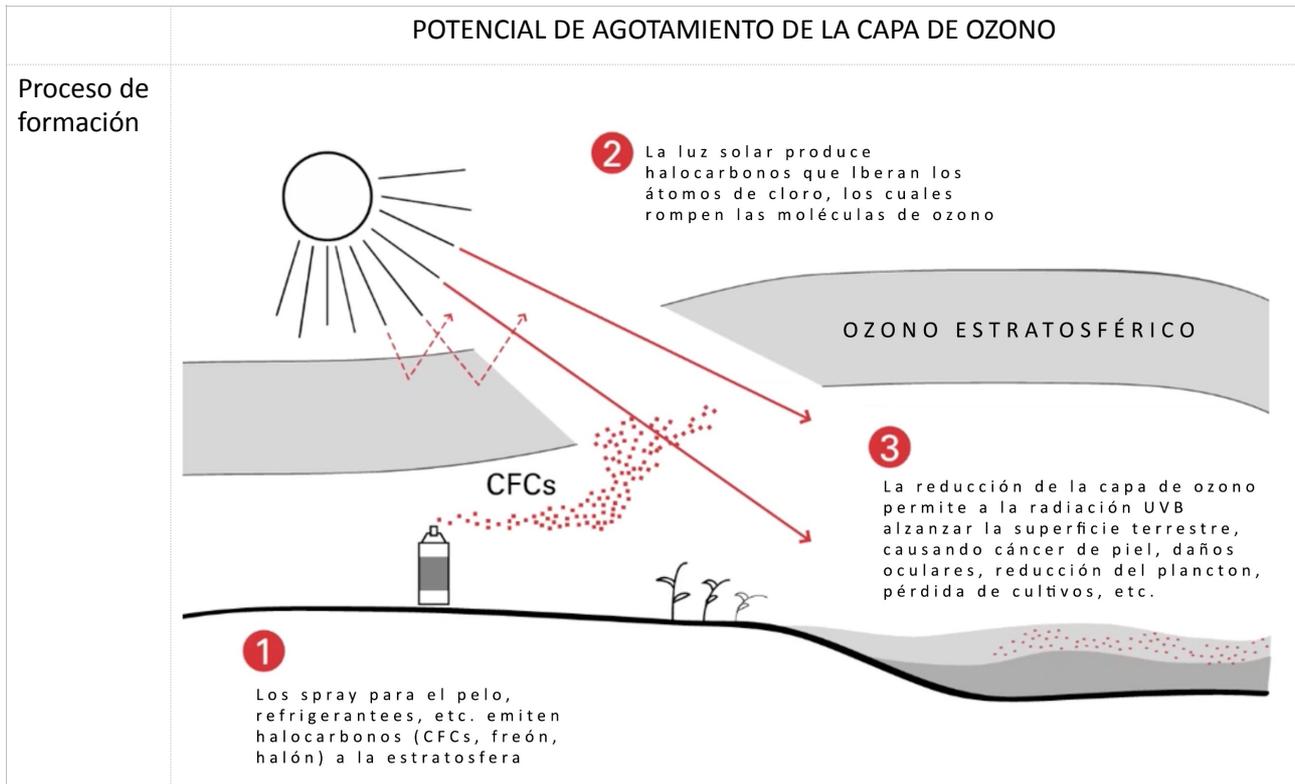


Fig 14. Esquema de formación y consecuencias del agotamiento de la capa de ozono.
Fuente: Simonen, K., 2014

Qué es	Medida de las emisiones al aire que contribuyen al agotamiento de la capa de ozono estratosférico. Se refiere a la cantidad de destrucción de ozono estratosférico causado por una sustancia. La destrucción del ozono conduce a niveles más altos de rayos ultravioleta (UVB) que alcanzan la superficie de la tierra.
Efectos	Efectos perjudiciales sobre todos los organismos vivos: cáncer de piel, reducción de la inmunidad del cuerpo a la enfermedad, trastornos oculares; los rayos UV son particularmente nocivos para los vegetales y el plancton, que es la base de la cadena alimenticia del océano; daños en algunos cultivos como el arroz; daños en los polímeros utilizados en la pintura, la ropa y otros materiales.
Unidad	kg CFC-11 _{eq} Es la razón entre el impacto sobre el ozono causado por una sustancia determinada y el impacto causado por una masa similar de CFC-11 (el potencial de agotamiento del CFC-11 está definido como 1). Por ejemplo, el potencial de una sustancia cuyo valor es 10 significa que su impacto sobre el ozono es diez veces mayor que el del CFC-11. Los valores de los potenciales de cada sustancia vienen especificados en los anexos del Protocolo de Montreal.
Fuentes principales	Antropogénicas: según el Protocolo de Montreal, las sustancias más perjudiciales son sustancias químicas clorinadas, brominadas o fluorinadas. Su capacidad de destrucción puede superar 100 años. Los principales tipos: CFCs, HCFCs, Halones y Bromuro de metilo.
Medidas de reducción	Utilizar sustancias alternativas a las mencionadas, como hidrofluorocarbonos (alternativas a los CFC y los HCFC, no agotan la capa de ozono, pero presentan un alto potencial de calentamiento global) o hidrocarburos (no agotan la capa de ozono y su potencial de calentamiento global es mínimo, pero algunos de ellos son inflamables por lo que su utilización está sujeta a la aplicación de medidas de seguridad y minimización de riesgos).

Tabla 6. Potencial de agotamiento de la capa de ozono.

POTENCIAL DE FORMACIÓN DE NIEBLA TÓXICA (SMOG)	
Proceso de formación	<p>2 La luz solar reacciona con las emisiones creando ozono y partículas en suspensión (niebla tóxica o smog) a nivel de suelo</p> <p>4 Las colinas y montañas atrapan el aire fresco y los contaminantes, agravando los efectos</p> <p>CAPA CALIENTE DE INVERSIÓN</p> <p>+ SOL</p> <p>AIRE FRESCO</p> <p>1 Las emisiones procedentes de la industria y el transporte (VOCs, NOx) llegan a la atmósfera</p> <p>3 La exposición a esta niebla tóxica causa problemas respiratorios, defectos de nacimiento y disminución de la capacidad inmune</p>
	<p>Fig 15. Esquema de formación y consecuencias de niebla tóxica (smog). Fuente: Simonen, K., 2014</p>
Qué es	<p>El término smog proviene de la unión de las palabras smoke (humo) y fog (niebla) Varias reacciones químicas, que ocurren entre óxidos de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles (VOC) en la luz solar provocan la creación de ozono a nivel del suelo. Existen dos tipos de smog: el sulfuroso (resultado de la descomposición en la atmósfera de los gases de azufre en presencia de niebla) y el fotoquímico (originado al interaccionar la luz solar con los óxidos de nitrógeno).</p>
Efectos	<p>Los efectos en la salud humana más peligrosos son los problemas respiratorios, pues las partículas producidas por el aire son lo suficientemente pequeñas para ser aspiradas, incluso algunas partículas finísimas pueden penetrar profundamente en los pulmones e interferir en el funcionamiento del sistema respiratorio. Los impactos ecológicos incluyen daños a varios ecosistemas y cultivos.</p>
Unidad	<p>kg O₃ eq</p>
Fuentes principales	<p>Antropogénicas: vehículos de motor, servicios de energía eléctrica, instalaciones industriales.</p>
Medidas de reducción	<p>La mayoría se centran en el sector del transporte: reducir el uso del vehículo privado y/o usar motores con tecnologías poco contaminantes, sustituir los combustibles actuales por combustibles menos contaminantes. Otras: imponer medidas de regulación y control sobre las emisiones de contaminantes a la atmósfera durante los procesos de combustión en la industria.</p>

Tabla 7. Potencial de formación de niebla tóxica (smog).

ENERGÍA PRIMARIA DEMANDADA	
<p>Fig 16. Principales fuentes de energía primaria. Fuente: the Asian Age</p>	
Qué es	Cantidad total de energía primaria extraída de la tierra empleada en cualquier fase del LCA.
Unidad	MJ
Fuentes	Recursos no renovables: petróleo, gas natural, etc. Recursos renovables: energía hidroeléctrica, eólica, solar, etc.
<p>La industria de la construcción consume más del 30% de la energía en los países de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE)</p>	

Tabla 8. Energía primaria demandada.

4. CASO DE ESTUDIO

4.1. INTRODUCCIÓN AL PROYECTO

El caso de estudio de este trabajo es un edificio deportivo en el que se observan criterios y parámetros de sostenibilidad como base de las decisiones en el proyecto arquitectónico. El objeto de este caso de estudio es comprobar cómo se puede realizar la integración de criterios de sostenibilidad desde la etapa de diseño y la repercusión que tienen en el edificio terminado las decisiones tomadas en cuanto a la elección de los materiales.

El proyecto a realizar consiste en un edificio con cubierta ligera para cubrir un espacio deportivo situado en Santander (Cantabria). Las dimensiones del espacio a cubrir son 20 m x 25 m, (500 m²) y la altura total exterior es de 6.50 m. Los elementos que intervienen en el proyecto son la estructura, la cimentación y la envolvente.

Partiendo de referentes de arquitectura deportiva recientes, se plantea un proceso iterativo con el fin de reducir los potenciales impactos de cada uno de los elementos del edificio. En este proceso se comparan distintas propuestas de sistemas estructurales y materiales, cada sistema por separado y a continuación el edificio en su conjunto. Con esto se pretende comprobar que la toma de decisiones en las fases tempranas de un proyecto tiene una repercusión positiva en la reducción de impactos ambientales y consumo energético del edificio.

4.2. REPASO DE ARQUITECTURA DEPORTIVA RECIENTE

El análisis comparativo que plantea el caso de estudio se enfoca en el sistema estructural, es decir, utilizar la herramienta para comprobar qué material de los planteados es más sostenible con el medio ambiente al emplearse en el sistema estructural propuesto, en la localización establecida y cumpliendo las mismas características en cuanto a seguridad estructural, prestaciones y confort.

La envolvente de un edificio influye de manera muy significativa en la sostenibilidad del mismo. Por lo tanto, aunque el estudio se centre en la estructura, se realiza un repaso previo a la arquitectura deportiva de la última década. Este repaso permite comprobar los materiales más utilizados en la envolvente de edificios que guardan relación con el caso de estudio (estructuras de grandes luces y destinados a actividades deportivas). Una muestra de los mismos puede verse a continuación.



Fig 18. Gimnasio en Vagney. Fuente: plataforma arquitectura, 2014.

Gimnasio en Vagney / Abc Studio Architects + Christian Vincent Architect / Vagney, Francia / Año 2014

- Renovación y ampliación de un gimnasio situado en una zona montañosa. Presenta un volumen realizado en hormigón y una nave con estructura metálica. Los materiales utilizados en el exterior son hormigón y madera mientras que para el interior se utilizan el fibrocemento y la madera.



Fig 19. Campus nacional deportivo de La Defense. Fuente: plataforma arquitectura, 2015.

Campus nacional deportivo de La Defense / Barthélémy & Griño / Fontaineblau, Francia/ Año 2015

- Estructura metálica, cubierta ligera de chapa metálica y una fachada que mezcla el vidrio y la madera, tanto en el exterior como en el interior.

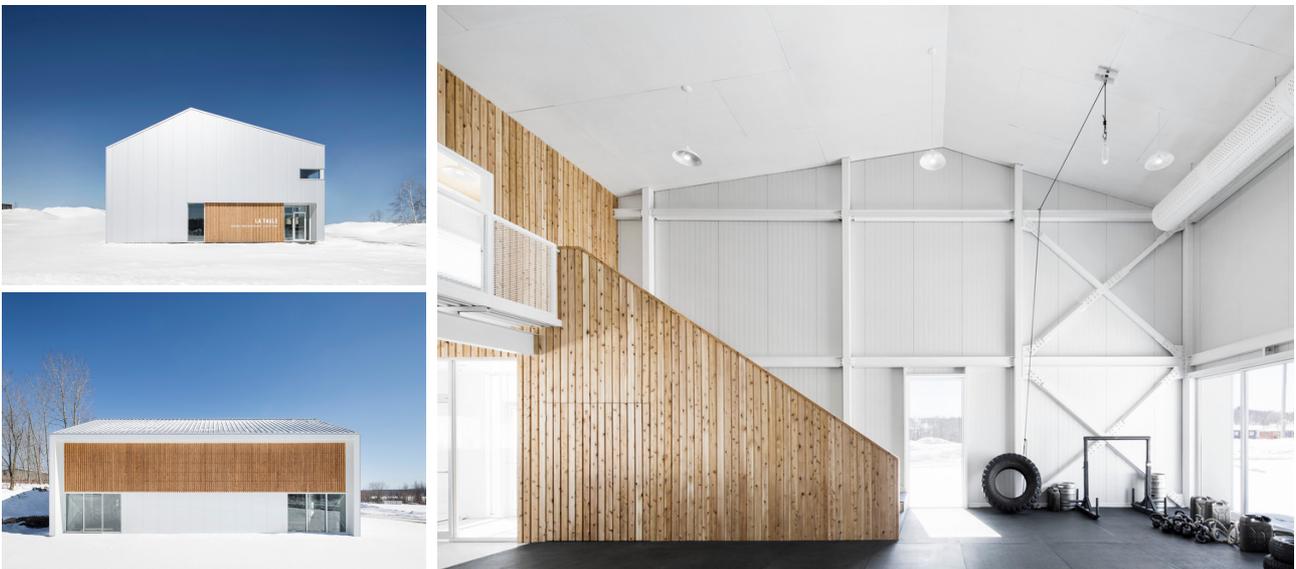


Fig 20. Centro deportivo La Taule. Fuente: plataforma arquitectura, 2015.

Centro deportivo La Taule / Architecture Microclimat / Waterloo, Canadá / Año 2015

- Estructura metálica, cubierta ligera de chapa metálica y una fachada que cambia según la orientación, haciéndose más o menos permeable a la luz. Los materiales que combina son paneles de chapa metálica pintados en blanco, paneles de madera y vidrio. La madera también tiene presencia en el interior, así como la chapa que se deja vista, al igual que la estructura vertical, en casi la totalidad del espacio.



Fig 21. Centro deportivo Neumatt. Fuente: plataforma arquitectura, 2015.

Centro deportivo Neumatt / Evolution Design / Stengelbach, Suiza / Año 2015

- Estructura metálica y cubierta ligera. La fachada opaca en planta baja, a excepción de las entradas, es realizada con paneles composite con motivos deportivos al exterior y hormigón ligero en el interior. La parte superior acristalada permite el paso de la luz.



Fig 22. Frontón en Guipúzcoa. Fuente: plataforma arquitectura, 2016.

Frontón / Vaumm / Gispúzcoa, España / Año 2016

- El edificio presenta una geometría facetada, con distintos planos y materiales que hacen que su imagen cambie en cada punto de vista. Además del hormigón de su fachada, tiene mucho protagonismo la cubierta fragmentada que se cierra con una lamina de zinc, excepto en uno de los planos en el que la colocación de policarbonato celular permite el paso de la luz. Este mismo material se utiliza también en algunas partes de la fachada.



Fig 23. Turnhalle Haiming. Fuente: plataforma arquitectura, 2016.

Turnhalle Haiming / Almannai Fischer Architects+Harald Fuchshuber Engineer / Haiming, Austria / Año 2016

- Este espacio tenía como requisito de proyecto mantener unos costes mínimos. Esto llevó a explorar un tipo de construcción en madera no utilizado normalmente en edificios públicos: un entramado de clavos con placas dentadas para conectar las vigas de madera, una estructura barata y sencilla de producir, típicamente usada en edificios industriales prefabricados. La envolvente exterior sigue el mismo criterio, con un uso extensivo de paneles prefabricados con acabado en madera y paneles de policarbonato en la fachada norte que permiten el paso de luz difusa. En el interior también se utiliza la madera con distintos sistemas y acabados: mostrando u ocultando partes de la estructura.

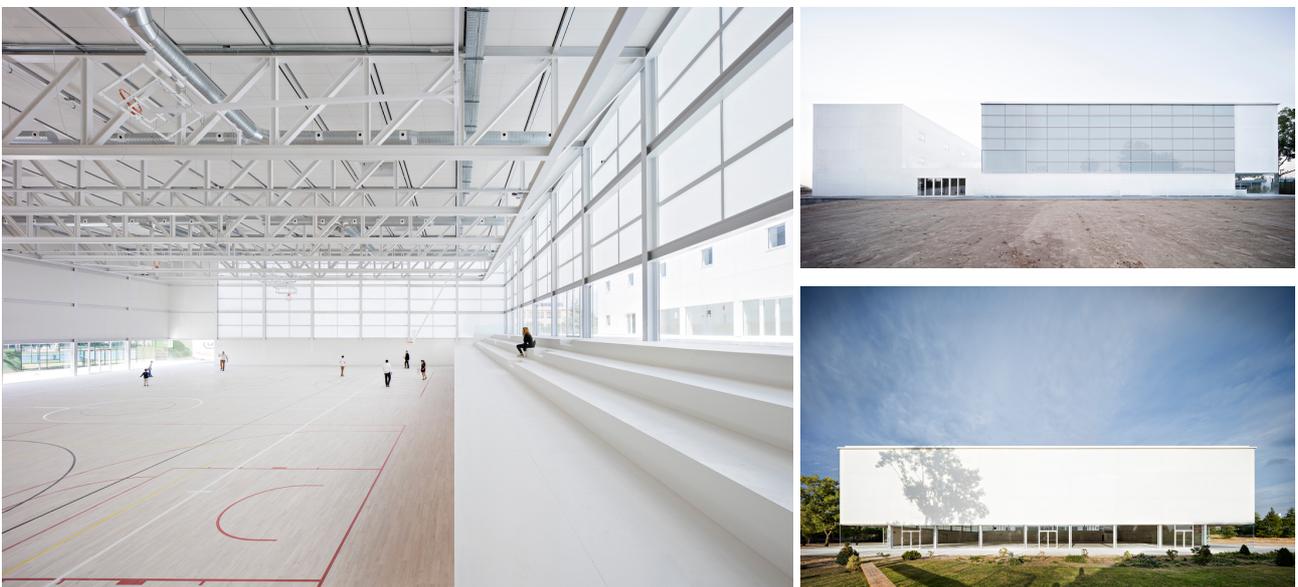


Fig 24. Pabellón polideportivo y Aulario Univ. Francisco de Vitoria. Fuente: plataforma arquitectura, 2017.

