



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN  
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

## **TESIS DOCTORAL**

Estudio de la Eficiencia Energética y la Sostenibilidad de los sistemas de generación de energía en un edificio terciario de la Universidad de Jaén mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

José Adolfo Lozano Miralles  
2020

**Escuela Politécnica Superior de Jaén**  
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera  
Programa de Energías Renovables

**Autor**

José Adolfo Lozano Miralles

**Tutor de tesis**

José Manuel Palomar Carnicero

**Directores de tesis**

Rafael López García

Francisco Javier Rey Martínez

A mi padre, que desde el cielo me mandó a la mejor persona que te puede  
acompañar en el camino de la vida

## **AGRADECIMIENTOS**

A todas aquellas personas que se han prestado desinteresadamente en el desarrollo de esta tesis, que su con su experiencia me han guiado a tomar el mejor camino en cada momento.

Muchas gracias a todos.

# ÍNDICE GENERAL

## **Capítulo 1. Introducción y justificación.....14**

- 1.1. Introducción.
- 1.2. Motivación de la investigación.
- 1.3. Cronograma del trabajo.
- 1.4. Metodología empleada.
- 1.5. Consumo de energía mundial.
- 1.6. La tecnosfera.
- 1.7. Situación de la edificación.
- 1.8. Política energética de la Unión Europea.

## **Capítulo 2. Estado del arte y de la investigación.....34**

- 2.1. Antecedentes.
- 2.2. Eficiencia energética en los edificios terciarios.
- 2.3. Fundamentos de los métodos existentes de evaluación.
- 2.4. Indicadores energéticos.
- 2.5. Métodos de cálculo.
- 2.6. BREEAM. Building Research Establishment Environmental Assessment.
- 2.7. Passiv Haus.
- 2.8. LEED. Leadership in Energy and Environmental Design.
- 2.9. Edificios energía cero.
- 2.10. Los sistemas de generación de energía.
- 2.11. La sostenibilidad en los edificios terciarios.
- 2.12. El futuro de los sistemas energéticos.

## **Capítulo 3. Planteamiento del problema.....65**

- 3.1. Problema energético en Andalucía y en el sector terciario.
- 3.2. Los consumos energéticos en la Universidad de Jaén.
- 3.3. Declaración de política en sostenibilidad de la Universidad de Jaén.
- 3.4. El ciclo de vida del edificio.
- 3.5. Selección del edificio y de los sistemas de producción de energía.
- 3.6. Descripción de los sistemas de producción de energía.
- 3.7. Planteamiento general de la metodología experimental y de simulación.
- 3.8. Calificación energética. LIDER-CALENER. Limitación de la demanda energética. Introducción de las coordenadas.

## **Capítulo 4. Metodología general de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....93**

- 4.1. Una herramienta completa para la evaluación ambiental.
- 4.2. Algunos hitos importantes en sostenibilidad.
- 4.3. Normativa de aplicación.
- 4.4. Herramientas de calificación basadas en el ACV. Software disponible.
- 4.5. Metodología ACV con SimaPro.
  - 4.5.1. Objetivo y alcance.
  - 4.5.2. Inventario

- 4.5.3. Evaluación del Impacto Ambiental.
- 4.6. Análisis de resultados.
  - 4.6.1. Incertidumbre.
  - 4.6.2. Análisis de sensibilidad
  - 4.6.3. Análisis de gravedad
  - 4.6.4. Resultado del inventario
- 4.7. Análisis de resultados.

## **Capítulo 5. Desarrollo de la investigación mediante el ACV.....130**

- 5.1. El edificio y sus instalaciones.
  - 5.1.1. Consumo anual de energía.
- 5.2. ACV de un sistema de bomba de calor aire/aire como contribución a una energía renovable.
  - 5.2.1. Objetivo y Alcance.
  - 5.2.2. Inventario de los equipos.
  - 5.2.3. Análisis de Ciclo de Vida.
  - 5.2.4. Evaluación del Impacto Ambiental.
  - 5.2.5. Análisis de los resultados.
  - 5.2.6. Conclusiones.
- 5.3. ACV de un sistema de una caldera de Pellets e como contribución a una energía renovable.
  - 5.3.1. Objetivo y Alcance.
  - 5.3.2. Inventario de los equipos.
  - 5.3.3. Análisis de Ciclo de Vida.
  - 5.3.4. Evaluación del Impacto Ambiental.
  - 5.3.5. Análisis de los resultados.
  - 5.3.6. Conclusiones.
- 5.4. ACV comparativo de un sistema de bomba de calor aire/aire y una caldera de Pellets aplicados a un edificio terciario.
  - 5.4.1. Objetivo y Alcance.
  - 5.4.2. Inventario de los equipos.
  - 5.4.3. Análisis de Ciclo de Vida.
  - 5.4.4. Evaluación del Impacto Ambiental.
  - 5.4.5. Análisis de los resultados.
  - 5.4.6. Conclusiones.

## **Capítulo 6. Conclusiones.....155**

- 6.1. Conclusiones particulares.
  - 6.1.1. ACV de un sistema de bomba de calor.
  - 6.1.2. ACV de un sistema de caldera de biomasa.
  - 6.1.3. ACV comparativo entre un sistema de bomba de calor y un sistema de caldera de biomasa.
- 6.2. Conclusiones generales.

## **Capítulo 7. Resultados de las investigaciones.....163**

- 7.1. Artículos publicados relacionados con la tesis.
  - 7.1.1. Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de una bomba de calor aire/aire aplicada a un edificio terciario como contribución a una energía renovable.
  - 7.1.2. Análisis de Ciclo de Vida (ACV) comparativo de una bomba de calor aire/aire y una caldera de Pellets aplicada a un edificio terciario.
  
- 7.2. Artículos publicados relacionados con la sostenibilidad en la edificación y la industria.
  - 7.2.1. Multi-objective optimization and life cycle Assessment of eco-friendly cryogenic N<sub>2</sub> assisted turning of Ti-6Al-4V.
  - 7.2.2. Comparative study of the environmental impact of the manufacture of traditional bricks and bricks of porous cooked clay with biological basics through Life Cycle Analysis (LCA).
  - 7.2.3. LCA case study to LED outdoor lighting luminaries as circular economy solution to local scale.
  - 7.2.4. Environmental criteria for a assessing the competitiveness of public tenders with the replacement of large-scale LEDs in the outdoor lighting of cities as a key element for sustainable development: case study applied with Promethee methodology.
  
- 7.3. Artículos en trámite de publicación.
  - 7.3.1. Aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) a un sistema de caldera de Pellets en un edificio terciario.

## **Capítulo 8. Futuras líneas de investigación.....275**

### **Anexos.....277**

#### Anexo 1: Definiciones técnicas

- Conceptos generales
- Conceptos de sostenibilidad

#### Anexo 2: Relación de datos base para la tesis

- 2.1. Datos estadísticos
  - 2.1.1. Coordenadas del edificio en LIDER
  - 2.1.2. Valores de consumos de energía
  - 2.1.3. Medidas de ahorro y eficiencia energética

#### Anexo 3: Documentos técnicos

- 3.1 Datos técnicos de los sistemas de producción de energía
  - 3.1.1. Fichas técnicas de los sistemas
  - 3.1.2. Inventario de los sistemas

#### Anexo 4: Méritos académicos

- 4.1. Jornadas doctorales
- 4.2. Asistencia a Congresos
- 4.3. Actividades docentes.
  - 4.3.1. Clases impartidas.
  - 4.3.2. Cursos impartidos.