Pabellón polideportivo y Aulario Univ. Francisco de Vitoria / A. Campo Baeza / Madrid, España / Año 2017

- El programa se organiza en dos cajas limpias que se relacionan por un cuerpo bajo cuya cubierta se establece como patio exterior. El pabellón polideportivo presenta una estructura metálica de pilares esbeltos y cerchas, y una envolvente vertical de vidrio traslúcido y panel de hormigón aligerado GRC. Las fachadas sur, más expuestas a la luz solar, se cierran con el panel GRC, mientras que las al norte se resuelven en vidrio traslúcido. También aparece en vidrio transparente en aquellas zonas que se busca una relación visual con otras partes del conjunto.

De esta muestra se extraen las siguientes conclusiones:

- ▶ Las envolventes presentan paños opacos y paños acristalados, distribuidos de manera óptima en función de las actividades que se vayan a realizar, la distribución del público en caso de que hubiera, la orientación del edificio (evitar deslumbramientos, buscar luz difusa...), etc.
- ▶ Los sistemas utilizados en cubierta son ligeros y presentan aislamiento térmico.
- ▶ Los materiales empleados en los planos opacos de fachada son de alta resistencia tanto a la climatología como al impacto ya que suelen ser edificios aislados y en su interior se desarrollan actividades que pueden incluir un gran número de personas, otros elementos (balones, redes, canastas...), golpes, etc. Los más utilizados son el hormigón, composites, paneles metálicos o de madera.
- ▶ Los materiales más utilizados para los planos transparentes o traslúcidos son el vidrio (con distintos tratamientos), el policarbonato o el u-glass.
- ▶ Hay una tendencia por utilizar sistemas prefabricados, que ahorran tiempo, coste y posibles errores de montaje.

4.3. PROCESO DE TRABAJO

Si bien un edificio se puede evaluar una vez se ha finalizado el proyecto para comprobar su impacto ambiental, es a través de estudios sucesivos de propuestas de proyecto del edificio, de sus materiales constituyentes o procesos implicados, cuando se obtienen reducciones más significativas en el impacto ambiental y cuando realmente se integra el impacto ambiental como un criterio de proyecto.

¿Cómo sería entonces el proceso de trabajo en el proyecto de un edificio? La Fig 25 muestra el flujo de trabajo tradicional en un proyecto de construcción y el proceso de trabajo iterativo con el que se ha trabajado en el caso de estudio. Comenzando desde un esquema de propuesta, antes de modelar el edificio completo y sus partes integrantes, se pueden hacer comparaciones significativas en cuanto a impactos. Por ejemplo, para comparar varios sistemas de fachadas se podría considerar un área representativa como su unidad funcional. Esto permite tener una idea temprana de los impactos de cada tipo, es decir, el impacto ambiental se está integrando en el proyecto.

El sistema o sistemas elegidos para su desarrollo pueden ser sometidos a análisis posteriores, completos o de comparación, para obtener resultados más precisos. Esto se puede aplicar al resto de sistemas del edificio (estructura, acabados, etc) así como al edificio completo. Una vez que el edificio se ha modelado más detalladamente en Revit, se podría ejecutar un estudio integral para identificar qué ensamblajes, materiales o procesos son los contribuyentes más importantes al impacto ambiental y, así, ofrecer la posibilidad de reducción de impactos mediante la sustitución de materiales y/o modificaciones de diseño.

En la fase de documentación de la construcción, cuando los sistemas de construcción se han elaborado aún más, podemos utilizar nuestros conocimientos específicos sobre los sistemas constructivos que se hubieran definido. Para ello, la base de datos de Tally incluye productos de diversas marcas comerciales, algunos con Declaración de Producto Ambiental (EPD), etc. De esta manera se pueden comparar los productos de varios fabricantes tanto en términos de impacto ambiental como de coste, rendimiento y estética. Otras posibilidades son modificar manualmente las entradas predeterminadas o generar manualmente los sistemas constructivos de nuestra elección, relacionando cada capa del sistema en Revit con un material de la base de datos.

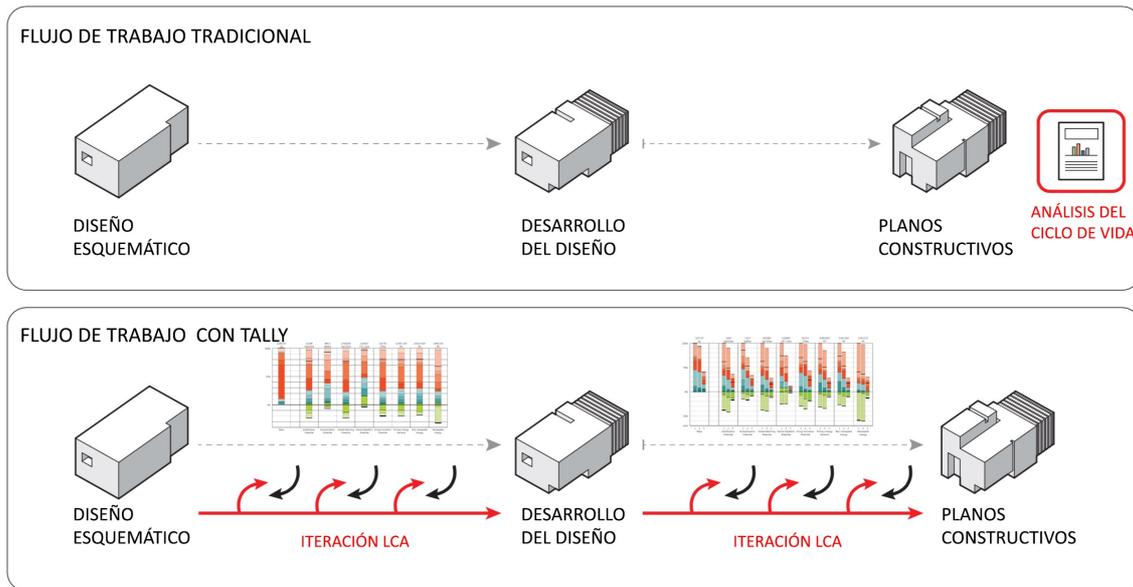


Fig 25. Comparativa de flujo de trabajo tradicional y con Tally. Fuente: Roderick, B.,2014.

4.4. PROYECTO

Siguiendo esta metodología de trabajo iterativa se procede al proyectar la nave deportiva previamente descrita integrando criterios de impacto ambiental junto al resto de criterios típicos de un proyecto: calidad estructura, confort, estética, etc. El análisis de los costes queda fuera de este caso de estudio.

Se analizan por separado los sistemas que componen el edificio: estructura aérea, elementos de hormigón (cimentación y solera) y envolvente (cubierta y fachada). De esta manera se observa el peso de los impactos ambientales de cada sistema y esta información se utiliza para la toma de decisiones de materiales y sistemas.

4.4.1. ESTRUCTURA AÉREA

La estructura consiste en pórticos paralelos cada 5 m, formados por pilares de 4 m de altura y cerchas tipo Warren que salvan una luz de 20 m. El diseño de las cerchas es con contraflecha, con una altura de 150 cm en los apoyos y 220 cm en el centro, y con 10 paneles (una distancia entre montantes de 2 m). Los pórticos cabeceros tienen una configuración con pilares cada 4 metros.

La estructura queda arriostrada lateralmente con 4 paños triangulados en dirección longitudinal y otros 4 en dirección transversal. El perímetro de la cubierta se triangula con vigas a viento para conseguir que el plano de las correas se comporte como un diafragma rígido.

La estructura se proyecta en base al CTE.

- ▶ Localización: Santander, zona urbana, 20 metros sobre el nivel del mar.
- ▶ Uso: deportivo.
- ▶ Vida útil: 50 años.
- ▶ Acciones permanentes: peso propio de la estructura. Paneles de cubierta 0.2 kN/m²
- ▶ Sobrecarga de uso: Categoría G, 0.4 kN/m²
- ▶ Viento: Grado de aspereza III, presión dinámica y coeficientes de presión según CTE DB SE AE Anejo D.
- ▶ Nieve: 0.3 kN/m² sobre terreno horizontal.

- ▶ Seguridad de la estructura en caso de incendio: se trata de un espacio en planta baja con un uso de pública concurrencia, una altura de evacuación < 28m sobre rasante y en el que la estructura soporta únicamente una cubierta ligera. En este caso y según el CTE DB SI (Fig 17) se exige una residencia R-30 a los elementos estructurales.

Se estudian dos variantes de este esquema estructural: en acero y en madera. Ambos se modelan en Revit y se hace un análisis comparativo obteniendo los resultados que se resumen en la Tabla 11.

El dimensionado de los elementos se realiza en Cype3D siguiendo los requerimientos del CTE.

A. OPCIÓN CON ESTRUCTURA METÁLICA

Se utilizan perfiles de acero tanto para los elementos de la estructura principal (pilares y cerchas) como para los elementos de segundo orden (arriostramientos de fachada y cubierta, correas).

Para la cercha se opta por una celosía triangular con perfiles estructurales huecos de acero de sección rectangular. Tras el cálculo estructural se unifican a tres secciones los distintos elementos que componen la cercha. Los pilares se resuelven con perfiles HEB 160.

Para las correas de cubierta se utilizan perfiles IPE 120, colocados sobre los nudos de las cerchas, que soportan los paneles de cubierta. El conjunto se arriostra con vientos en horizontal mediante ángulos CAE 60x6 en fachada y barras de $\varnothing 20$ en cubierta.

La estructura metálica portante (pilares y celosías) debe ser protegida por una pintura intumescente que garantice la resistencia a fuego de R-30 que se exige en el CTE DB SI. Se emplea PROMAPAINTE®-SC4, una pintura intumescente monocomponente, al agua y exenta de fibras, formulada a base de copolímeros acrílicos.

Las conexiones entre elementos de la estructura no se modelan sino que se establece un volumen de 25 kg/m³ de anclajes de acero correspondiente a placas, anclajes, tornillería, etc. Las uniones de los perfiles de las celosías se realizan por soldadura.

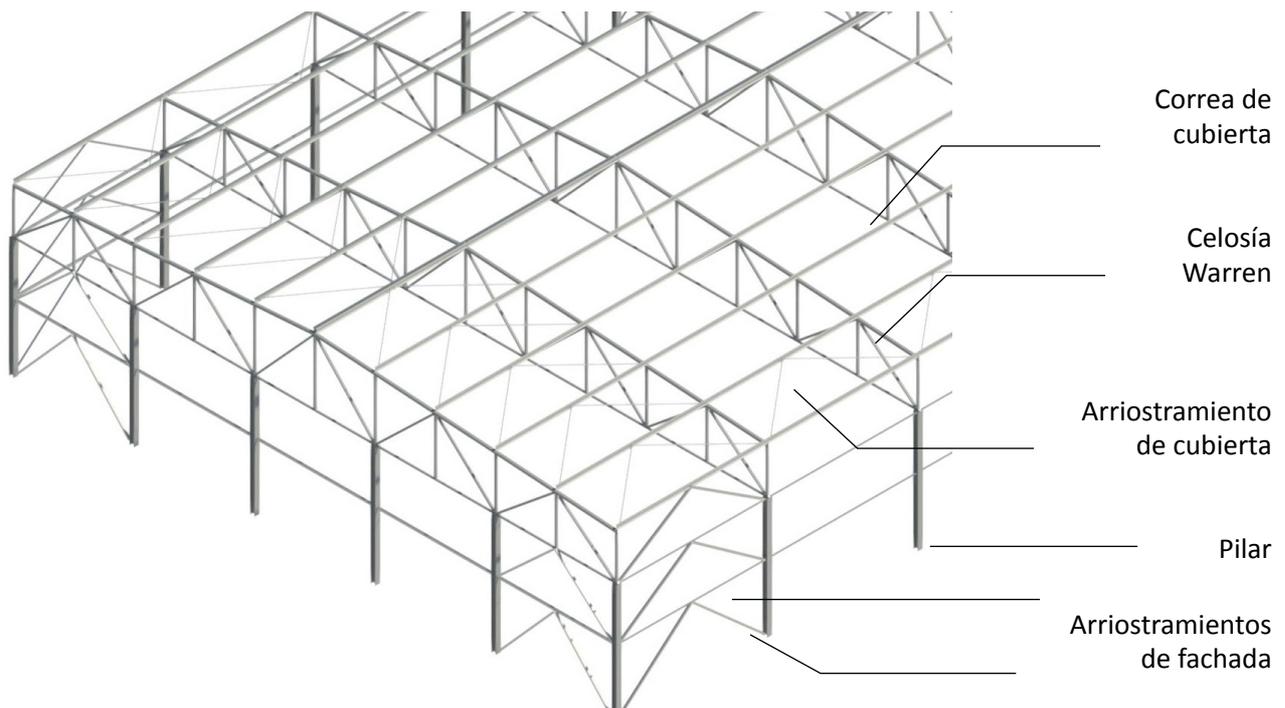


Fig 26. Elementos de la estructura aérea metálica.

CELOSÍA WARREN METÁLICA	
Elementos (sección)	Cordón superior - TCAR 80 x 4 mm
	Cordón inferior - TCAR 50 x 4 mm
	Montantes - TCAR 60 x 4 mm
	Diagonales - TCAR 60 x 4 mm
Material	Acero laminado S275
Norma	CTE DB SE-A
Resistencia al fuego	R-30
Peso propio (acero + pintura)	610.22 kg
Acabado	Pintura intumescente PROMAPAIN [®] -SC4

PILAR HEB 160	
Elementos (sección)	HEB 160
Material	Acero laminado S275
Norma	CTE DB SE-A
Resistencia al fuego	R-30
Peso propio (acero + pintura)	174.46 Kg
Acabado	Pintura intumescente PROMAPAIN [®] -SC4

ESTRUCTURA SECUNDARIA		
Correas de cubierta	Elementos	IPE 120
	Material	Acero laminado S275
	Acabado	Ninguno
	Total en proyecto	60
Arriostramiento de fachada	Elementos	L-Ángulos CAE 60 x 6 mm
	Material	Acero laminado S275
	Acabado	Ninguno
	Total en proyecto	70
Arriostramiento de cubierta	Elementos	Barra redonda \varnothing 20 mm
	Material	Acero S275
	Acabado	Ninguno
	Total en proyecto	52

Tabla 9. Descripción de los elementos de la estructura aérea metálica.

B. OPCIÓN CON ESTRUCTURA DE MADERA

Esta opción se plantea como una estructura principal de madera y elementos de segundo orden tanto de madera (correas de cubierta y fachada) como metálicos (resto de arriostramiento).

Se decide utilizar madera aserrada C24 de pino de Soria en la estructura principal por las siguientes razones: los elementos de la celosía tienen una longitud adecuada (no hay elementos excesivamente largos), la madera procede de una región cercana evitando impactos en el transporte (la madera laminada procede normalmente de fuera del país), la madera aserrada es por lo general más económica que la laminada y, por último y más relevante en cuanto a impactos ambientales, porque la madera aserrada presenta una menor huella de carbono al estar menos procesada y no incorporar en su composición productos adicionales como la cola.

Los pilares se resuelven en madera de pino C24 con una sección de 300 x 200 mm.

Para el dimensionado de los elementos de la estructura portante se tiene en cuenta que la sección sea suficiente para cumplir las condiciones de resistencia al fuego previamente definidas (R-30).

Los elementos de la estructura de segundo orden no están obligados a cumplir condiciones de resistencia a fuego. Éstos son las correas de cubierta, resueltas con secciones de madera de 180x100, los perfiles de arriostramiento horizontal de fachada, con la misma sección de madera, y el resto de elementos de arriostramiento, como en la opción anterior, se resuelven con ángulos de 60x6 en fachada y barras de $\varnothing 20$ en cubierta siguiendo un esquema en "V".

Para las conexiones entre elementos de la cercha se establece un volumen de 70 kg/m³ de anclajes de acero y para las conexiones en pilares y elementos secundarios, 35 kg/m³ de anclajes de acero.

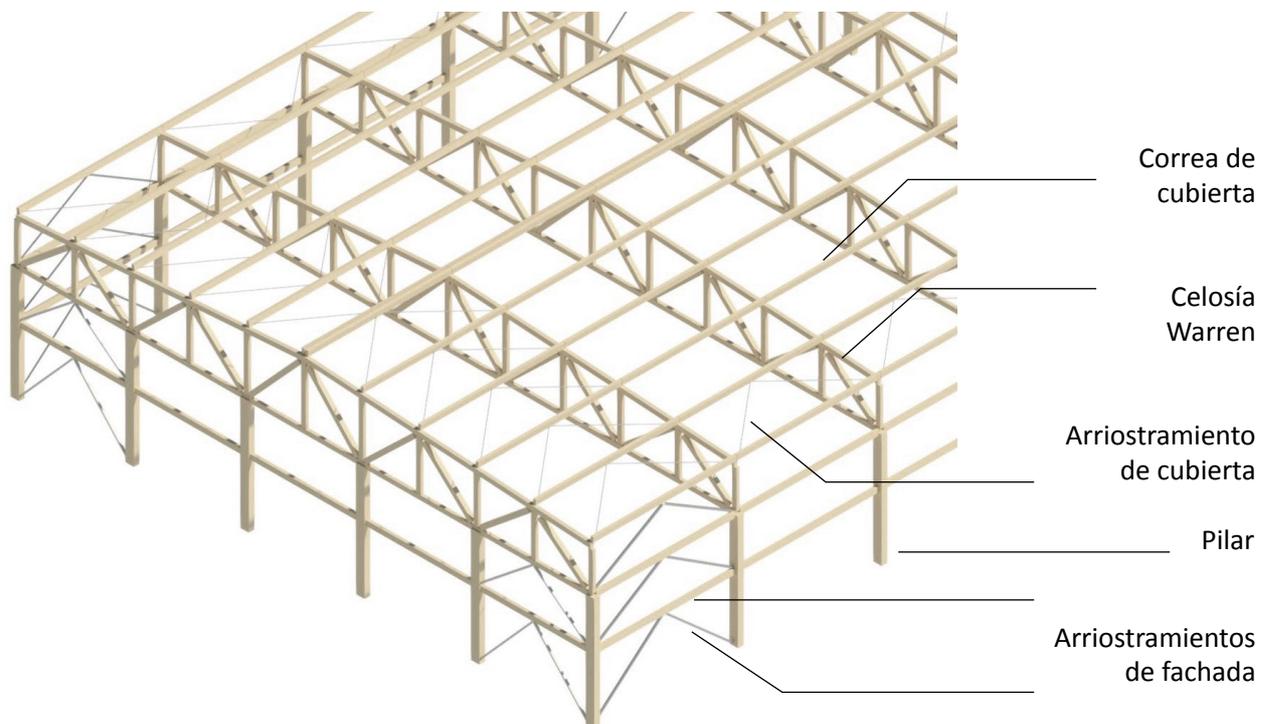


Fig 27. Elementos de la estructura aérea de madera.

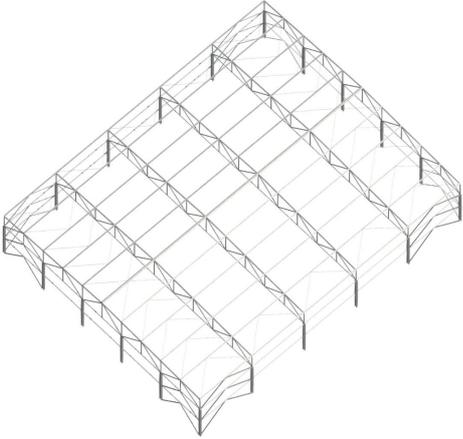
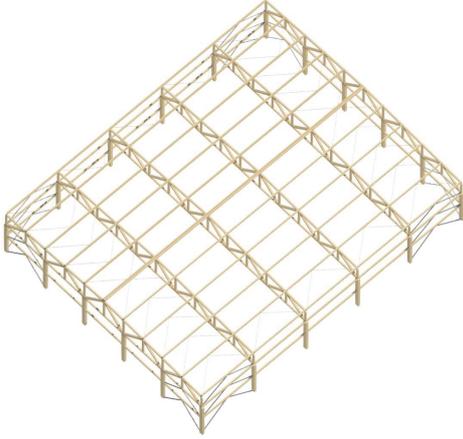
CELOSÍA WARREN DE MADERA	
Elementos (sección)	Cordón superior - 160 x 120 mm
	Cordón inferior - 160 x 100 mm
	Madera C24 - conífera aserrada
	Diagonales - 160 x 140 mm
Material	Madera C24 - conífera (aserrada)
Norma	CTE DB SE-M
Resistencia al fuego	R-30
Peso propio (madera + elementos de conexión)	758.23 Kg
Acabado	Ninguno

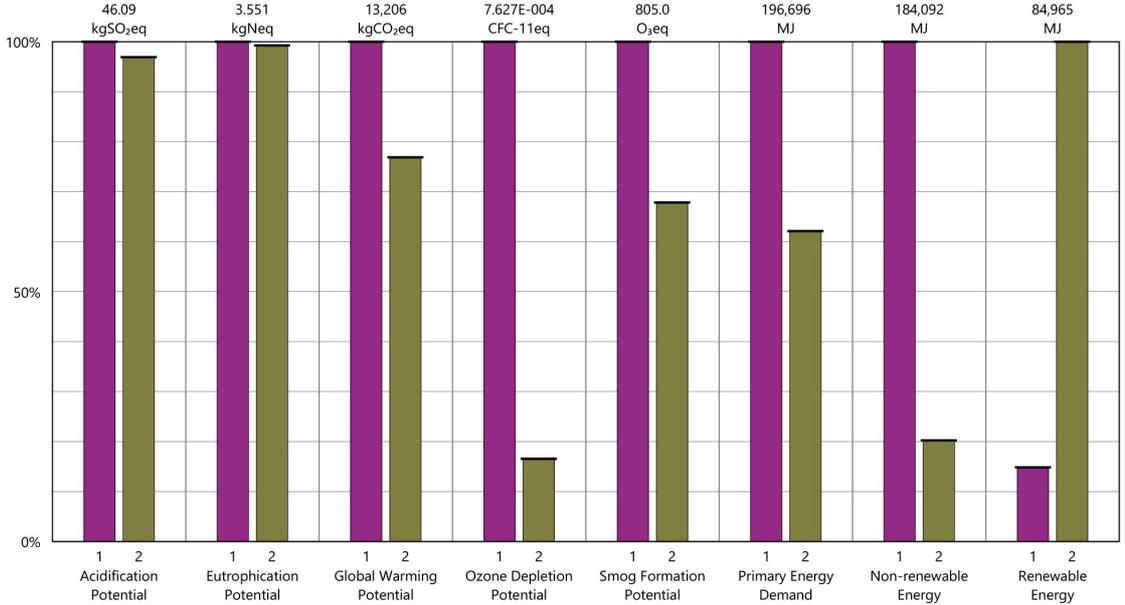
PILAR DE MADERA	
Sección	300 x 200 mm
Material	Madera C24 - conífera (aserrada)
Peso propio	112.45 kg
Total en proyecto	12
Acabado	Ninguno

ESTRUCTURA SECUNDARIA		
Correas de cubierta	Elementos	Sección 180x100
	Material	Madera C24 - conífera (aserrada)
	Acabado	Ninguno
	Total en proyecto	60
Arriostramiento horizontal de fachada	Elementos	Sección 180x100
	Material	Madera C24 - conífera (aserrada)
	Acabado	Ninguno
	Total en proyecto	30
Arriostramiento diagonal de fachada	Elementos	L-Ángulos CAE 60x6
	Material	Acero laminado S275
	Acabado	Ninguno
	Total en proyecto	40
Arriostramiento de cubierta	Elementos	Barra redonda \varnothing 20mm
	Material	Acero S275
	Acabado	Ninguno
	Total en proyecto	52

Tabla 10. Descripción de los elementos de la estructura aérea de madera.

C. IMPACTOS AMBIENTALES DE LA ESTRUCTURA AÉREA

	ESTRUCTURA METÁLICA		ESTRUCTURA DE MADERA	
				
AP	46.09 kgSO _{2eq}		44.42 kgSO _{2eq}	
EP	3.55 kgN _{eq}		3.50 kgN _{eq}	
GWP	13 206 kgCO _{2eq}		10 098 kgCO _{2eq}	
ODP	7.627E-004 CFC-11 _{eq}		1.29E-004 CFC-11 _{eq}	
SFP	805.0 O _{3eq}		538.8 O _{3eq}	
PED	196 696 MJ	NRE: 184 092 MJ	121 420 MJ	NRE: 36 532 MJ
		RE: 12 604 MJ		RE: 84 908 MJ
Masa	11 973 Kg		11 159 Kg	



Category	Option 1 (Metal)	Option 2 (Wood)
Acidification Potential	46.09 kgSO _{2eq}	44.42 kgSO _{2eq}
Eutrophication Potential	3.55 kgN _{eq}	3.50 kgN _{eq}
Global Warming Potential	13,206 kgCO _{2eq}	10,098 kgCO _{2eq}
Ozone Depletion Potential	7.627E-004 CFC-11 _{eq}	1.29E-004 CFC-11 _{eq}
Smog Formation Potential	805.0 O _{3eq}	538.8 O _{3eq}
Primary Energy Demand	196,696 MJ	121,420 MJ
Non-renewable Energy	184,092 MJ	36,532 MJ
Renewable Energy	12,604 MJ	84,908 MJ

Legend

Design Options

- ESTRUCTURA DE ACERO
- ESTRUCTURA DE MADERA

Tabla 11. Comparativa de impactos ambientales de la estructura aérea.

4.2.2. ELEMENTOS DE HORMIGÓN

El cemento Portland es el principal componente del hormigón, encargado de agregar todos los demás componentes en una masa resistente y durable, y es también su componente con mayor impacto ambiental. La industria del cemento, soporta, de hecho, el mayor ratio de intensidad de energía por dolar de producto obtenido (U.S. EPA 2007).

Dado que una buena porción de los impactos ambientales del hormigón se deben a la utilización del cemento Portland en su composición, una reducción en el empleo de éste es un paso importante para lograr hormigones con menor impacto ambiental. Las estrategias que se siguen para lograr esta tarea se centran en dos corrientes: reducir la cantidad de cemento en la mezcla del hormigón y la sustitución de éste por alternativas más apropiadas como las puzolanas industriales o subproductos como las cenizas volantes, humo de sílice y escorias.

Las cenizas volantes por su abundancia y prestaciones son el material cementoso de sustitución más empleado hoy en día. Son un subproducto de la combustión del carbón, presente fundamentalmente dentro del proceso de funcionamiento de las centrales térmicas de carbón. Además de la reducción de impactos ambientales tienen otros efectos sobre en la mezcla final, como por ejemplo: mayor trabajabilidad del hormigón, menor necesidad de agua en la mezcla, menores esfuerzos térmicos durante el curado y menor permeabilidad (hormigón menos poroso), variedad de composiciones químicas que pueden afectar a aspectos como el color, resistencia, vulnerabilidad frente a ataques químicos, etc.

En el caso de la nave de estudio el hormigón está presente tanto en la cimentación como en la solera. La cimentación se realiza se realiza mediante zapatas aisladas de 200cm x 200cm x 80cm y una armadura de $\varnothing 16 / 20$ cm. La solera tiene un espesor de 10 cm de hormigón con armadura ligera (15 kg/m³).

Para comprobar como afecta el cemento en el impacto ambiental del hormigón se hace un análisis comparativo de los elementos de hormigón empleando en un caso cemento Portland sin materiales cementosos de sustitución y en otro caso con cenizas volantes. La EHE08 Y LA RC16 consideran para el caso de hormigones armados para cimentación "muy adecuados los cementos comunes tipo CEM I y CEM II/A, siendo adecuados el resto de cementos comunes a excepción de los tipos CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T, CEM III/B, CEM III/C y CEM IV/B". Se elige un cemento CEM II/B-V, cuyo uso está permitido y tiene cenizas volantes silíceas entre un 21-35% de su composición. En el análisis se considera un 30% de cenizas volantes.

A. IMPACTOS AMBIENTALES DE LOS ELEMENTOS DE HORMIGÓN

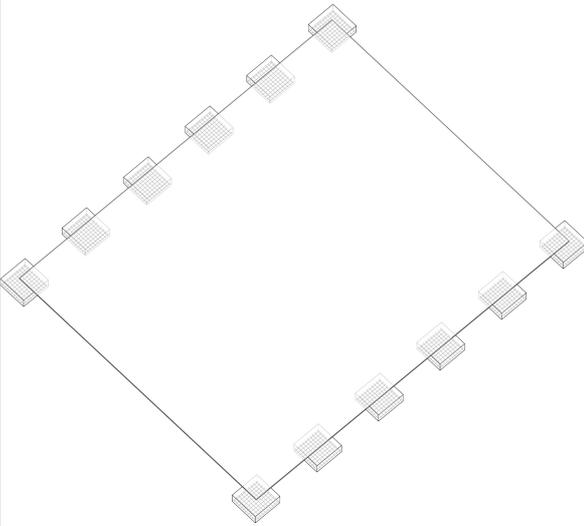
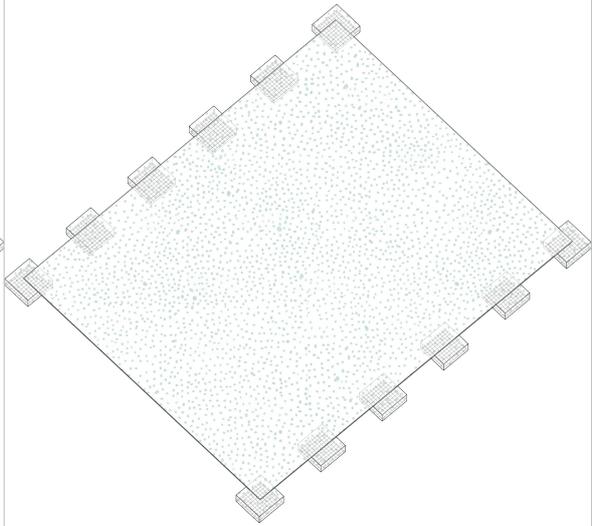
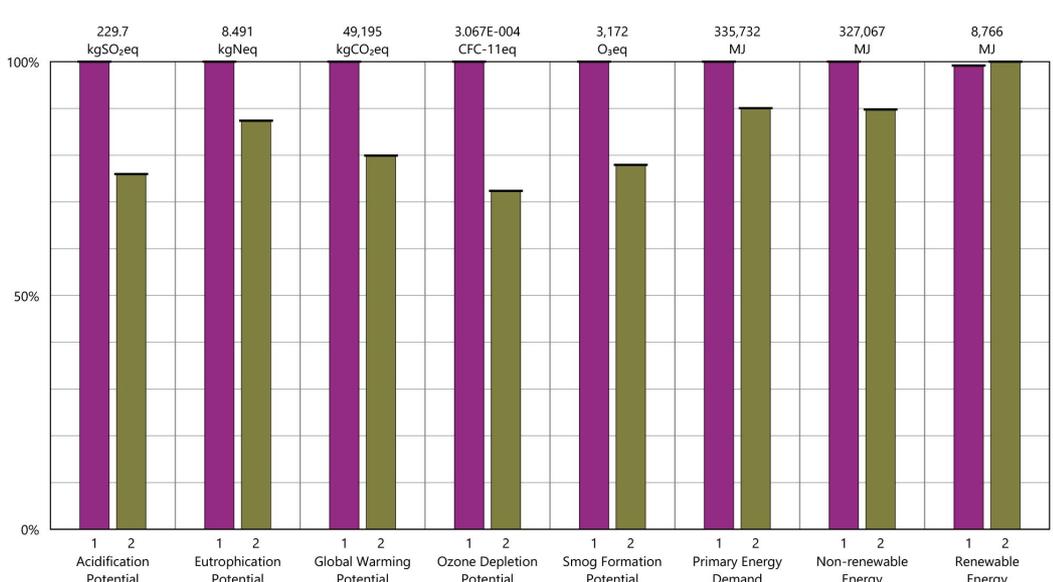
	HA CEM I (0% CENIZAS VOLANTES)		HA CEM II/B-V (30% CENIZAS VOLANTES)	
				
AP	229.7 kgSO _{2eq}		174.5 kgSO _{2eq}	
EP	8.491 kgN _{eq}		7.419 kgN _{eq}	
GWP	49 195 kgCO _{2eq}		39 317 kgCO _{2eq}	
ODP	3.067E-004 CFC-11 _{eq}		2.220E-004 CFC-11 _{eq}	
SFP	3 172 O _{3eq}		2 472 O _{3eq}	
PED	335 732 MJ	NRE: 327 067 MJ	302 368 MJ	NRE: 293 616 MJ
		RE: 8 693 MJ		RE: 8 766 MJ
Masa	198 916 kg		198 916 kg	
	 <p>Legend</p> <p>Design Options</p> <ul style="list-style-type: none"> Hormigón 0% cenizas volantes Hormigón 30% cenizas volantes 			

Tabla 12. Comparativa de impactos ambientales de los elementos de hormigón.

4.2.3. ENVOLVENTE

El repaso realizado a la arquitectura deportiva reciente permite observar los sistemas de envolvente más utilizados hoy en día, bien por durabilidad, facilidad y rapidez de montaje, estética, coste, etc. Con la intención de limitar el número de sistemas de cubierta y fachada a analizar a un número manejable y a la vez significativo para el estudio, se utilizan las observaciones del repaso realizado por la arquitectura deportiva reciente y se extraen varias ideas (ver las conclusiones del apartado 4.2.), como la conveniencia de una envolvente ligera y el uso de sistemas prefabricados o el empleo de planos opacos junto a otros permeables para crear un espacio interior óptimo para el desarrollo de actividades deportivas.

Así, los posibles sistemas utilizados se reducen a una lista de cuatro sistemas de cubierta ligera y seis de fachada entre los que se encuentran materiales opacos, traslúcidos y transparentes, sistemas prefabricados y otros in situ. Las tablas XIII y XIV presentan las características de cada sistema.

Tras el análisis de cada sistema por separado tomando como unidad funcional la totalidad de la nave para poder compararlos con el resto de análisis (estructura aérea y elementos de hormigón), los resultados obtenidos se muestran en una gráfica según su PED y GWP. Estos dos indicadores son los que más varían en los resultados de cada sistema y, por tanto, mayor margen de mejora presentan. Además, son los impactos más relevantes bien porque inciden en el agotamiento de recursos escasos, en el caso de la energía procedente de fuentes no renovables; bien porque afectan al planeta en su conjunto, como la emisión de gases de efecto invernadero cuyas consecuencias son catastróficas y la solución pasa por reducir las emisiones de CO₂. Ambos impactos están relacionados pues la quema de combustibles fósiles como fuente de energía es la máxima responsable del CO₂ que se emite a la atmósfera y, por tanto, su reducción y/o sustitución por otras fuentes de energía renovables frenaría el calentamiento global.

El resto de impactos se analizan a nivel de todo el edificio en el apartado 5.2.

A. SISTEMAS DE CUBIERTA

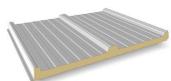
SISTEMA	CAPAS (de exterior a interior)	ESPESOR TOTAL	PESO	VIDA ÚTIL	SECCIÓN
Deck	- Placa de aluminio anodizado de 1 mm de espesor - Aislamiento termico de lana mineral - Barrera de vapor (lámina HDPE) - Soporte base de placa de acero galvanizado Anclajes, tornillería, remates y resto de fijaciones de acero inoxidable (0.88 kg/m ²)	100 mm	15.00 kg/m ²	50 años	
Panel sandwich Metl-Span®	- Panel con núcleo de lana mineral aislante y caras exterior e interior de aluminio Anclajes, tornillería, remates y resto de fijaciones de acero inoxidable (0.88 kg/m ²)	75 mm	12.50 kg/m ²	50 años	
Thermochip®	- Placa de aluminio anodizado - Tablero OSB.3 - Núcleo de fibra de madera, Gutex + barrera de vapor (lámina HDPE) - Tablero OSB.3 Anclajes, tornillería, remates y resto de fijaciones de acero inoxidable (0.88 kg/m ²)	111 mm	35.66 kg/m ²	25 años	
Policarbonato celular	- Placa de policarbonato celular 50mm Anclajes, tornillería, remates y resto de fijaciones de acero inoxidable (0.88 kg/m ²)	50 mm	7.88 kg/m ²	25 años	

Tabla 13. Sistemas de cubierta analizados.