## **RESUMEN**

Desde la revolución industrial, los sistemas de generación de energía han evolucionado. Se ha buscado por parte de la industria, la innovación mediante la investigación, y se han conseguido mejores sistemas con mayores prestaciones. Todo ello para que las personas que desarrollan su vida o su trabajo dentro de los edificios obtengan un mejor confort. En definitiva, unas mejores condiciones de vida.

Los sectores edificatorio e industrial vienen afectados por diversas razones que han provocado un aumento excesivo en el consumo de energía, y por lo tanto, un efecto rebote en el medioambiente. En la arquitectura, hemos visto a lo largo de los últimos años, cómo se demandaba más una arquitectura “preciosista”, dejando olvidada aquella que tenía en cuenta las condiciones topográficas, climáticas, de orientación, con utilización de materiales locales, etc... y que ha sido utilizada hasta el siglo XVIII y comienzos del siglo XIX. Por otro lado, el sector industrial se ha centrado en los últimos tiempos en la búsqueda de nuevos sistemas más eficaces, pero no más eficientes. Avances en la tecnología han permitido que se desarrollen nuevos productos que han necesitado mayor energía para su funcionamiento, o que en su diseño incorporan nuevos materiales, cuyo origen provoca la invasión en zonas vírgenes o sin explotar.

Esta es la razón, del por qué el consumo de energía en los edificios públicos, ha tenido un incremento ascendente, y asociado a ello, ha provocado que el sector industrial y edificatorio sea con un 60% el que esté en cabeza en las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, y que tienen su origen en la generación de dicha energía.

Prácticamente la totalidad de los sectores se apoyan en el consumo de energía que se obtiene de fuentes fósiles. El petróleo, el gas, la electricidad, han generado un sistema económico que ha permitido a la humanidad mejorar sus condiciones de vida, pero sin tener en cuenta que en la generación de esta energía se producen efectos contrarios a la propia vida, y este sistema ha puesto al planeta en una situación insostenible.

En las últimas décadas, y fomentado por las políticas energéticas y las cada vez más exigentes normativas técnicas, se ha comenzado a tener en cuenta conceptos como la eficiencia energética y la sostenibilidad. Dos términos que

aunque se enmarquen en fines distintos, son complementarios y deben trabajar conjuntamente para alcanzar los retos que nos marca el futuro energético. El primer concepto tiene como objetivo reducir el consumo de energía, optimizando los procesos productivos y el uso de la energía, mientras que el segundo, busca el desarrollo asegurando las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras. En resumen, se busca promover el progreso económico y social respetando los ecosistemas naturales y la calidad del medio ambiente.

Términos como energía renovable, energía limpia, reciclaje, reutilización, compra sostenible, economía circular, huella ecológica, el día del contragiro, biodiversidad, etc...se han ido incorporando a nuestro vocabulario, y están siendo utilizados en todos los sectores. Algunas veces erróneamente o con intereses puramente económicos.

Como se ha comentado anteriormente, la nueva normativa que afecta a la edificación y a la industria, ha venido a marcar unas nuevas pautas en eficiencia energética. El Código Técnico de la Edificación (CTE) y el Reglamento de Instalaciones Térmicas de los edificios (RITE), son los dos marcos de referencia en los que nos moveremos para el desarrollo de la presente investigación y que nos marca las fases de la misma.

La investigación se desarrolla en las cinco siguientes fases:

En una primera fase, se realiza una recopilación de la bibliografía y estudios que se disponen sobre la eficiencia energética en los edificios públicos, sobre los sistemas de simulación energética y sobre el problema energético que se produce tanto en la edificación como en la industria. Así mismo se estudian los sistemas que habitualmente son proyectados para cubrir la demanda de energía en los edificios y que suponen unos de los puntos críticos en el consumo de energía (Capítulos 01, 02, 03 y 04).

En una segunda parte, se realiza una simulación energética de un edificio terciario de la Universidad de Jaén, mediante un software (Calener-VYP) de referencia para la calificación energética de los edificios medianos terciarios. Este procedimiento general de cálculo nos permitirá una aproximación a los valores de demanda energética del edificio, que se complementarán y compararán con los consumos reales del mismo (Capítulos 05 y 06).

En una tercera fase, se concretan los objetivos específicos. Se explican conceptos sobre La metodologías de Análisis de Ciclo de Vida y analizaremos la sostenibilidad del sistema de generación de energía del edificio referencia, mediante una Bomba de calor aire-aire (Capítulos 07 y 08).

En una cuarta fase, dentro de los objetivos marcados, analizaremos la sostenibilidad de un sistema de caldera de biomasa, concretamente de pellets, como alternativa a la generación de energía del mismo edificio, y con la misma metodología (Capítulo 08).

Para terminar, y en una quinta fase, se procederá a realizar un análisis comparativo entre los dos sistemas analizados anteriormente y que nos marcará el final del presente trabajo y el comienzo de nuevas líneas de investigación. En esta fase, se exponen las conclusiones obtenidas, discriminando entre conclusiones técnicas, proyectuales, experimentales, tecnológicas y medioambientales (Capítulos 08 y 09).

Este estudio es el inicio de otras investigaciones futuras, con pretensiones en evaluar los ACV completos de todos los sistemas del edificio, y volver a evaluarlos con las propuestas de mejora definidas. Unido a otros ACV arquitectónicos se podrá comprobar, si la sostenibilidad influye de manera importante en la eficiencia energética del edificio, y por tanto, dando mayor consideración a su impacto ambiental (Capítulos 10 y 11).

En resumen, **reducir el impacto ambiental de los edificios públicos considerando el ciclo de vida completo de todos los sistemas del edificio, mediante una metodología que integre criterios de diseño, medioambientales, económicos y que favorezca la eficiencia energética.**

## ABSTRACT

Since the industrial revolution, power generation systems have evolved. Innovation has been sought by industry through research, and better systems have been obtained with higher performance. All this for people who get their life or work inside the buildings getting better comfort. In short, better living conditions.

The building and industrial sectors are affected for various reasons that have caused an excessive increase in energy consumption, and therefore, a rebound effect on the environment. In architecture, we have seen in recent years, how a "precious" architecture was more demanded, leaving behind one that takes into account topographic, climatic, orientation conditions, using local materials, etc. It has been used until the 18th century and the beginning of the 19th century. On the other hand, the industrial sector has recently focused on the search for new systems that are faster, but not more efficient. Advances in technology have allowed new products to be developed that have needed more energy for their operation, or in their design they incorporate new materials whose origin causes invasion in virgin or unexploited areas.

This is the reason, why the consumption of energy in public buildings, has had an upward increase, and associated with it, has caused that the industrial and building sector is with 60% that is in the lead in the emission of CO<sub>2</sub> to the atmosphere, and that have their origin in the generation of said energy.

Virtually all sectors rely on the energy consumption obtained from fossil sources. Oil, gas, electricity, have generated an economic system that has allowed humanity to improve their living conditions, but without taking into account that in the generation of this energy there are effects contrary to one's own life, and this system It has put the planet in an unsustainable situation.