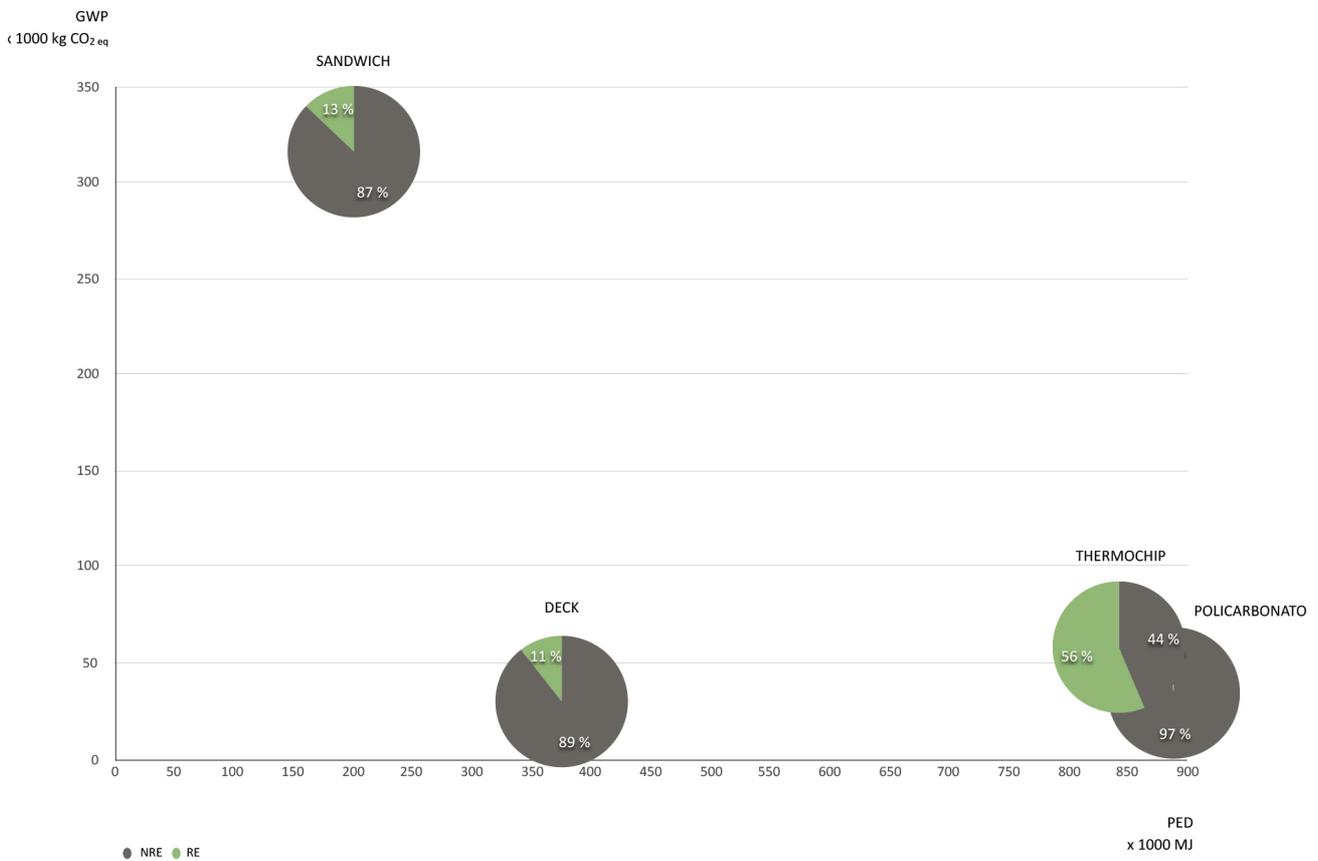


Fig 28. Gráfica de los impactos de los sistemas de cubierta.

La Fig 28 muestra los resultados obtenidos en el análisis de cada sistema de cubierta en cuanto a la PED y el GWP. La PED se desglosa en energía procedente de fuentes renovables (RE) y de fuentes no renovables (NRE).

Los mayores consumos de energía se observan los sistemas cuya vida útil es más corta (Thermochip y policarbonato, analizados según una vida útil de 25 años) y, por tanto, necesitan ser reemplazados. El LCA incluye la energía necesaria para su reemplazo; como se observa en la Fig 29, mientras que en un sistema cuya vida útil es de 50 años casi la totalidad de su consumo energético se produce en la fase de fabricación (Manufacturing), en un sistema cuya vida útil es de 25 años, hay consumo de energía tanto en la fase de fabricación como en la de sustitución (Maintenance and Replacement), que incluye la fabricación del nuevo material.

Otro dato que llama la atención es el elevado GWP del sistema de cubierta con paneles Sandwich. La Fig 30 muestra los resultados de LCA del sistema de paneles Sandwich en comparación con otro sistema de cubierta ligera, como es el Deck. Se deduce que el uso de espumas como aislamiento es el principal responsable de las emisiones de CO₂ y, por etapas, casi las tres cuartas partes se producen en la fabricación y algo más de una cuarta parte tiene lugar en el fase de fin de vida. A diferencia del resto de sistemas, en los que la fase de fin de vida "reduce" el total de GWP del sistema, es decir, su tratamiento permite reutilizar o reciclar parte del material actuando positivamente sobre el total de GWP (ver apartado 3.5.1., Tratamiento de fin de vida), los materiales que integran los paneles sandwich siguen produciendo gases de efecto invernadero durante su proceso de eliminación.

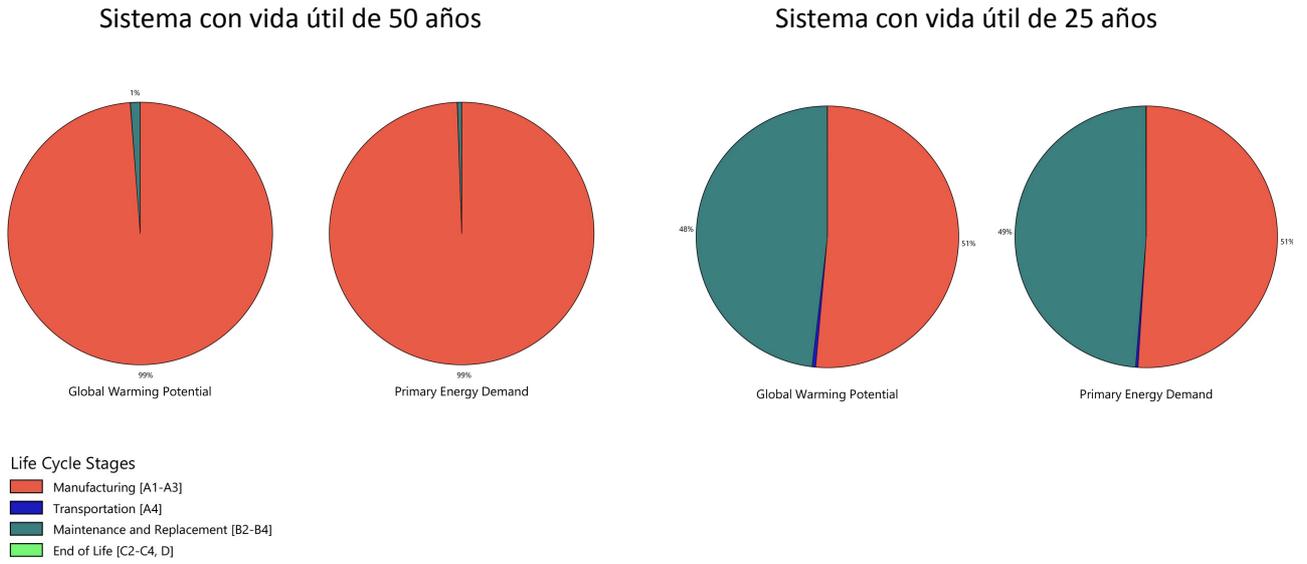


Fig 29. Comparativa de consumo de energía de dos sistemas con diferente vida útil.

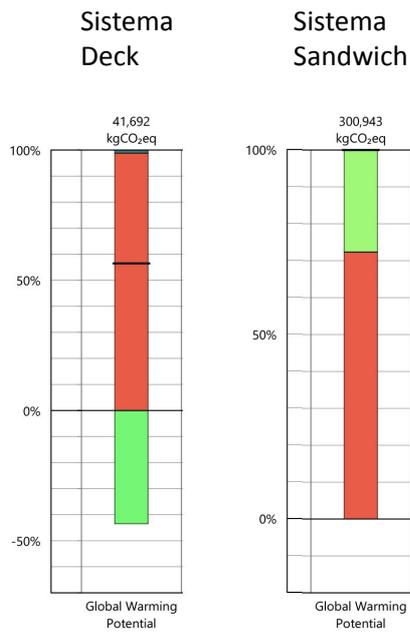


Fig 30. Comparativa de GWP durante el LCA del sistema Deck y el Sandwich.

B. SISTEMAS DE FACHADA

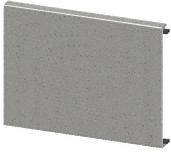
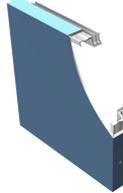
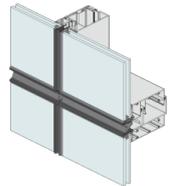
SISTEMA	CAPAS (de exterior a interior)	ESPESOR TOTAL	PESO	VIDA ÚTIL	SECCIÓN
Fachada ventilada GRC	<ul style="list-style-type: none"> - Panel GRC stud frame; 20 mm de GRC y bastidor de acero - Trasdosado de paneles de yeso laminado resistentes a la humedad Anclajes, tornillería, remates y resto de fijaciones de acero inoxidable (0.88 kg/m ²)	130 mm	56.3 kg/m ²	50 años	
Fachada ventilada, Alucobond®	<ul style="list-style-type: none"> - Panel composite integrado por acabado de aluminio de 4 mm de espesor y un núcleo termoplástico aislante - Subestructura de montantes de aluminio 100 x 50 x 2 mm cada metro - Trasdosado de paneles de yeso laminado resistentes a la humedad Anclajes, tornillería, remates y resto de fijaciones de acero inoxidable (0.88 kg/m ²)	92 mm	21.17 kg/m ²	50 años	
Fachada ventilada, EQUITONE	<ul style="list-style-type: none"> - Panel de fibrocemento EQUITONE natura (cemento, celulosa y materiales minerales). - Subestructura de montantes de aluminio 100 x 50 x 2 mm cada metro. - Trasdosado de paneles de yeso laminado resistentes a la humedad Anclajes, tornillería, remates y resto de fijaciones de acero inoxidable (0.88 kg/m ²)	120 mm	30.08 kg/m ²	50 años	
Fachada ventilada, Thermochip®	<ul style="list-style-type: none"> - Panel de madera de 20 mm de espesor con acabado pintura al agua para su protección al exterior - Tablero OSB.3 - Núcleo de fibra de madera, Gutex + barrera de vapor (lámina HDPE) - Tablero OSB.3 Anclajes, tornillería, remates y resto de fijaciones de acero inoxidable (0.88 kg/m ²)	110 mm	47.76 kg/m ²	25 años	
Policarbonato celular	<ul style="list-style-type: none"> - Placa de policarbonato celular 50 mm Anclajes, tornillería, remates y resto de fijaciones de acero inoxidable (0.88 kg/m ²)	50 mm	7.88 kg/m ²	25 años	
Muro cortina de vidrio	<ul style="list-style-type: none"> - Montantes de aluminio anodizado 120 x 50 x 2 mm cada 1 m - Travesaños de aluminio anodizado 120 x 50 x 2 mm cada 2.20 m - Paneles de vidrio de una hoja de 5 mm Anclajes, tornillería, remates y resto de fijaciones de acero inoxidable (0.88 kg/m ²)	120 mm	25.00 kg/m ²	50 años	

Tabla 14. Sistemas de fachada analizados.

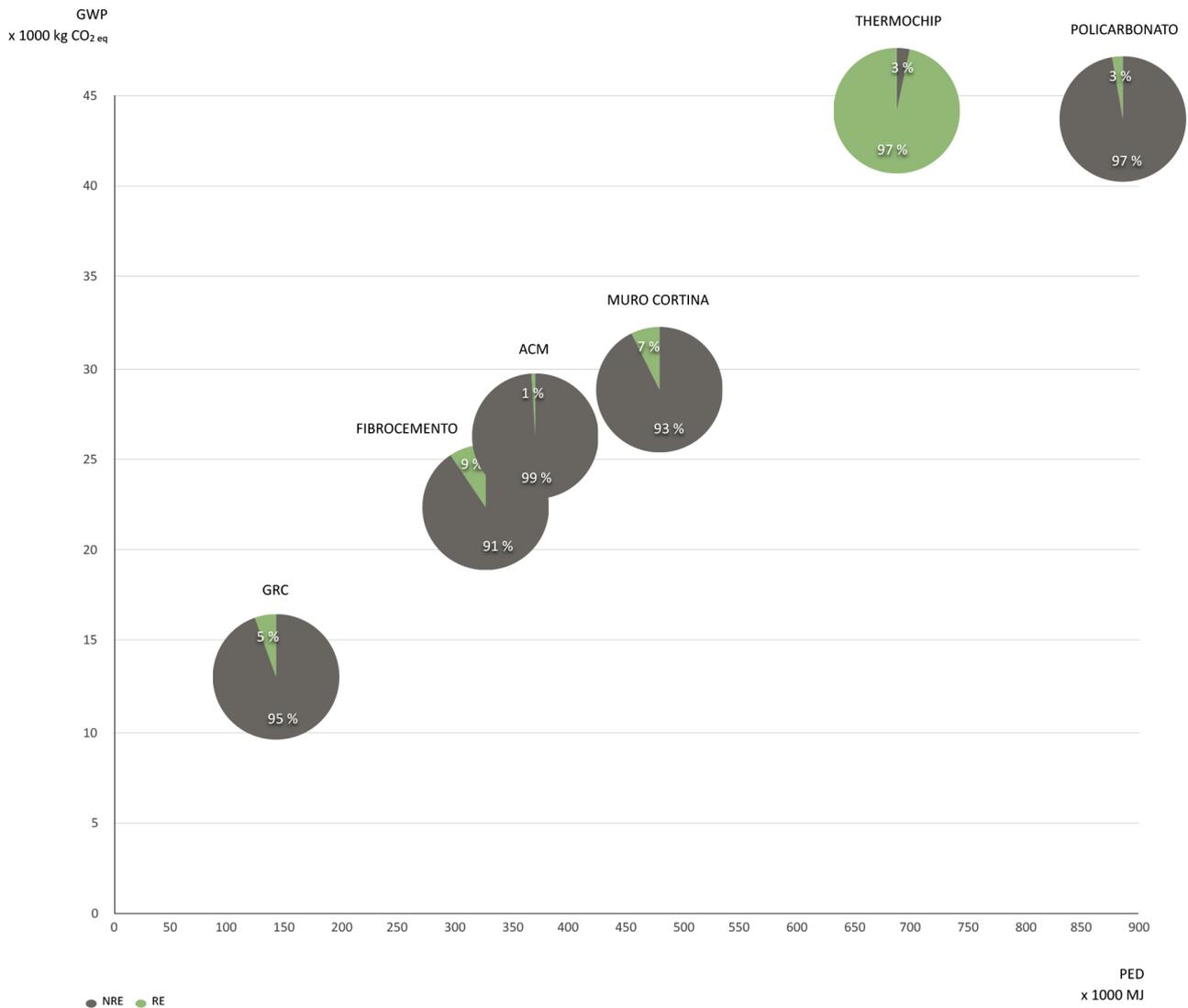
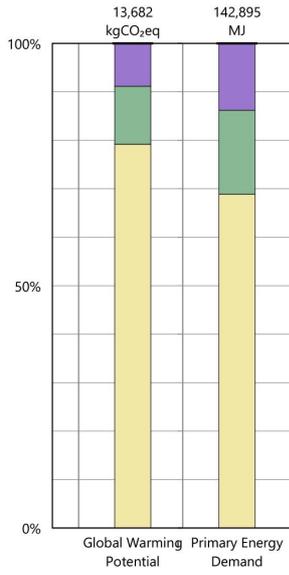


Fig 31. Gráfica de los impactos de los sistemas de cubierta.

Al igual que en los sistemas de cubierta, la Fig 31 muestra que en los sistemas de fachada, aquellos con mayor PED son los que tienen una vida útil más corta. Cabe destacar el caso del sistema Thermochip, que si bien es uno de los que más energía demanda, es el único cuyo origen principal son las fuentes renovables. En la parte baja de PED se encuentra el sistema de fachada ventilada con paneles GRC. Como se muestra en la Fig 32, esta diferencia respecto al resto de fachadas ventiladas analizadas con el mismo esquema (subestructura de tubos de aluminio y acabado interior en PYL) y con la misma vida útil, reside en el material del panel exterior, es decir, la fabricación de los paneles de hormigón GRC requiere menor cantidad de energía que los paneles de fibrocemento o composites de aluminio.

De la misma manera, en cuanto a GWP, los paneles de GRC presentan valores más bajos que el resto de paneles analizados.