In recent decades, and encouraged by energy policies and increasingly demanding technical regulations, concepts such as energy efficiency and sustainability have begun to be taken into account. Two terms that, although

they are framed for different purposes, are complementary and must work together to meet the challenges that the energy future marks. The first concept aims to reduce energy consumption, optimizing production processes and the use of energy, while the second one seeks development, ensuring the needs of the present without compromising the needs of future generations. In summary, it seeks to promote economic and social progress respecting natural ecosystems and the quality of the environment.

Terms such as renewable energy, clean energy, recycling, reuse, sustainable purchasing, circular economy, ecological footprint, overshoot day, biodiversity, etc ... have been incorporated into our vocabulary, and are being used in all sectors. Sometimes erroneously or with purely economic interests.

As mentioned above, the new regulations that affect the building and industry have come to set new standards in energy efficiency. The Technical Building Code (CTE) and the Regulation of Thermal Installations of buildings (RITE), are the two frames of reference in which we will move for the development of this research and that marks the phases of it.

The research is carried out in the following five phases:

In a first phase, a compilation of the literature and studies that are available on energy efficiency in public buildings, on energy simulation systems and on the energy problem that occurs both in the building and in the industry is carried out. Likewise, the systems that are usually projected to meet the energy demand in buildings and represent some of the critical points in energy consumption are studied.

In a second part, an energy simulation of a tertiary building of the University of Jaén is carried out, using a reference software (Calener-VYP) for the energy qualification of medium-sized tertiary buildings. This general calculation procedure will allow us to approximate the energy demand values of the building, which will be complemented and compared with the actual consumption of the building.

In a third phase, the specific objectives are specified. We will analyze the sustainability of the power generation system of the reference building, using an air-to-air heat pump using the Life Cycle Analysis methodology.

In a fourth phase, within the objectives set, we will analyze the sustainability of a biomass boiler system, specifically pellets, as an alternative to the energy generation of the same building, and with the same methodology.

Finally, and in a fifth phase, a comparative analysis will be carried out between the two systems previously analyzed and that will mark the end of this work and the beginning of new lines of research. In this phase, the conclusions obtained are exposed, discriminating between technical, project, experimental, technological and environmental conclusions.

This study is the beginning of a deeper and more complete future investigation, with pretensions to evaluate the complete LCA (Life Cycle Assessment) of all the building systems, and to reassess it with the defined improvement proposals. Together with other architectural LCAs, it will be possible to verify whether sustainability has an important influence on the energy efficiency of the building, and therefore, giving greater consideration to its environmental impact.

In summary, **reduce the environmental impact of public buildings considering the complete life cycle of all building systems, using a methodology that integrates design, environmental, economic and energy efficiency criteria.**

## INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

- 1.1. Introducción
- 1.2. Motivación de la investigación
- 1.3. Cronograma de trabajo
- 1.4. Metodología empleada
- 1.5. Consumo de energía mundial
- 1.6. La tecnosfera
- 1.7. Situación de la edificación
- 1.8. Política energética de la Unión Europea.

### 1.1. Introducción

Las primeras medidas encaminadas a solucionar los problemas de consumo energético de los edificios y la industria, tuvieron lugar con la primera crisis energética motivada por el encarecimiento del precio del petróleo. Estas medidas se basaron en el establecimiento de normativas más exigentes y la búsqueda de sistemas constructivos con técnicas y materiales que permitieran un menor gasto energético.

Algunas empresas y corporaciones comienzan a incorporar en sus políticas empresariales, conceptos y líneas de trabajo que tienen en cuenta estudios para poder solucionar estos problemas, y se abren nuevas perspectivas, sobretodo en aspectos como los impactos medioambientales. En este sentido los organismos internacionales generan protocolos, puntos de partida, destinados a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera. Este es el origen del Protocolo de Kioto, que dentro del marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, marcarán un antes y un después en la sostenibilidad del Planeta.

En 1997, la Unión Europea y sus Estados Miembros asumieron, en el ámbito del primer periodo de compromiso del Protocolo de Kioto (2008-2012), la obligación de reducir dichas emisiones en un 8% respecto al año base (1990/1995). Este compromiso se asumió de forma conjunta y, de acuerdo con el artículo 4 del Protocolo de Kioto, se realizó un reparto interno entre los Estados Miembros, por lo que los compromisos asumidos por cada

Estado Miembro varían en función de una serie de parámetros de referencia.

En el caso de España, este reparto supone la obligación de que la media de emisiones netas de gases de efecto invernadero en el período 2008-2012 no supere el 15% del nivel de emisiones del año base (1990/1995). [1].

Es por este motivo, que se crea la ley de Ordenación de la Edificación (LOE) Ley 38/1999, de 5 de noviembre, que culmina con la aparición del CTE (Código Técnico de la Edificación), aprobado el 17 de Marzo de 2006, y que marca las condiciones técnicas que deben cumplir los edificios, para satisfacer, entre otros, los requisitos básicos de ahorro de energía y aislamiento térmico. Así mismo, el Real Decreto 47/2007, crea el procedimiento básico para la calificación energética de los edificios de nueva construcción, estimando que la medida conducirá a un ahorro próximo al 20 % respecto al consumo actual.

La Unión Europea ha comunicado su intención de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% con respecto al año 1990, en el periodo 2013-2020, en línea con el Paquete Europeo de Energía y Cambio Climático.

En la figura 1 se puede ver un cronograma con los acontecimientos más importantes que se han desarrollado en los ámbitos energéticos, climáticos, sostenibles y sociales.

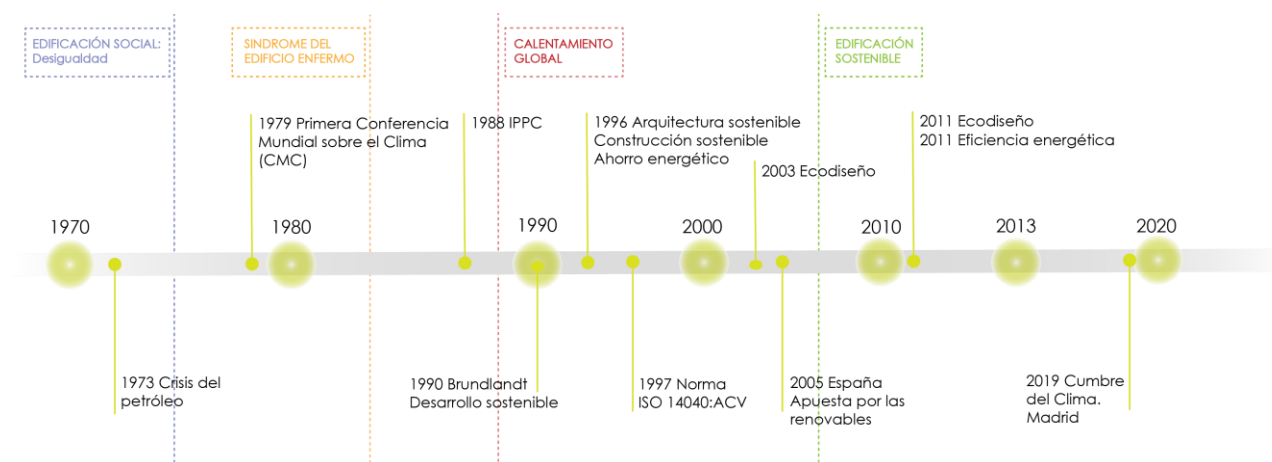


Figura 1: Cronología de sucesos. Elaboración propia.

Si se estudia más concretamente el consumo energético en los edificios públicos, se puede observar que el mayor consumo se genera en los sistemas de climatización, y son varios los factores que influyen en este motivo. Desde el origen de su diseño, pasando por los materiales y sistemas implantados durante su uso, los edificios marcan un punto negro ejemplo de ineficiencia energética.

Tras el cambio medioambiental palpable a raíz de la inmensidad de nueva extensión industrial y urbana, generado en los últimos años, es evidente

que los indicios de deterioro ecológico se hacen cada vez más incuestionables, y por tanto la evaluación del impacto sobre el medio ambiente y las actividades humanas se vuelve más ineludible. Ya no es sólo atribuir a la industria y al transporte el origen principal de contaminación, sino el entorno construido, donde pasamos aproximadamente el 90% de nuestras vidas es gran responsable de dicho deterioro [2].

Se estima que más del 80% de los impactos ambientales que tiene cualquier edificio durante las fases de su ciclo de vida están prefijados desde su **etapa de diseño**. El diseñador o proyectista es el que toma las primeras decisiones para mejorar los resultados medioambientales, es el creador del eje vertebrador para el posterior desarrollo de los productos, controlando la elección de materiales, las soluciones técnicas-constructivas y los sistemas de generación de energía empleadas en el proyecto [3].

En la figura 2 podemos ver las fases que se desarrollan cuando se realiza un Ciclo de vida.



Figura 2: Fases del ciclo de vida de productos. Elaboración propia.

Si además de lo anterior, nos centramos en el consumo de energía de un edificio, y por tanto en sus emisiones de CO<sub>2</sub> (en la fase de uso), vemos que es el cociente entre la demanda del edificio, que depende: de las condiciones climatológicas, el uso característico y el edificio (orientación, sombras, envolventes, materiales, etc); frente al rendimiento del sistema de instalaciones que

tenga dicho edificio, siendo el peso de la demanda significativamente mayor frente a las instalaciones.

Además de eso, la Unión Europea (CEE) determina que el consumo de un edificio depende (ver figura 3):

$$C = \frac{\text{DEMANDA}}{\eta_{\text{sistema}}}$$

Consumo  
Calificación  
Emisiones CO<sub>2</sub>

Clima  
Uso  
Edificio

Rendimiento  
Instalaciones

Figura 3: Consumo de un edificio según CE. Fuente: Código Técnico de la Edificación.

Es evidente que buena parte de los procesos asociados al diseño y desarrollo de los edificios no están concebidos para ser sostenibles y por tanto necesitan ser “**re-diseñados**”.

Por todo esto, los arquitectos, ingenieros y proyectistas en general, deberían aplicar los términos de **Ecodiseño** y **Ecoeficiencia** en la fase de diseño del proyecto. La arquitectura y la ingeniería sostenible es aquella que respeta las sensibilidades de su entorno, es decir, que respeta el medio ambiente. Al diseñar un edificio o una instalación con parámetros sostenibles, se logra mejorar la eficiencia energética ya que se reduce la demanda y por tanto disminuye el consumo.

## 1.2. Motivación del trabajo

La Universidad de Jaén consciente del papel que tiene como institución de referencia tanto en la educación como en la investigación, asume el compromiso de integrar la dimensión ambiental a todas las actividades docentes, investigadoras y de servicios, en la búsqueda e implantación de un modelo de sociedad que apueste por la sostenibilidad. De esta forma y sustentada en los principios rectores y directrices recogidas en la Agenda 21 de la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, teniendo como referencia el documento impulsado por la Conferencia Europea de Rectores y las recomendaciones de la Comisión Sectorial de la CRUE para la Calidad ambiental, el Desarrollo Sostenible y la Prevención de Riesgos en las Universidades (CADEP), se

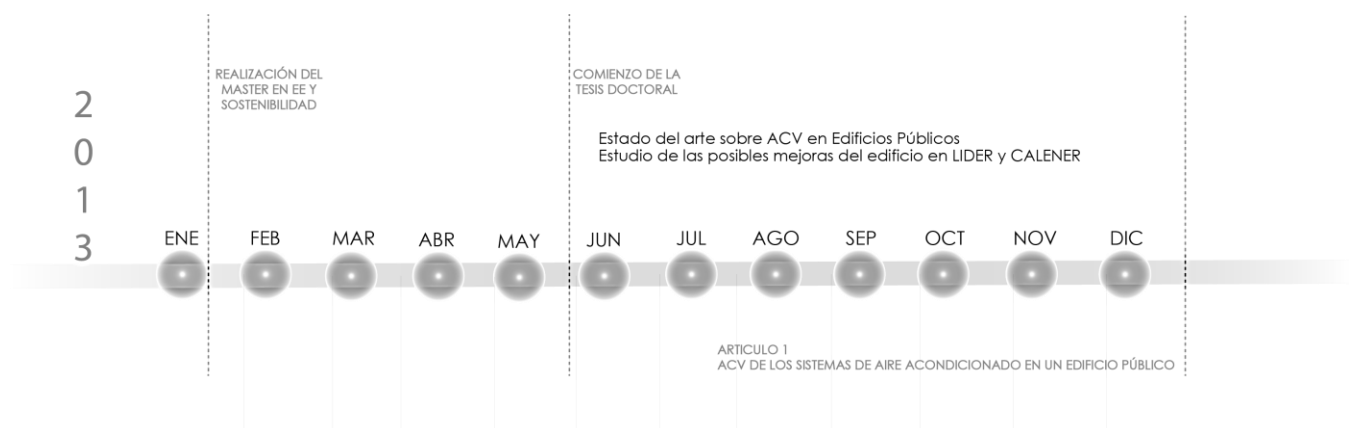
origina la presente línea de investigación. Todo ello para alcanzar los compromisos de la política ambiental dentro del decálogo de compromisos y del que podemos enmarcar el siguiente:

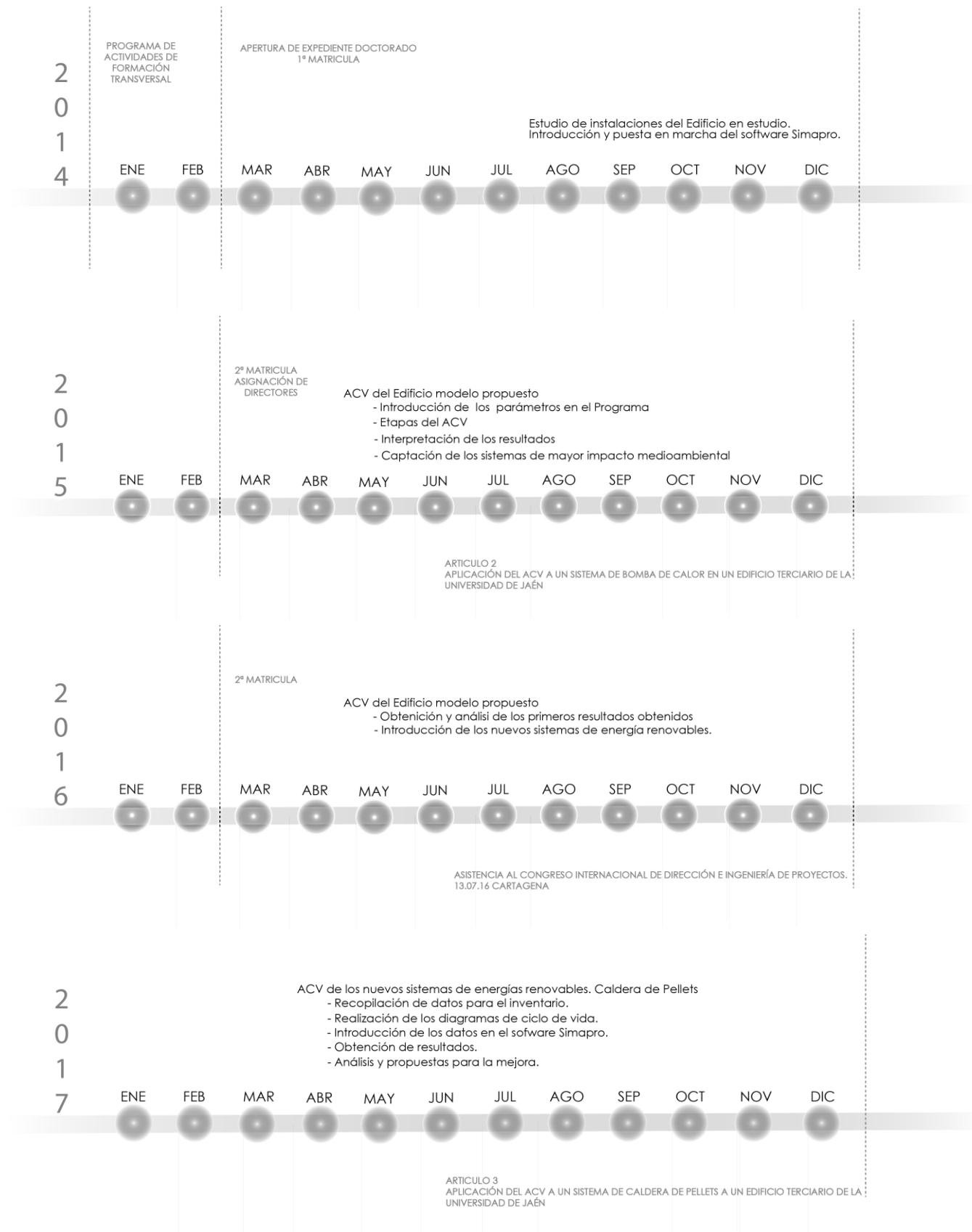
“Desarrollar y fomentar líneas de investigación que propicien la transferencia del conocimiento científico y tecnológico que avance hacia la sostenibilidad” [4]

Este camino se inicia en el año 2013 con la realización del Máster de Eficiencia Energética en la Edificación y la Industria de la Universidad de Jaén, que dio pie a la posibilidad de continuar como doctorando en la línea de investigación del programa de Ingeniería Mecánica y Energética del Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera. Y a partir de estas premisas se inicia un camino que tiene como primera meta la realización de esta Tesis Doctoral.

### 1.3. Cronograma de trabajo

La figura 4 muestra un desglose por años de los trabajos realizados para la elaboración de esta tesis doctoral, y en la que se reflejan las actividades, estudios, investigaciones y publicaciones.





Estudio de la Eficiencia Energética y la Sostenibilidad de los sistemas de generación de energía en un edificio terciario de la Universidad de Jaén mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

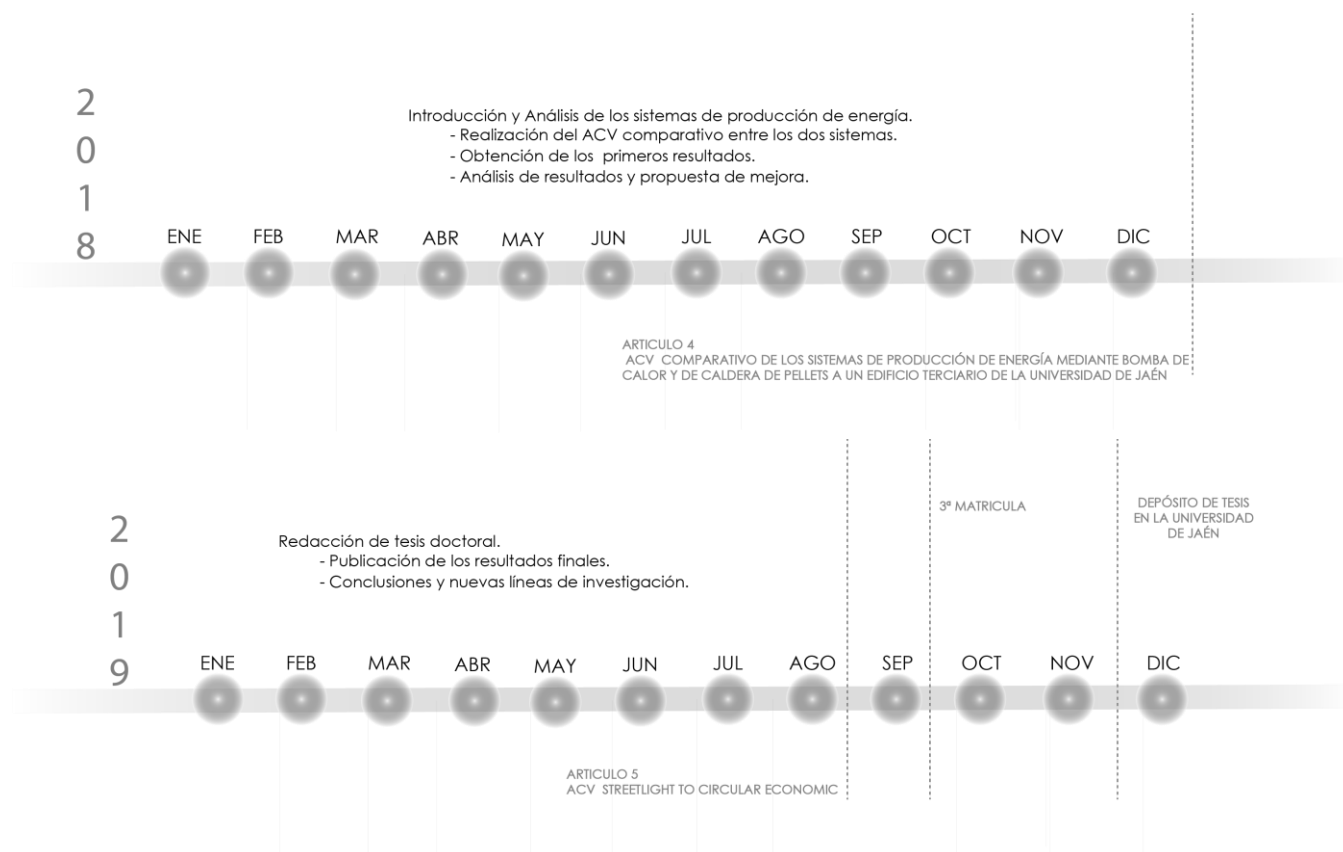


Figura 4: Etapas del trabajo realizado. Elaboración propia.