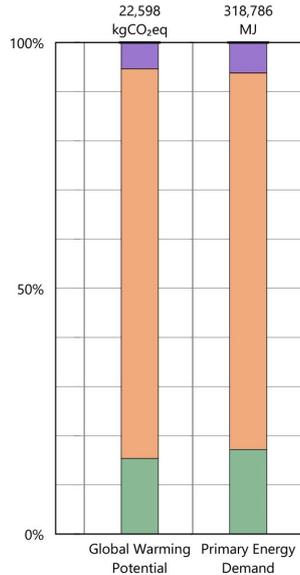
Paneles GRC



Legend

- Divisions
- 03 - Concrete
 - 05 - Metals
 - 09 - Finishes

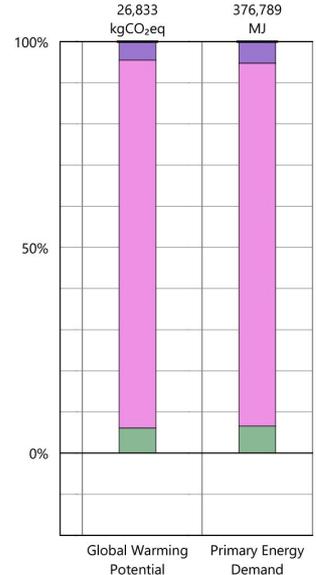
Paneles EQUITONE



Legend

- Divisions
- 05 - Metals
 - 06 - Wood/Plastics/Composites
 - 09 - Finishes

Paneles Alucobond



Legend

- Divisions
- 05 - Metals
 - 07 - Thermal and Moisture Protection
 - 09 - Finishes

Fig 32. Comparativa de los impactos de los sistemas de fachada ventilada con panel exterior analizados.

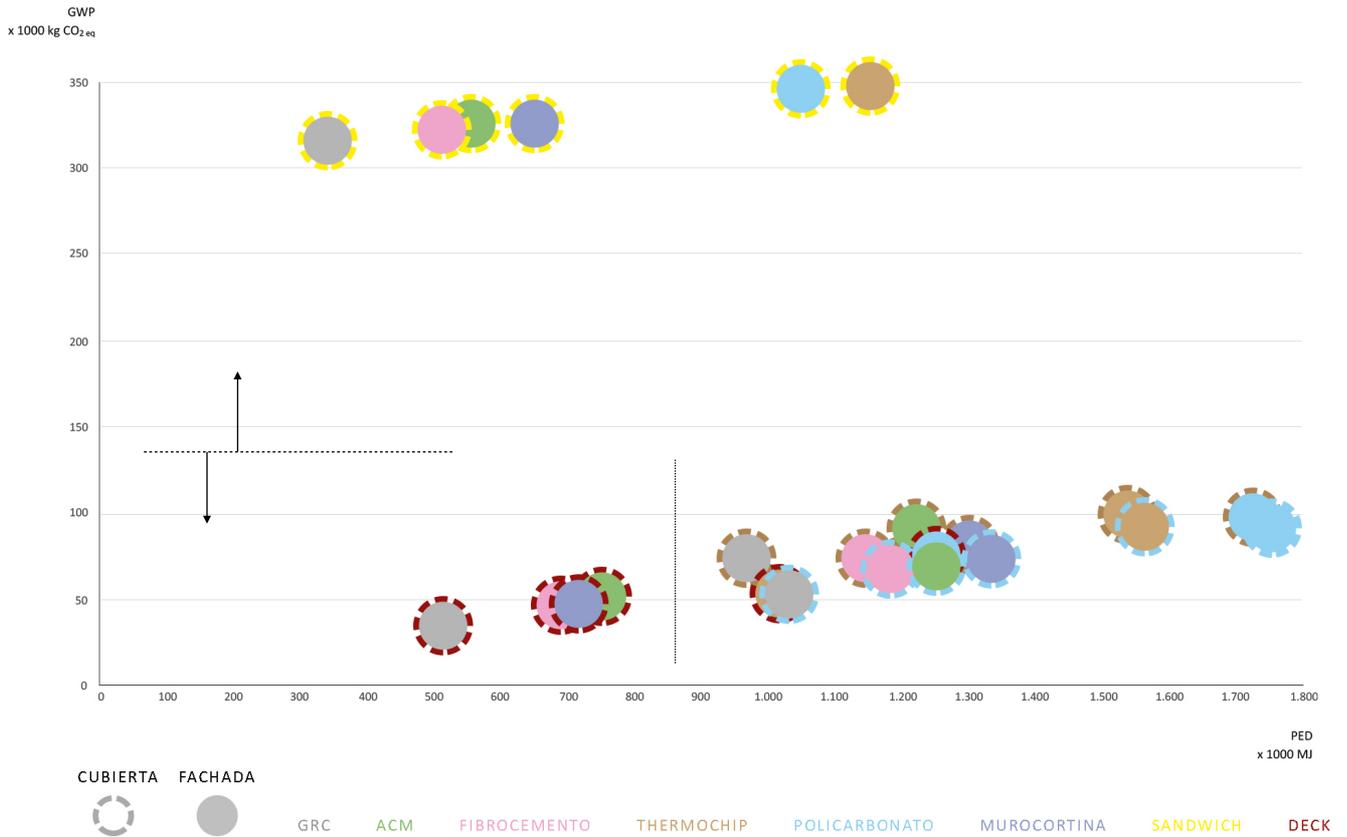


Fig 33. Gráfica resumen de los impactos de los distintos sistemas de envolvente.

A modo de resumen, en la Fig 33 se puede ver el valor de los impactos de PED y GWP de las distintas combinaciones de cubierta y fachada previamente analizadas individualmente. La superficie de cubierta y fachada en la nave estudiada es sensiblemente la misma (aproximadamente 525 m²), con lo que estos resultados “cruzados” siguen la misma tendencia que las gráficas anteriores: se comprueba cómo los sistemas con una vida útil mas corta se mantienen en los valores elevados de PED, así como el altísimo impacto de los paneles sandwich en el GWP.

Esta gráfica se utiliza para tomar decisiones en la propuesta final de envolvente:

- ▶ Se descarta el uso de paneles Sandwich con aislamiento en espuma para la cubierta, optando por el sistema Deck que ofrece unos valores más bajos tanto en PED como en GWP.
- ▶ Se elige el sistema de fachada ventilada con paneles de GRC para el cerramiento de fachada opaco y el muro cortina con paneles de vidrio para las áreas de fachada que permitan el paso de luz.

5. RESULTADOS

Se han analizado los impactos ambientales de una lista de materiales y sistemas constructivos ampliamente utilizados en la arquitectura contemporánea. Los resultados obtenidos se detallan en apartado 5.1. y se comparan con los resultados de la propuesta de proyecto que se ha realizado trabajando de manera iterativa para incluir la reducción de impactos. El objetivo es comprobar si se ha conseguido el objetivo y en que medida, así como detectar dónde se producen los mayores impactos y que capacidad de reducción presentan.

Por último, en el apartado 5.2. se comentan más detalladamente los resultados obtenidos en la propuesta de proyecto.

5.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS

Tras realizar el análisis de los distintos sistemas que componen el edificio por separado (estructura aérea, elementos de hormigón y envolvente), se procede a observar los resultados del total del edificio. Para ello, los análisis realizados se observan en conjunto para comprobar su valor relativo en el total del edificio. El objetivo es constatar la incidencia o el peso que tiene cada sistema en el total de impactos del edificio y como un proyecto. Por otro lado, se ha realizado el análisis de una propuesta de proyecto en la que se han utilizado materiales tratando de minimizar los impactos ambientales.

Para el análisis comparativo final se procede de la siguiente manera: se observan la PED y cada una de las 5 categorías de impacto por separado mediante gráficas desglosadas en los sistemas que componen el edificio. La primera gráfica (a) es la "Propuesta de referencia", muestra el impacto del proyecto de nave deportiva sin consideración de parámetros de impacto ambiental calculada como el promedio de los resultados obtenidos en los sucesivos análisis de cada sistema; y la segunda gráfica (b) es la "Propuesta de proyecto", muestra los resultados obtenidos en la propuesta de proyecto, en el que la toma de decisiones se basa en criterios de impacto ambiental.

De esta manera se pretende evaluar la capacidad de reducción de impactos ambientales en un proyecto al tomar decisiones basadas en el impacto de sus materiales desde su fase de diseño.

Los resultados obtenidos muestran que todos los impactos, en mayor o menor medida, se reducen.

5.1.1. ENERGÍA PRIMARIA DEMANDADA (PED)

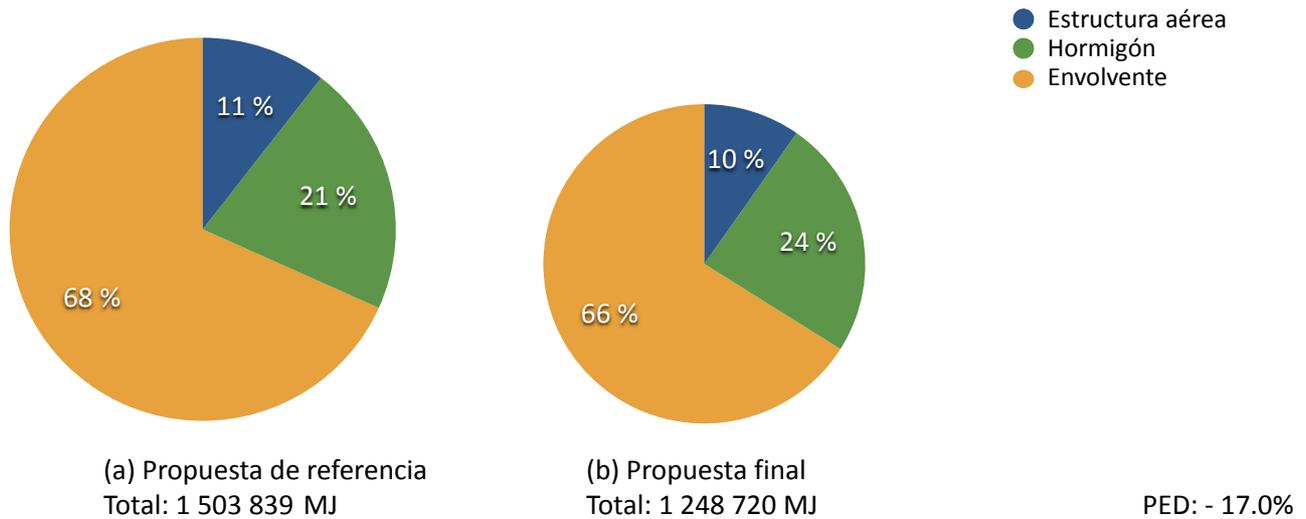


Fig 34. Comparativa de PED.

La energía primaria demandada (PED) es la medida de la cantidad total de energía primaria demandada extraída de la Tierra. Incluye la energía procedente de recursos no renovables (petróleo, gas natural, etc.) y de fuentes renovables (hidráulica, eólica, solar, etc.). Se tienen en cuenta las eficiencias en la conversión de energía (por ejemplo, potencia, calor, vapor, etc.). Cabe recordar que la energía aquí reflejada es la utilizada durante el ciclo de vida de cada producto, en este caso de estudio no se incluye la energía invertida en la construcción por no tener datos de consistencia para introducirla en el cálculo, si bien los sistemas elegidos tienden a la prefabricación con lo que se trata de evitar grandes consumos en esta fase.

Como se observa en la Fig 34, con el proyecto basado en criterios de reducción de impactos ambientales se obtiene una reducción del 17.0% de PED, es decir, un ahorro de 255 119 MJ. En otras palabras, esta cantidad de energía es el equivalente al consumo de electricidad de una persona en España durante 13,5 años (5 231 kWh por año, según datos de la CIA, 2014), o un ahorro de unos 9 000 € si se tratase de energía eléctrica (precio en España en el mes de octubre de 2017 según Endesa).

Por partes del edificio, casi tres cuartas partes de la energía se destina a los materiales de la envolvente por lo que una envolvente eficiente tiene una enorme repercusión en el total de energía demandada. Al reducir los impactos en cada parte se observa que el peso de cada sistema en el total del edificio se mantiene prácticamente constante.

Dentro de la PED la proporción de NRE y RE se mantiene constante. Si bien se consigue que la energía demandada para la fabricación de la estructura sea casi en su totalidad procedente de fuentes renovables, al tener poco peso en el total del edificio no tiene apenas repercusión. Para la fabricación de los materiales de hormigón y de envolvente, que representan el 90% de la PED no se ha conseguido que ésta proceda de fuentes renovables. Esto podría ser una vía de estudio a seguir.

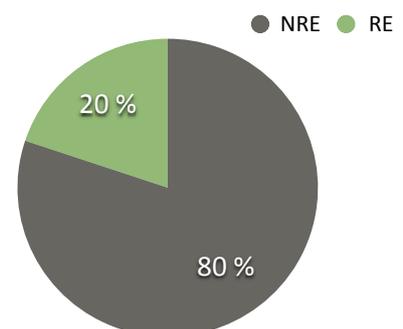


Fig 35. Proporción de energía procedente de fuentes renovables y no renovables.

5.1.2. POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (GWP)

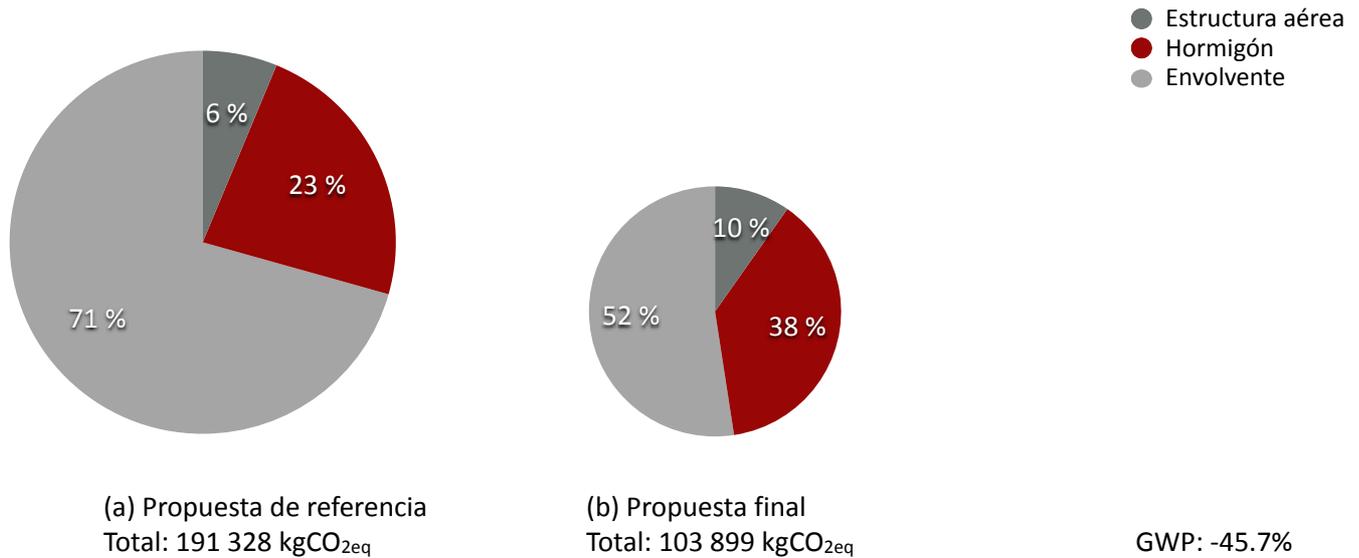


Fig 36. Comparativa de GWP.

Mejores resultados se obtienen en el caso del GWP. Como se explica en el apartado 3.5.2., cada uno de los gases de efecto invernadero afecta a la atmósfera en distinto grado y permanece allí durante un periodo de tiempo diferente. El GWP es la medida en la que un gas de efecto invernadero contribuye al calentamiento global y se expresa en kgCO_{2eq}, es decir, el potencial de calentamiento de un determinado gas en comparación con el que posee el mismo volumen de CO₂ durante el mismo periodo de tiempo.

En el proyecto propuesto, como se ve en la Fig 36, se consigue reducir el GWP a casi la mitad. De nuevo la envolvente es el sistema con mayor potencial de reducción: la elección de materiales en cuyo proceso de fabricación se produzca la menor cantidad posible de estos gases es crucial.

Al reducir el impacto de la envolvente crece el aporte relativo de los otros sistemas, en especial el de los elementos de hormigón. En concreto, la reducción de cada sistema por separado es aproximadamente de un 20% en los elementos de hormigón, un 24% en la estructura aérea y un 60% en la envolvente, donde se comprueba que el sistema que aporta mayores cargas son los paneles Sandwich.

5.1.3. POTENCIAL DE ACIDIFICACIÓN

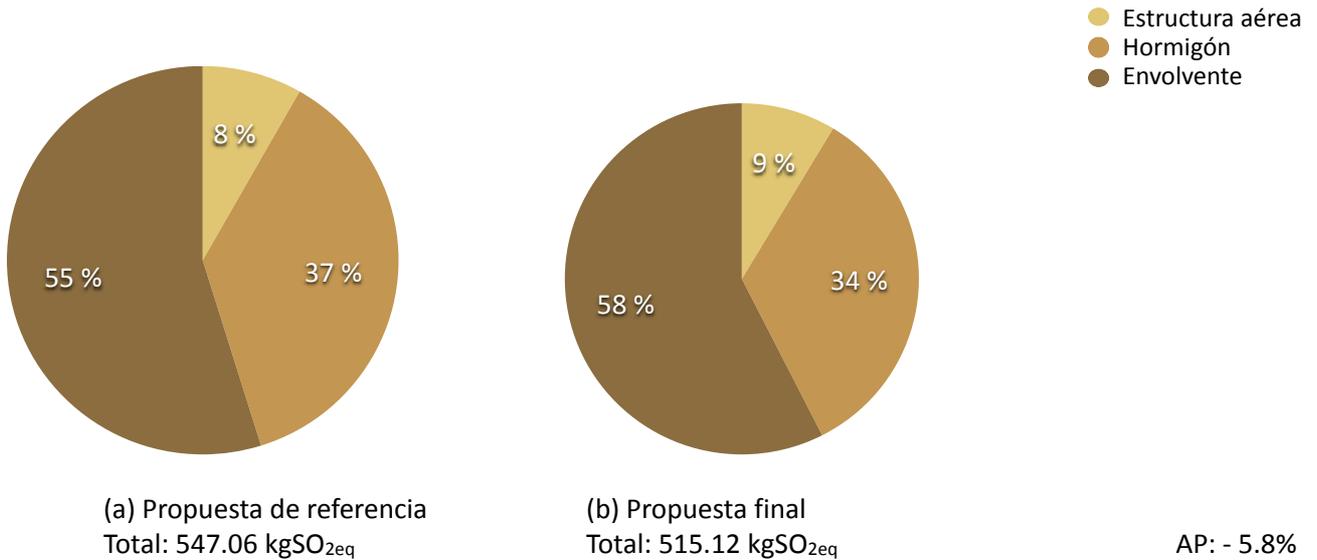


Fig 37. Comparativa de AP.

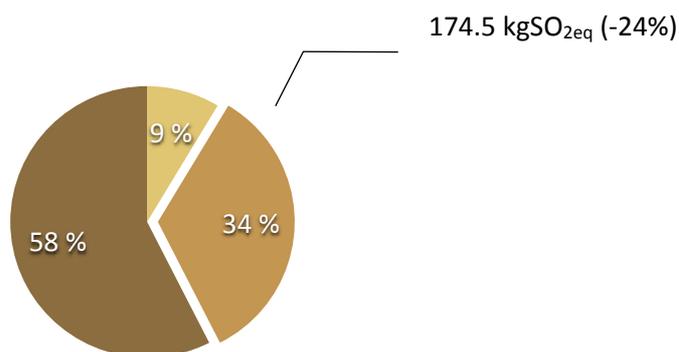
La lluvia ácida se produce cuando partículas de SO₂ y NO_x procedentes en su mayoría de plantas de combustión de carbón y petróleo, y de las emisiones del transporte rodado, pasan a la atmósfera y vuelven a la Tierra con el agua de lluvia, provocando efectos perjudiciales a seres vivos y resto de elementos de la superficie de la tierra.

El transporte no tiene una repercusión muy elevada en el caso de estudio ya que las distancias que se han manejado son moderadas: todos los materiales utilizados se fabrican en el país y se ha buscado que la distancia de la fábrica al emplazamiento del edificio sea la más corta posible.

En el caso de la combustión de materiales fósiles para la producción de energía, como se explica en el apartado 5.1.1., no se ha reducido la proporción de NRE, aunque el total de PED disminuye y por lo tanto la NRE disminuye también, en la misma proporción.

Estos son los dos motivos principales por lo que que la reducción del AP es menor que la de otros impactos, como se aprecia en la Fig 37.

En el caso de los materiales de hormigón es donde se observa una mayor reducción. Si se extrae el dato del AP de los materiales de hormigón se comprueba que la reducción es del 24% al utilizar un hormigón con cemento cuya mezcla incluye cenizas volantes (174.5 kgSO_{2eq} frente a 229.7 kgSO_{2eq} del hormigón con cemento sin cenizas volantes).



5.1.4. POTENCIAL DE EUTROFIZACIÓN

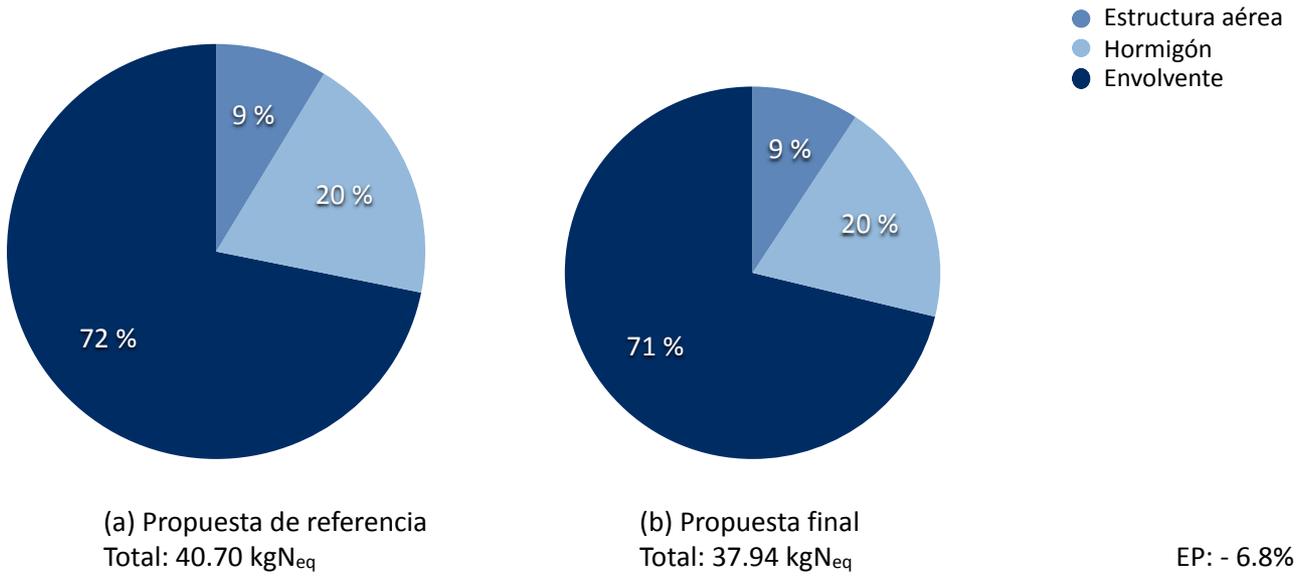


Fig 38. Comparativa de EP.

El fenómeno de la eutrofización se produce cuando partículas de N y P procedentes mayormente de residuos urbanos, industriales y agrícolas, pasan a las grandes masas de agua y crean biomasa en una cantidad superior a la natural, afectando sobre todo a los ecosistemas acuáticos.

Como en el caso anterior, al no conseguir reducir la energía procedente de fuentes no renovables cuyo proceso de obtención genera estos residuos, la reducción del AP es limitado (ver Fig 38).

5.1.5. POTENCIAL DE AGOTAMIENTO DEL OZONO (ODP)

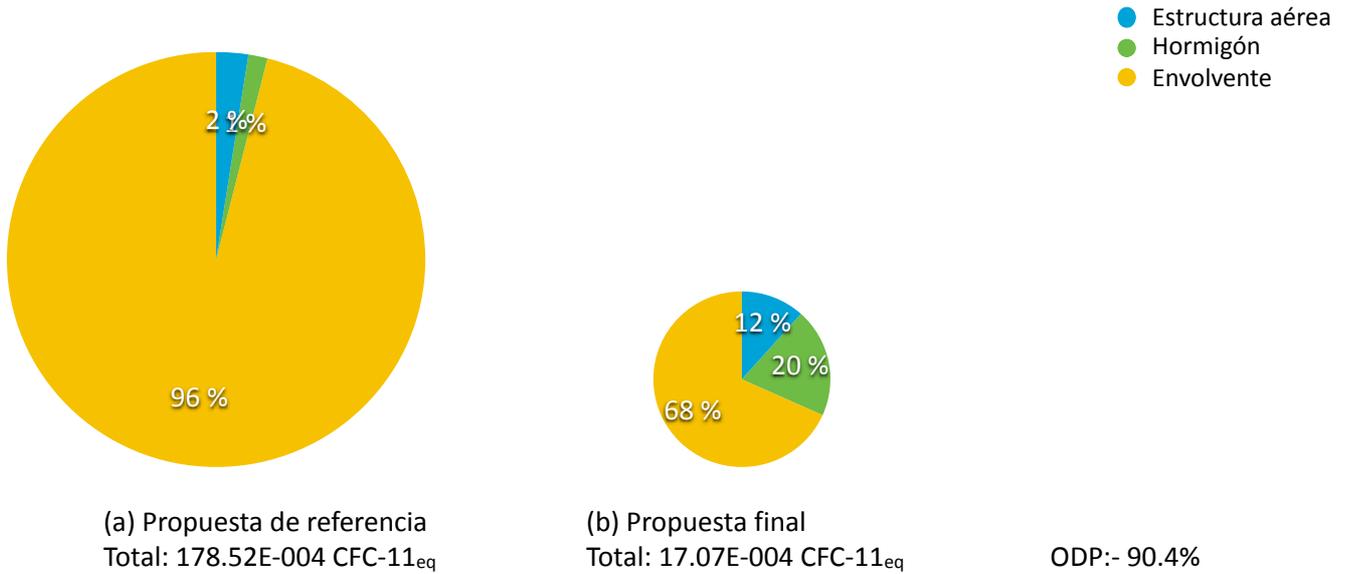


Fig 39. Comparativa de ODP.

El caso de la reducción del ODP en el sector de la construcción está muy relacionado con evitar el uso de espumas y materiales aplicados con spray, responsables de casi la totalidad de este impacto. La enorme reducción en la propuesta de proyecto que se puede ver en la Fig 39, se debe sobre todo a la no utilización de paneles sandwich en cubierta, único sistema analizado que incluía aislamiento en espuma. Los resultados en cuanto a ODP de los sistemas de cubierta que aparecen en la Tabla 15 muestran que este sistema tiene una aportación al impacto muy por encima de cualquier otro; comparándolo con el resto de sistemas de cubierta analizados vemos como, mientras en el resto el impacto es del orden de E-004, el valor de los paneles Sandwich está muy por encima.

SISTEMA	ODP (kg CFC-11 _{eq})
Sandwich	4.864E-002
Deck	6.611E-004
Thermochip	4.906E-004
Policarbonato	1.353E-004

Tabla 15. ODP de los sistemas de cubierta.

La reducción de este impacto es muy importante ya que el agotamiento de la capa de ozono es cada vez mayor y provoca que los rayos UV del sol lleguen a la Tierra.

5.2.6. POTENCIAL DE FORMACIÓN DE SMOG (SFP)

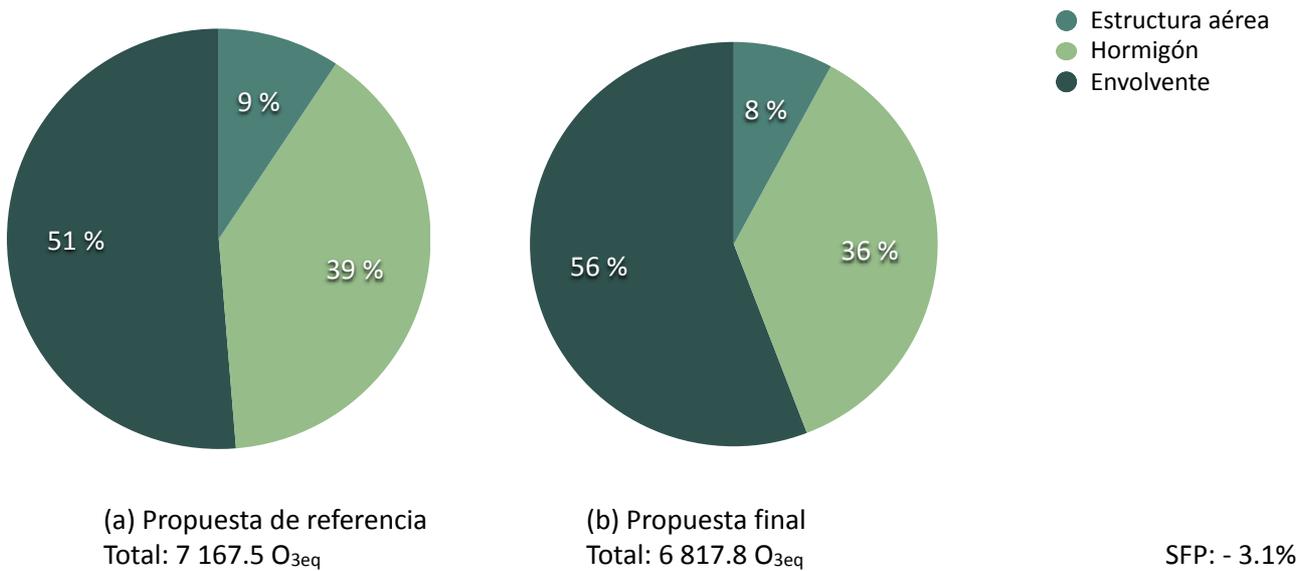
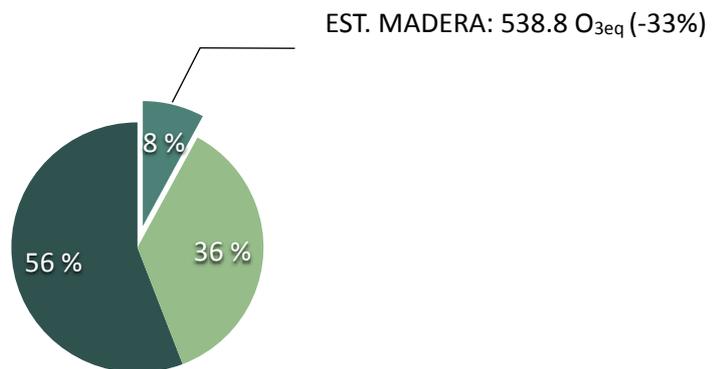


Fig 40. Comparativa de SFP.

Esta niebla tóxica conocida como smog se produce principalmente en áreas urbanas y, al igual que el AP, tiene su origen en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) principalmente procedentes de vehículos a motor, servicios de energía eléctrica, instalaciones industriales, etc. Al no cambiar las principales fuentes de estas emisiones en mayor medida, la Fig 40 muestra que los resultados obtenidos son semejantes a los que se hubieran obtenido con otra propuesta dentro de los sistemas estudiados.

En la elección de la estructura aérea es donde se consigue mayor reducción de este impacto: un 33.1% (538.8 O_{3eq} frente a la estructura realiza en acero que tiene una carga de 805.0 O_{3eq}). Sin embargo por el peso que tiene en el global del edificio no produce una reducción significativa en este.



5.2. RESULTADOS DE LA PROPUESTA DE PROYECTO

El objetivo de este caso de estudio consistía en integrar el impacto ambiental que tienen los materiales en la toma de decisiones de un proyecto de construcción. Siguiendo un método de trabajo iterativo se han analizado diferentes opciones desde el punto de vista del impacto ambiental. Obtenidos los resultados expuestos en el anterior apartado, se llega a una propuesta de proyecto en la que se minimizan los impactos ambientales.

Así, se opta por realizar una estructura aérea de madera, que demanda menor cantidad de energía primaria y, además, ésta procede en su mayor parte de fuentes renovables (70%). Como se observa en la Tabla 11, realizando la estructura aérea en madera en vez de acero, la PED se reduce un 38.3% en valor total y, si se compara la energía procedente de fuentes no renovables, la reducción es del 80.2%. El resto de impactos también se reduce utilizando madera, a destacar el ODP que se reduce a menos de una quinta parte respecto a la opción en acero.

En cuanto al hormigón armado utilizado en el proyecto (cimentación y solera), se elige un hormigón cuyo cemento está elaborado con un 30% de cenizas volantes (CEM II/B-V). De esta manera, como se puede ver en la Tabla 12, se reduce un 10% de PED respecto al mismo volumen de hormigón elaborado con CEM I. Se observa también una reducción en el resto de impactos, entre los que destacan el GWP un 20%, el AP un 25% y el SFP un 22%.

Para la envolvente el proceso puede alargarse más que en los sistemas anteriores pues las opciones que se pueden encontrar en el mercado son prácticamente infinitas. Como se explica en el apartado anterior, el análisis se realiza sobre una muestra de cuatro opciones de cubierta y seis de fachada. En base a los resultados obtenidos, se propone una cubierta tipo Deck y fachadas que combinan planos opacos realizados en fachada ventilada con paneles GRC; y planos permeables a la luz, de muros cortina con paneles de doble vidrio y perfiles de aluminio. Para evitar el deslumbramiento los planos opacos se proponen en la parte inferior de la nave (excepto en la entrada) permitiendo también la posible colocación de otros elementos necesarios para la práctica deportiva, gradas, etc. El aspecto final de la nave se muestra en las Fig 41 y 43. La Fig 42 presenta la documentación básica de la propuesta: planta y alzados.

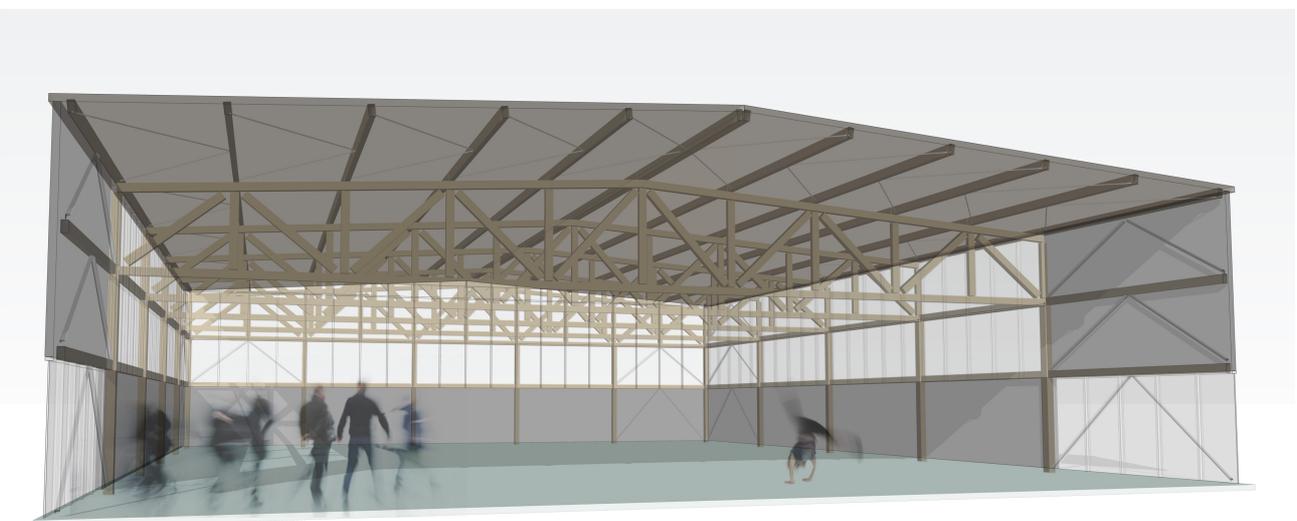


Fig 41. Imagen del espacio interior.