## 1.4. Metodología empleada

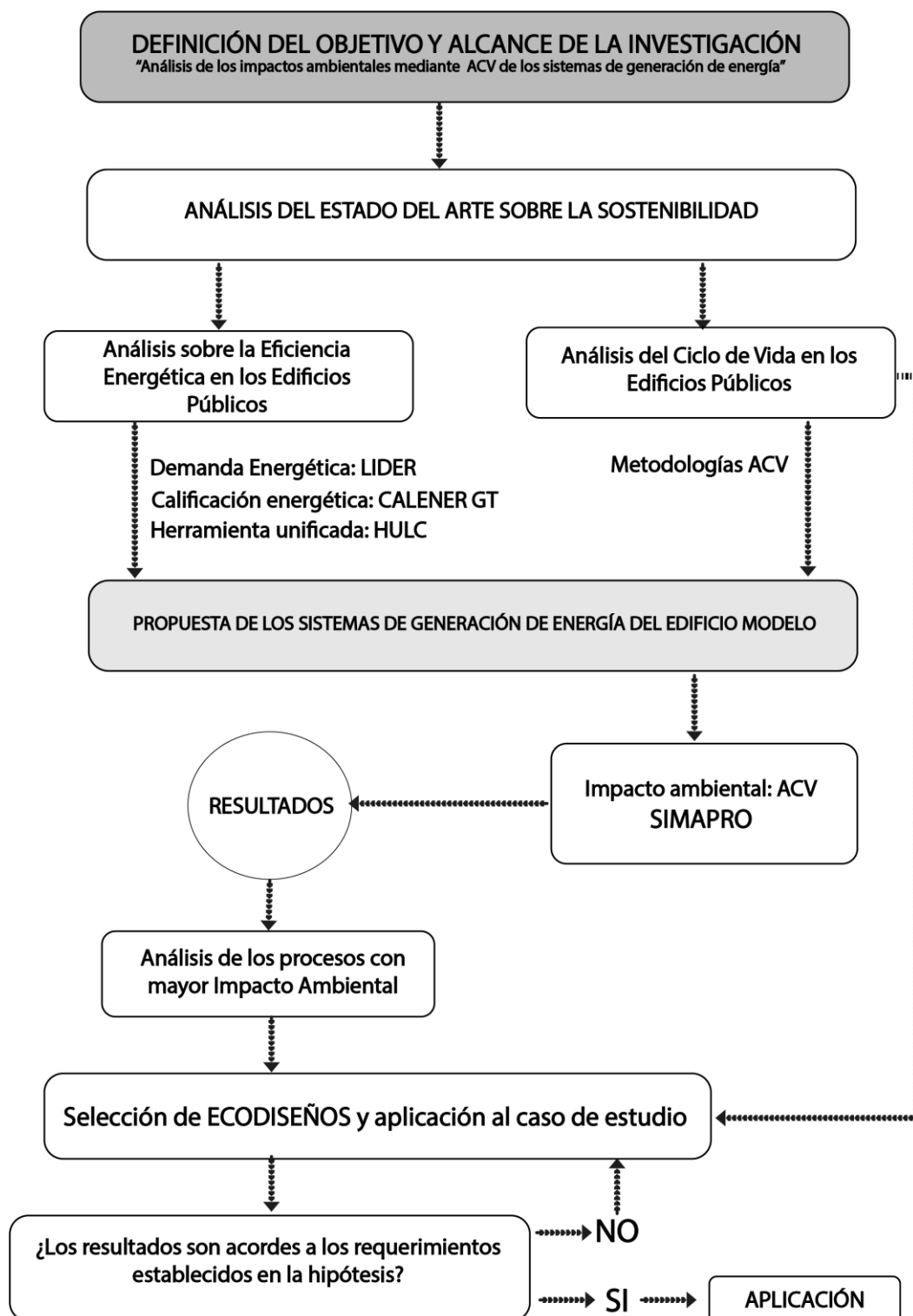


Figura 5: Esquema de la metodología. Elaboración propia.

### 1.5. Consumo de energía mundial.

La tendencia sobre el consumo de energía a nivel mundial es alcista. Los países industrializados son el modelo para los países en desarrollo, que quieren conseguir los mismos niveles de bienestar. Ello lleva a un desarrollo basado en el consumo de materias primas que son transformadas mediante la energía en productos.

La energía primaria consumida está creciendo a un ritmo continuado desde la Revolución Industrial, como se puede observar en la figura 6. Ya en 1980 el consumo de combustibles fósiles alcanzó al de la biomasa, que se usaba para calentar la industria y los hogares. [5]

Los combustibles fósiles crecen a un ritmo del 3,65% anual y según las estimaciones para el 2020 las naciones en desarrollo superarán a las desarrolladas en un 1,1% de tasa media.

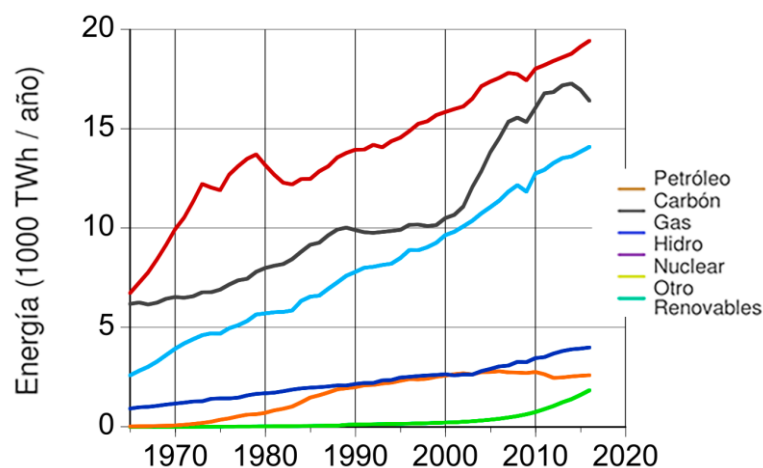


Figura 6: Energía mundial consumida. Fuente EIA.

Existe una relación directa entre el desarrollo de los países y el consumo de energía y el aumento de la población. Hay otros factores que influyen también, como pueden ser el desarrollo de las comunicaciones, el avance de la tecnología, y la globalización hacen que el tiempo en el desarrollo sea cada vez más corto. Todo ello a costa del agotamiento de los recursos fósiles, el creciente problema medioambiental y las crecientes tensiones demográficas.

Es cierto que el consumo de energía se ve afectado por las crisis económicas que se producen cada cierto tiempo, y que provoca que disminuya en cierta medida. Pero esto provoca un efecto rebote, que implica una mayor inversión de las empresas para recuperar los beneficios y con ello un aumento del consumo energético.

Es el caso de la última crisis económica de 2007, donde se produjo una importante disminución del consumo debido a la reducción de la actividad industrial y edificatoria, pero que a partir de 2017-2018 cambia de tendencia. Estos datos vienen siendo ratificados por los índices de contaminación en las grandes ciudades, con las crecientes emisiones de CO<sub>2</sub>, y de las inversiones económicas en el sector energético.

### 1.6. La tecnosfera

Un índice importante que nos da idea de la situación actual, es aquel que nos aporta información sobre los productos que el hombre genera a través de los procesos de fabricación. Es lo que se denomina tecnosfera. Ver figura 7.