A. DOCUMENTACIÓN GRÁFICA DE LA PROPUESTA

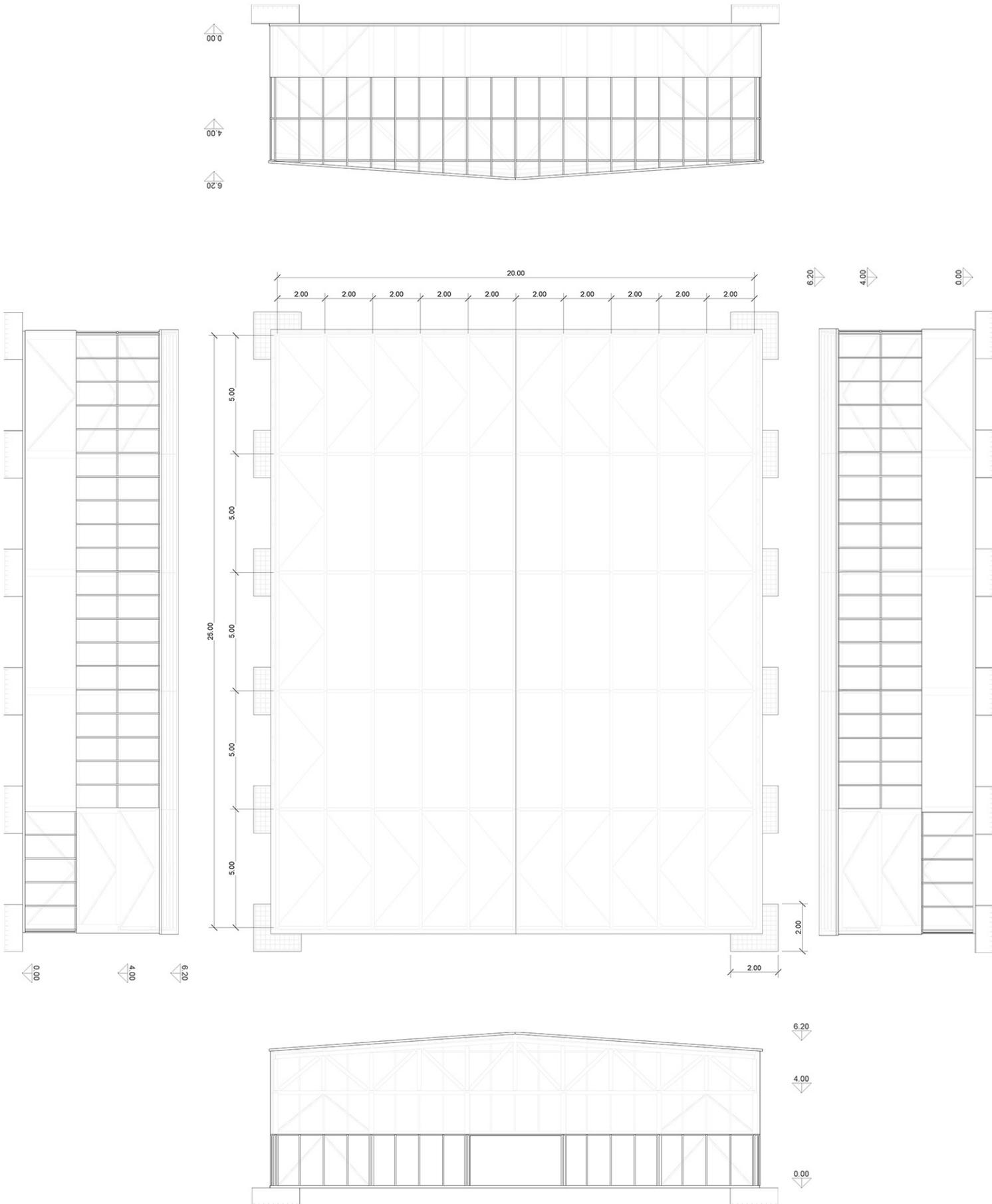


Fig 42. Planta y alzados de la propuesta (E 1:200 aprox).

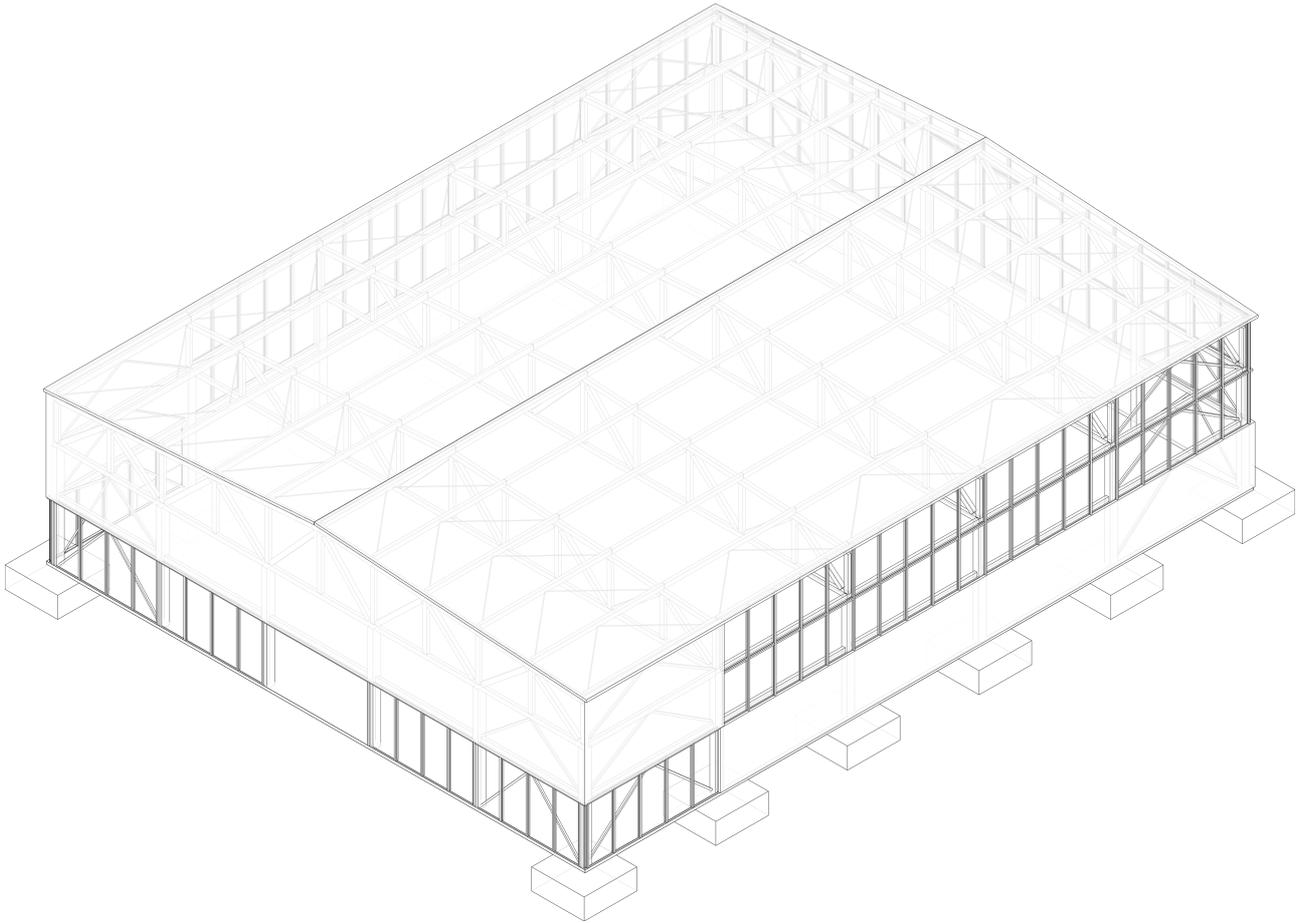


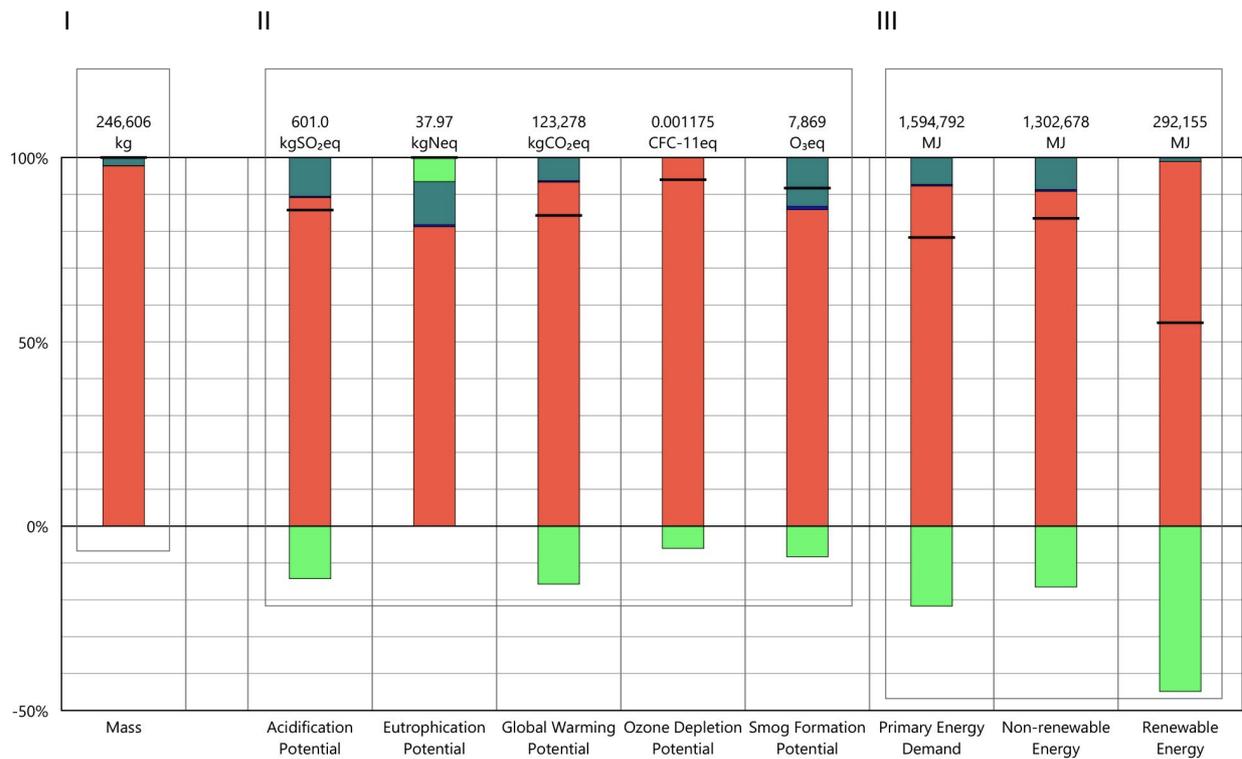
Fig 43. Imagen exterior de la propuesta.

B. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LA PROPUESTA DE PROYECTO

Siguiendo la metodología presentada, el ciclo de vida de la propuesta final se evalúa en términos de siete categorías organizadas en tres grupos:

- I. Masa
- II. TRACI
 - ▶ Acidificación
 - ▶ Eutrofización
 - ▶ Calentamiento global
 - ▶ Agotamiento del ozono
 - ▶ Formación de smog
- III. Energía
 - ▶ No renovable
 - ▶ Renovable

Se procede a discutir los resultados en función de las fases de vida desde diferentes puntos de vista. La Fig 44 presenta los resultados del total del edificio mostrando sus cargas y sus créditos (valor que actúa sobre en el impacto restando parte de la carga como se explica más adelante). De este resultado global se pasa analizar en detalle los impactos que tienen los materiales desde varios enfoques: en la Fig 45, según la familia de material (metales, plásticos...); en las Fig 47 y 49 según los materiales específicos (acero galvanizado, aluminio, madera...) y en la Fig 48 según su función en el edificio (estructura, fachada...).



Legend

— Net value (impacts + credits)

Life Cycle Stages

- Manufacturing [A1-A3]
- Transportation [A4]
- Maintenance and Replacement [B2-B4]
- End of Life [C2-C4, D1]

Fig 44. Impactos según fases del ciclo de vida.

La Fig 44 muestra los resultados de cada impacto desglosados en las fases del ciclo de vida. Como se ve, en el caso de algunos impactos y durante la fase de fin de vida los impactos tienen un valor por debajo de cero, lo que significa que su aporte es positivo en el total del impacto, es lo que se denominan “créditos”. Por ejemplo, materiales que pueden ser reciclados o reutilizados, restarán parte del impacto. El valor neto de cada impacto es el que muestra la línea gruesa, resultado de restar los créditos a las cargas en cada impacto.

Se comprueba de nuevo que la mayor parte de los impactos se producen en la fase de fabricación de los materiales.

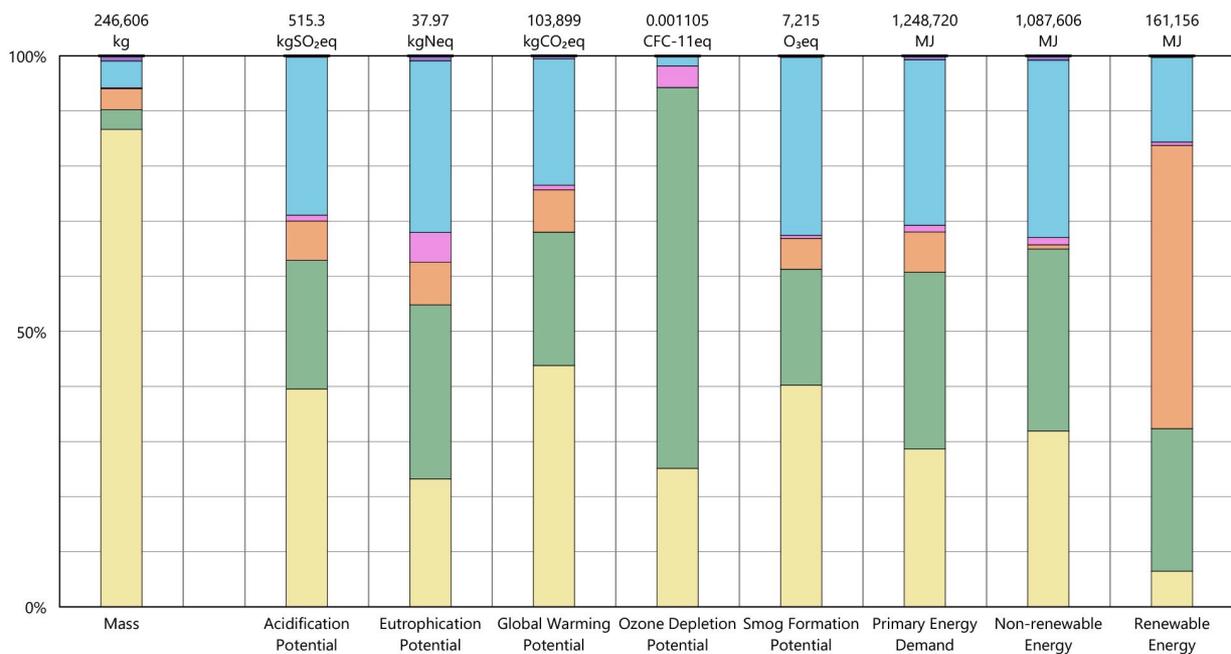
Las Fig 45 y 47 muestran la gráfica desglosada en familias de materiales y la proporción que en cada impacto tienen los distintos elementos que engloba cada tipología, respectivamente. En ambas aparece el valor neto de cada impacto en la parte superior, (tras hacer el cálculo de cargas - créditos a cada material durante su ciclo de vida).

Se observa que casi el 90% de la masa total del edificio corresponde a los elementos de hormigón, y dentro de ellos, casi la totalidad es la correspondiente a la cimentación y solera, lo cual es común en proyectos de naves con poco peso propio en los cuales los elementos inferiores de hormigón mantienen el edificio anclado al terreno.

La energía demandada se utiliza principalmente en la producción de los materiales de envolvente, seguidos de lejos por los elementos de hormigón y en último lugar la estructura aérea, como se ha explicado en el apartado 5.1. La mayor parte de la energía procedente de fuentes renovables es la empleada en la fabricación de la estructura de madera.

En el resto de categorías de impacto la proporción de cada tipología de material se mantiene más o menos constante, a excepción del potencial de agotamiento del ozono, donde se observa que los elementos metálicos son los más perjudiciales.

En la Fig 46 se muestran los resultados de PED y GWP según la tipología de material.