Esta capa artificial de la superficie terrestre generada por la acción del hombre, constituye un gran sistema compuesto por todos los objetos creados por el hombre desde el comienzo de su existencia. Incluye desde construcciones, fábricas, monumentos, aeropuertos, calles, puentes, instalaciones, etc... hasta los útiles de uso diario como libros, móviles, electrodomésticos, ropa, etc... es decir todo aquello que necesitamos o no y que ha sido creado a partir de procesos de transformación. [6]

Esta capa artificial de la superficie terrestre contiene a su vez todos los desperdicios, basura y escombros que el hombre genera como resultado de sus actividades humanas de tipo industrial, minero y doméstico.



Figura 7: Modelo de producción y consumo lineal. Fuente: [www.lifeder.com](http://www.lifeder.com)

La tecnosfera ha sido vista como un espacio donde se genera cultura, vida y se manifiestan las interrelaciones comunicativas y sociales que establecen las personas en su día a día, siendo la tecnología un vital aspecto dentro de ella.

La existencia de la tecnosfera responde a la constante necesidad de consumo y capacidad de creación técnica y artística presente en el ser humano, el cual transforma los recursos naturales para satisfacer sus necesidades.

La tecnosfera es también definida como todo el conjunto de los medios artificiales que soportan el desarrollo de la sociedad, y que interactúa de forma análoga con la biosfera al ejercer acción sobre el medio ambiente para crear nuevos paisajes agrarios, industriales y urbanos haciendo uso de la tecnología.

El término fue acuñado en el año 2014 por el profesor Peter Haff, especialista en geología e ingeniería civil ambiental de la Universidad de Duke. [7]

El autor define la tecnosfera como un sistema consumidor de energía de carácter tecno-social global formado por los seres humanos y todos los artefactos y sistemas tecnológicos inventados junto a los protocolos e información creados.

En general todo ambiente natural alterado por el hombre también forma parte de la tecnosfera. Esta alteración viene basada en la tecnología definida como el conjunto de acciones sistemáticas que tienen por objetivo transformar las cosas. Es por ello, que la tecnología constituye parte esencial de la tecnosfera, por ser una herramienta que permite al ser humano modificar su entorno, y a la vez le impulsa a continuar construyendo y creando nuevos aparatos y dispositivos cada día más modernos.

La tecnología acompañada de la globalización y el sistema de acumulación capitalista, son quienes construyen la Tecnosfera día tras día.

La era geológica que estamos viviendo, se denomina Antropoceno, y se encuentra íntimamente relacionada la tecnosfera. Comprende desde

1950 hasta hoy día, en la que el impacto global de las actividades humanas en el ecosistema terrestre es cada día más importante.

Se estima que el Antropoceno surgió desde antes del año 1950 con la Revolución Industrial, cuando el desarrollo de las industrias y el inicio del modo de producción capitalista, animaron al hombre a utilizar los recursos renovables y no renovables del planeta para construir la sociedad moderna tal y como se conoce hoy día [8].

Pero esta capa de la superficie terrestre no realiza un adecuado sistema de auto-reciclaje como si lo hace la biosfera. Es por ello que la tecnosfera está degradando el medio ambiente y hoy día en ella se encuentran los restos de la rápida multiplicación del número de seres humanos y sus creaciones técnicas a nivel global.

Los expertos indican que estos restos ya han trascendido el concepto de "yacimientos" pasando a convertirse inclusive en todo un estrato geológico lleno de tecnofósiles que están originando un peso muerto sobre el planeta tierra.

Según un estudio de la Universidad de Leicester en Reino Unido, si se suman todas las estructuras urbanas y rurales, más los vehículos, máquinas, aparatos electrónicos, productos, prendas de ropa que han sido creados, y sus desechos, se obtendría un peso total de 30 billones de toneladas. Y, aproximadamente es eso lo que pesa la tecnosfera.

Además, si se distribuyeran de manera uniforme todos los componentes que configuran la tecnosfera por toda la superficie del planeta, se estaría hablando de 50 kilogramos por metro cuadrado [9].

### **1.7. Situación de la edificación**

Existen varios sectores para clasificar el consumo de energía final. El sector de la industria, el sector servicios y residencial, el sector primario (agricultura, ganadería y pesca) y el sector del transporte.

Si consideramos que la edificación supone entre el 20 y el 40% de la energía final consumida en los países desarrollados, debemos profundizar en las áreas donde se consumen mayor energía. De este modo podemos comprobar que son el sector residencial y el terciario donde con un 26 %

de energía final consumida más incremento se ha producido en España en los últimos años.

Desarrollamos gran parte de nuestro tiempo dentro del entorno construido. Este elevado tiempo de permanencia dentro de edificios ha provocado que necesitemos mejores condiciones de confort para desarrollar nuestro trabajo o nuestras actividades. Ello provoca un aumento del consumo hasta niveles cercanos a los de la industria y el transporte.

En los años de bonanza económica, el ritmo de la construcción residencial y el aumento de los servicios energéticos, produjo un crecimiento muy considerable, especialmente en climatización.

Para el año 2008, el consumo de energía final para el sector terciario, alcanzó el 29,5%. En este sector, donde se engloba el edificio objeto de estudio en esta tesis, es donde incluyen diversos usos y servicios energéticos (climatización, ACS, iluminación, refrigeración, equipos ofimáticos, etc...), y que van en aumento directo en función del crecimiento de los m<sup>2</sup> de superficie construida.

A pesar de la situación económica actual, en Europa se aborda el problema energético y el cambio climático con un doble objetivo:

- a) Una transición hacia la energía limpia, sostenible, segura y competitiva y,
- b) La reconversión de la economía existente en un nuevo modelo de desarrollo sostenible y economía circular.

### **1.8. Política energética de la Unión Europea.**

La política europea de los últimos años, está enfocada en establecer una serie de normativas que regulen y favorezcan el consumo de los edificios hacia el objetivo de consumo cero (ver figura 8) en el año 2020.