Legend

Divisions

- 03 - Concrete
- 05 - Metals
- 06 - Wood/Plastics/Composites
- 07 - Thermal and Moisture Protection
- 08 - Openings and Glazing
- 09 - Finishes

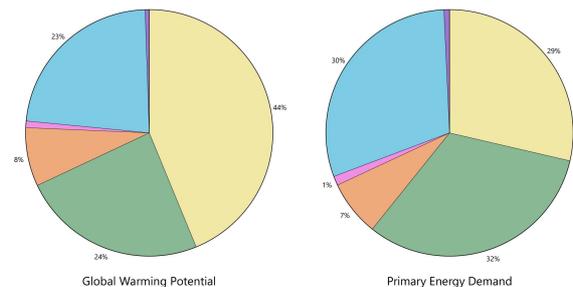
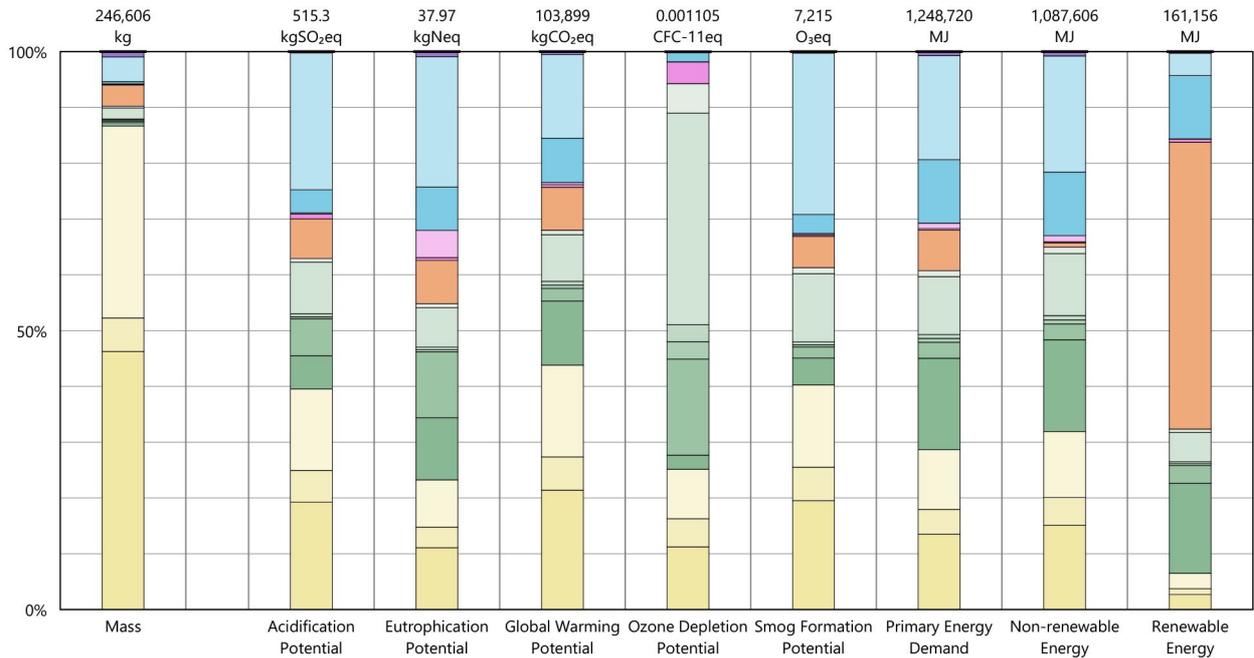


Fig 45. Impactos según familia de material.

Fig 46. GWP y PED según tipología de material.



Legend

03 - Concrete

- Cast-in-place concrete, reinforced structural concrete, 3000 psi (20 Mpa)
- Precast concrete structural panel, glass fiber-reinforced concrete
- Reinforced concrete footing

05 - Metals

- Aluminum, sheet
- Stainless steel, hardware
- Steel, angle
- Steel, bar
- Steel, form deck
- Steel, plate

06 - Wood/Plastics/Composites

- Domestic softwood

07 - Thermal and Moisture Protection

- Mineral wool, board, manufacturer specific, EPD - Knauf
- Polyethelene sheet vapor barrier (HDPE)

08 - Openings and Glazing

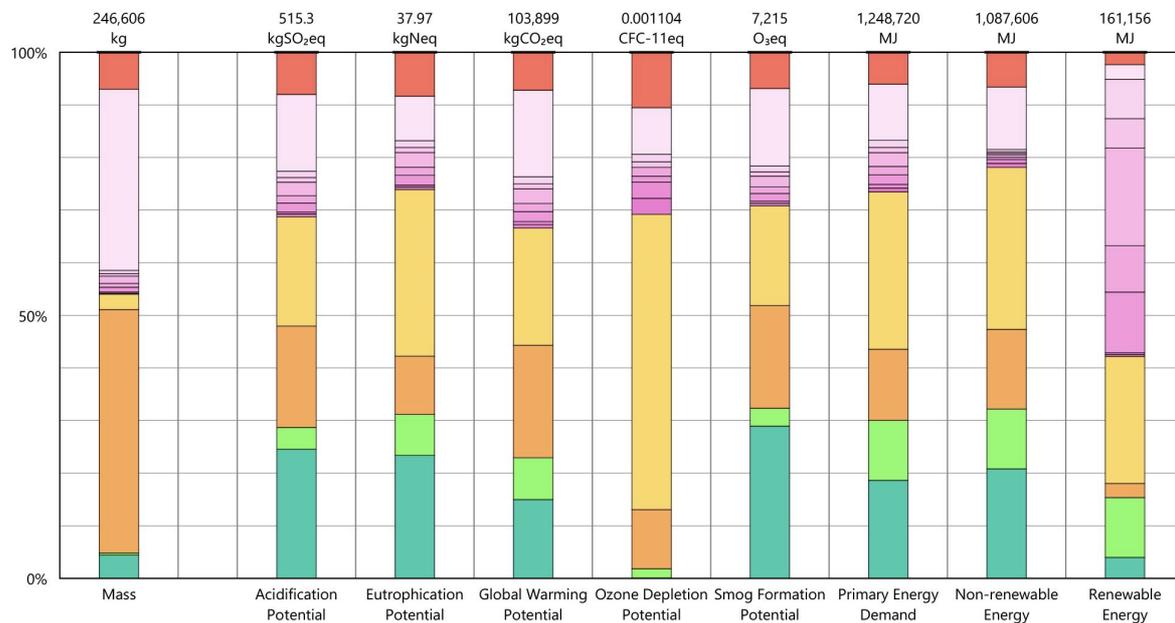
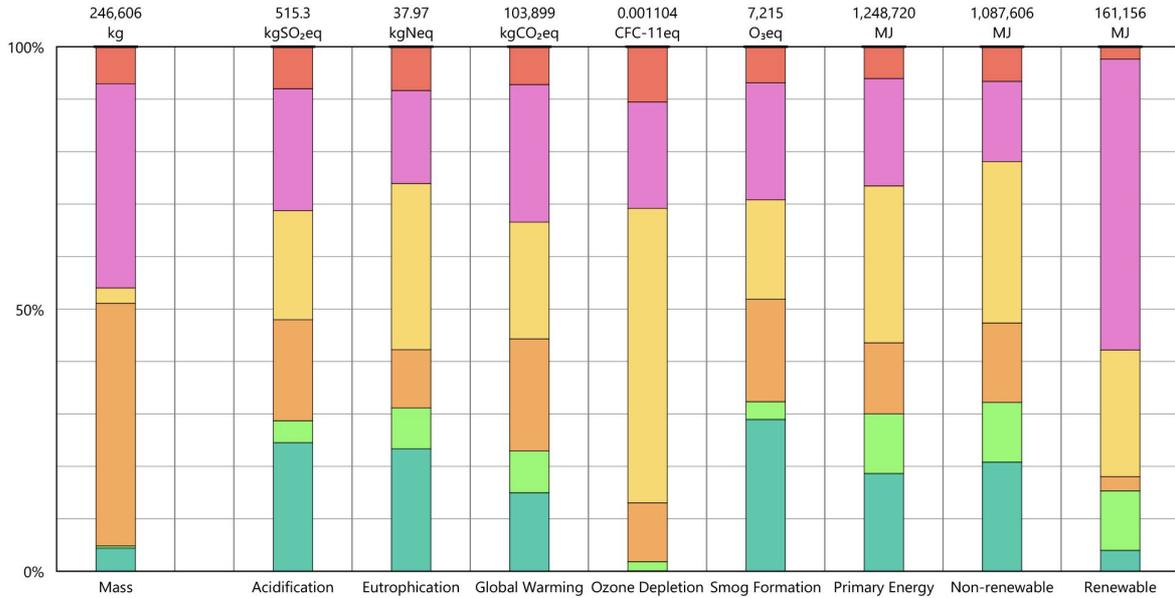
- Aluminum mullion, anodized
- Glazing, double pane IGU

09 - Finishes

- Wall board, gypsum

Fig 47. Impactos según materiales.

Otro enfoque interesante es la organización de los resultados según la aportación al impacto de cada sistema dentro del edificio. La Fig 48 muestra el total por sistema (cubierta, fachada ventilada, muro cortina, suelos, estructura) y la Fig 49 muestra cada sistema dividido en los materiales que lo componen. Se comprueba cómo el mayor protagonismo es de los materiales que conforman la envolvente.



Legend

Curtain Panels

Panel de sistema: Acristalado

Curtain Wall Mullions

Montante rectangular: Montante rectangular - 5 x 10 cm

Floors

Solera - 10 cm

Roofs

Plana tipo deck - 10 cm

Structure

- Barra redonda: 20mm
- L-Ángulos: CAE60x6
- Mader C24: 200 x 300
- Madera C24 - softwood: 100X160
- Madera C24 - softwood: 100X180
- Madera C24 - softwood: 120X160
- Madera C24 - softwood: 140X160
- Zapata-Rectangular: 2000 x 2000 x 800mm

Walls

Panel GRC

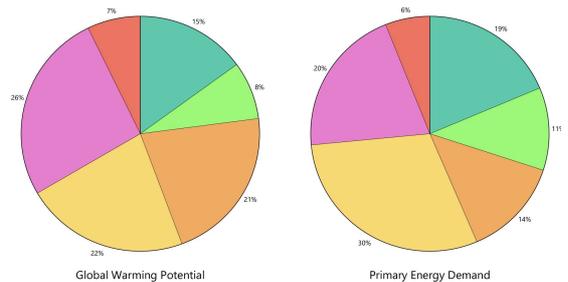


Fig 48. Impactos según sistema.

Fig 49. Impactos según materiales de sistema.

Fig 50. GWP y PED según materiales de sistema.

6. CONCLUSIONES

Para finalizar este trabajo, tras realizar un repaso al estado de la sostenibilidad enfocado al sector de la construcción y un caso de estudio en el que se integran los impactos ambientales como un criterio de proyecto, se exponen las conclusiones alcanzadas.

Por un lado, se observa que el ritmo actual de la actividad humana en general y, en este caso, del sector de la construcción, no puede sostenerse indefinidamente y es urgente un cambio que permita reducir los impactos medioambientales. En el caso de los proyectos de construcción la mejora en los impactos de los proyectos pasa por integrar criterios de sostenibilidad en todas las fases: desde la planificación y primeras etapas de proyecto (cuando más peso tienen las decisiones tomadas) a lo largo de toda la vida útil hasta la fase de fin de vida, incluyendo esta última. Para lograr esto, se hace necesaria la colaboración interdisciplinar de los profesionales involucrados en el proyecto, donde se observa que hay una falta de formación en materia de integración de la sostenibilidad. La formación de profesionales del sector en este sentido y la creación de un escenario en el que haciendo construcción sostenible todos ganen, es clave para evitar que se interpongan otros intereses en la meta común de lograr una construcción sostenible.

En cuanto al caso de estudio desarrollado, en el que se han comparado propuestas para un mismo edificio observando o no criterios de impacto ambiental, se extraen las siguientes conclusiones:

- ▶ Un método de trabajo iterativo es más adecuado para la integración de criterios de sostenibilidad ambiental en un proyecto que el método de trabajo tradicional basado en certificaciones del edificio terminado.
- ▶ BIM presenta un gran potencial para incluir criterios de sostenibilidad en la elaboración de proyectos, gracias a la gran cantidad de información que maneja. A día de hoy, sus posibilidades no se están utilizando al máximo.
- ▶ La envolvente de los edificios es la parte que más impactos ambientales conlleva y la que mayor potencial de reducción presenta. El consumo de energía en la envolvente representa casi el 70% del total y en el resto de impactos su valor se encuentra entre el 50% y el 90% del total.
- ▶ La mayoría de los materiales de construcción tienen una gran dependencia de fuentes de energía no renovables durante todo su ciclo de vida.
- ▶ La utilización de CEM II/B-V, con cenizas volantes en su composición, en lugar de CEM I, que no incluye materiales de sustitución, reduce el consumo de energía un 10% y el potencial de calentamiento global un 20%.
- ▶ El empleo de madera en lugar de acero en la estructura aérea reduce el impacto ambiental en todas las categorías, a destacar el consumo de energía casi un 40%. Dentro del mismo, la energía procedente de fuentes renovables aumenta en un 85% pasando a representar el 70% del total de energía utilizada en la construcción de la estructura si se realiza en madera. Otros impactos que se reducen considerablemente son el potencial de calentamiento global en un 24% y el potencial de agotamiento de la capa de ozono en un 83%.
- ▶ La reducción de los impactos que se logra con la realización de la estructura aérea en madera tiene poca repercusión en la mejora de los impactos totales, ya que los impactos de la estructura representan en torno al 10% del total.
- ▶ Los materiales aplicados en spray presentan impactos muy elevados en varias categorías, sobre todo en el potencial de agotamiento del ozono y de calentamiento global, a causa de los compuestos que incluyen en su composición o aplicación.
- ▶ Los sistemas cuya vida útil es más corta que la prevista para el edificio presentan mayores impactos que aquellos cuya vida útil es más larga, pues deben ser sustituidos, generando impactos de fin de vida, y reemplazados por sistemas nuevos, produciendo impactos de nuevo en todas las fases.

REFERENCIAS

- ▶ Alarcón Núñez, Deissy Bibiana. "Modelo integrado de valor para estructuras sostenibles." (2006).
- ▶ Bunn, Roderic. "Sustainable building services in development countries: the challenge to find best-fit technologies." *Industry and environment* 26.2-3 (2003): 46-51.
- ▶ Buyle, Matthias, Johan Braet, and Amaryllis Audenaert. "Life cycle assessment in the construction sector: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26 (2013): 379-388.
- ▶ Cagiao, J., et al. "Huella ecológica del cemento: cálculo de la huella ecológica de una industria cementera y propuesta de medidas de ingeniería sostenible destinadas a su reducción." Universidad da Coruña, ETSICCP da Coruña, Fundación de la Ingeniería Civil de la Coruña, Laboratorio de Ingeniería Sostenible. Coruña (2010).
- ▶ EN 15978:2011—Sustainability of construction works—assessment of environmental performance of buildings—calculation method; 2011. p. 59.
- ▶ Fernández-Sánchez, Gonzalo, and Fernando Rodríguez-López. "Propuesta para la integración de criterios sostenibles en los proyectos de ingeniería civil: un caso práctico." *Informes de la Construcción* 63.524 (2011): 65-74.
- ▶ Finkbeiner, Matthias, et al. "The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044." *The international journal of life cycle assessment* 11.2 (2006): 80-85.
- ▶ Griffiths, A. (2016). Entramados prefabricados de madera para un recinto deportivo en Austria. Consultado el 15 de noviembre de 2017, página web: <http://www.madera21.cl/?p=2987>
- ▶ International Standard Organization. "ISO 14040: Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework". (1997).
- ▶ Kestner, Dirk M., Jennifer Goupil, and Emily Lorenz. "Sustainability guidelines for the structural engineer." American Society of Civil Engineers, (2010).
- ▶ KT Innovations. (2016). Consultado el 26 de septiembre de 2017, página web: <http://choosetally.com>
- ▶ La acidificación del medio ambiente. (2015). Consultado el 15 de noviembre de 2017, Generalitat Valenciana, página web de la Conselleria de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo Rural: <http://www.agroambient.gva.es/web/calidad-ambiental/la-acidificacion-del-medio-ambiente>
- ▶ La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. (2015). Consultado el 8 de noviembre de 2017, Organización de Naciones Unidas, página web de sustainable development: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- ▶ MADERA PINOSORIA, S.L. (n.d.). Consultado el 14 de noviembre de 2017, página web: <http://www.maderapinosoria.com>
- ▶ Mapa comparativo de países: Consumo de electricidad per cápita - Mundo. (n.d.). Consultado el 26 de noviembre de 2017, página web: <https://www.indexmundi.com/map/?v=81000&l=es>
- ▶ Maroto, Pablo. "Building Information Modeling (BIM) y la sostenibilidad. El Blog de Knauf, 2014

- ▶ Maydl, Peter. "Sustainable engineering: state-of-the-art and prospects." *Structural Engineering International* 14.3 (2004): 176-180.
- ▶ Ortiz-Rodríguez, Oscar, Francesc Castells, and Guido Sonnemann. "Life cycle assessment of two dwellings: One in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development." *Science of the total environment* 408.12 (2010): 2435-2443.
- ▶ Plataforma Arquitectura. (2016). Consultado el 7 de noviembre de 2017, página web: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl>
- ▶ Prieto, F. et al. "Sostenibilidad en España 2014". Observatorio de la Sostenibilidad (2014).
- ▶ Robin M. Feller. "Promoting Sustainable Design Through Life-Cycle Assessment Applications". Tally, 2017.
- ▶ Rodríguez, Fernando, and Gonzalo Fernández. "Ingeniería sostenible: nuevos objetivos en los proyectos de construcción." *Revista ingeniería de construcción* 25.2 (2010): 147-160.
- ▶ Rogers, Richard, Philip Gumuchdjian, y Crispin Tickell. "Ciudades para un pequeño planeta." No. 574.5268 R6. Gustavo Gili, (2000).
- ▶ Schaeffer, G. J., and H. Akkermans. "CRISP, distributed intelligence in critical infrastructure for sustainable power-D5. 3 final summary report." EC-funded Thematic Network-5th Framework Programme-Energy, Environment and Sustainable Development-Key Action:" City of Tomorrow and Cultural Heritage", Tech. Rep. ENK5-CT-2002-00673 10 (2006).
- ▶ Simonen, Kathrina. "Life cycle assessment". Routledge, (2014).
- ▶ Tassielli, Giuseppe, Pietro Alexander Renzulli, and Bruno Notarnicola. "LIFE CYCLE ASSESSMENT." *Life Cycle Approaches to Sustainable Regional Development* (2016): 65.
- ▶ Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts (TRACI). (n.d.). Consultado el 13 de noviembre de 2017, United States Environmental Protection Agency, página web de Safer Chemicals Research: <https://www.epa.gov/chemical-research/tool-reduction-and-assessment-chemicals-and-other-environmental-impacts-traci>
- ▶ UN, General Assembly. "Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development." A/RES/70/1, 21 October, (2015).
- ▶ UNEP, Earthscan. "Global environmental outlook: 3." Past, present and future perspectives. Earthscan Publications, London (2002).
- ▶ United Nations. "Agenda 21: The United Nations Programme of Actions from Rio." United Nations, New York, 1992.
- ▶ Valdivieso Fernández, Raquel. *Sostenibilidad en el sector de la construcción. Sostenibilidad en estructuras y puentes ferroviarios*. Diss. ETSI_Civil, 2016.
- ▶ Worldwide, Life Cycle Assessment. "LCA Compendium-The Complete World of Life Cycle Assessment."
- ▶ Yuan, H. Achieving Sustainability in Railway Projects: Major Stakeholder Concerns. *Project Management Journal*, 48(5) (2017): 115–132.