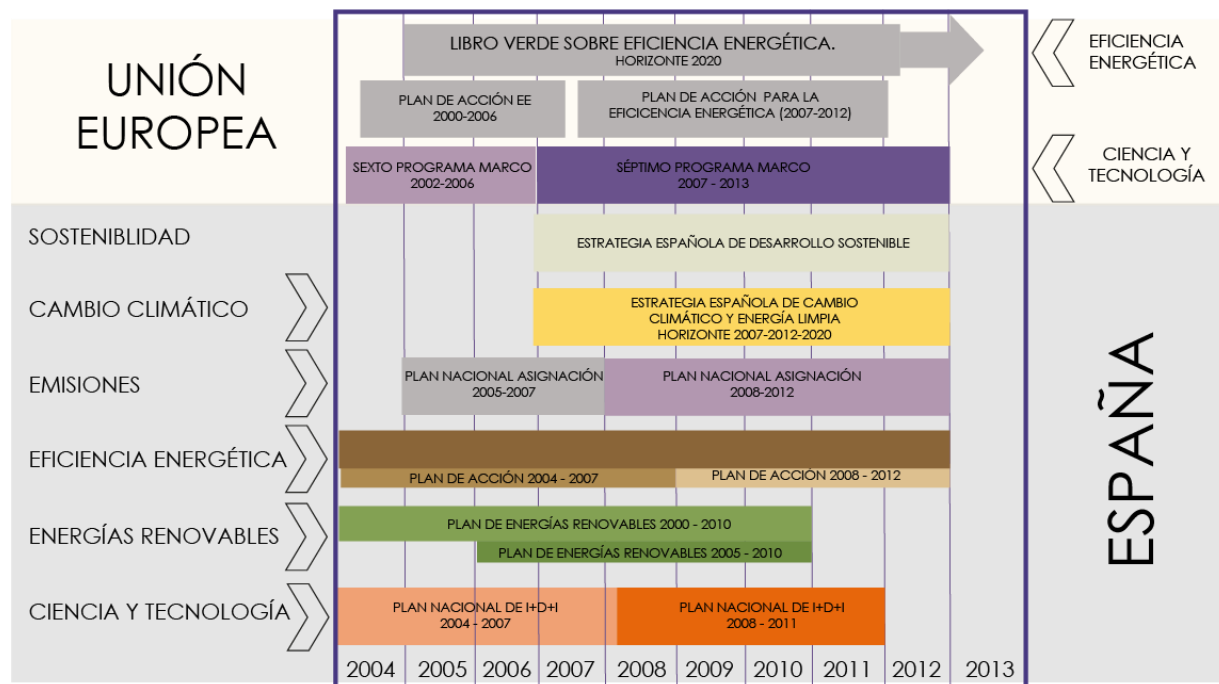


Figura 8: Normativa UE y su desarrollo. EE y Sostenibilidad en España. Elaboración propia.

Ésta labor se reglamenta a través de una normativa que ha sido traspuesta a la normativa propia de cada país a lo largo de estos años.

Actualmente nos encontramos en un periodo de actualización de nuevas normativas, en el que las Comunidades Autónomas están desarrollando sus trasposiciones correspondientes.

Por consiguiente, el sector de la edificación constituye un pilar importante en el que centralizar políticas energéticas, de cara al cumplimiento de los nuevos Protocolos fijados por los países.

Los edificios tienen una gran incidencia en el consumo a largo plazo, pues su vida útil se considera en 50 años. La edificación representa el 42% del consumo de energía, con un incremento del 1,5% anual, dentro de la UE. En España, aquel porcentaje se sitúa en un 29,5% en 2008.

A partir de estos estudios, las políticas europeas se centran en la reducción del consumo energético y aparece la prioridad en la eficiencia energética. Con el Protocolo de Kioto se establecen unas obligaciones para los países de la Unión Europea, tomándose medidas específicas para el sector de la edificación. Es por ello, que se publica la Directiva 2002/91/CE relativa a la eficiencia energética de los edificios [10], y posteriormente se publican por parte de la Unión Europea modificaciones y actualizaciones como las Directivas 2010/31/UE y la 2012/27/UE, relativas

a la eficiencia energética de los edificios y a la eficiencia energética respectivamente. Con la publicación de la Directiva 2018/844/UE supone la última modificación a las anteriores y es la que permanece en vigor.

Con la primera crisis del petróleo, en la década de los sesenta, los países se pusieron de acuerdo para iniciar una regulación sobre la eficiencia energética edificatoria. Esto junto a la inquietud actual por el consumo de los recursos, el coste de excesivo de la energía y los impactos medioambientales provocados por las emisiones, han concienciado a los Gobiernos sobre la necesidad de reducir e invertir en la mejora de estos aspectos. Se crean entonces las Agencias de la Energía, y es en el sector edificatorio cuando comienza el desarrollo de la reglamentación energética. Ver figura 9.

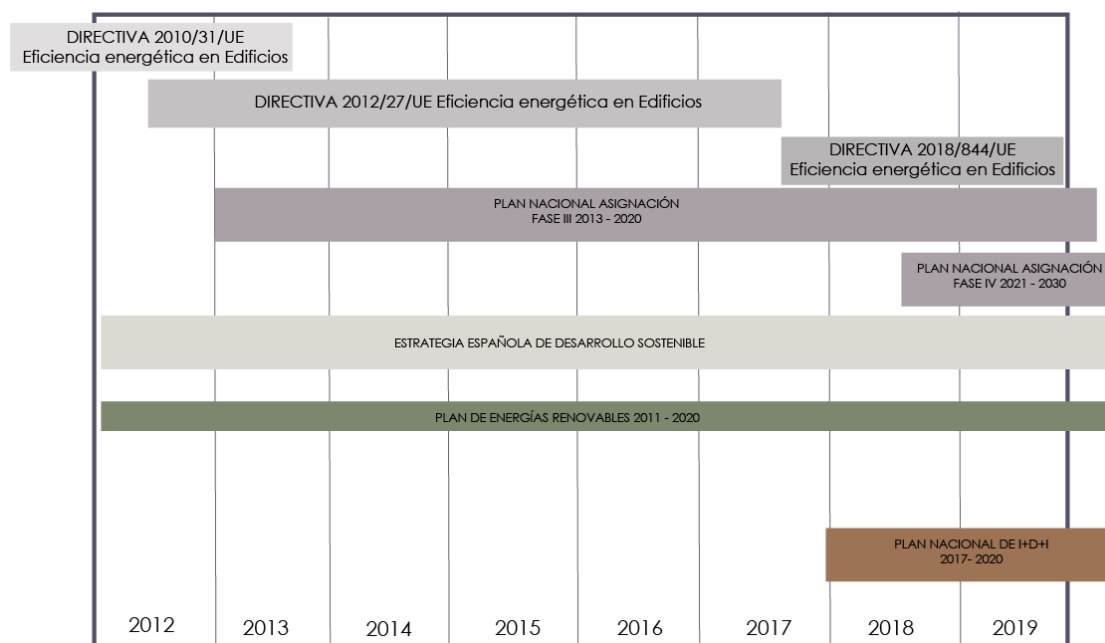


Figura 9: Normativa actualizada. Elaboración propia.

En ella se sientan las bases de lo que actualmente supone el ámbito de la lucha por el cambio climático. Las Directivas parten de exigencias generales para aquellos edificios nuevos como existentes de unas ciertas dimensiones y que se sometan a reformas importantes a cumplir unos mínimos en eficiencia energética. Esta exigencia se va incrementando hasta llegar al consumo cero de todos los edificios para el año 2020.

De forma general, se introducen requisitos mínimos para todos los edificios. "cuando los edificios sean construidos, vendidos o alquilados, se deben poner a disposición del propietario, comprador o inquilino, un certificado

energético con las características energéticas del inmueble". Siendo obligatorio por tanto para edificios nuevos como para los existentes, en el caso de venta o alquiler de estos últimos.

Para la realización de este certificado, a partir del 14 de enero de 2016 sólo son admitidos por los Registros de las Comunidades Autónomas los certificados de eficiencia energética realizados con la última versión actualizada de la Herramienta unificada LIDER-CALENER (HULC), del CE3, del CE3X o del CERMA. Ver figura 10.

### Certificación energética simplificada de edificios existentes



Figura 10: Pantalla de Inicio para la introducción de datos. Fuente: Software CE3x de certificación energética.

Esta certificación energética, considerada como una herramienta adecuada para transformar el mercado, no ha conseguido todos los resultados esperados, debido a que las medidas de mejora en los edificios dependen en gran medida de subvenciones y ayudas por parte de la administración a las comunidades de vecinos y particulares, no modificando en gran medida el estilo de vida de sus ocupantes.

La Directiva contempla que para el cálculo de la eficiencia energética en los edificios se calcule teniendo en cuenta, no sólo, el aislamiento térmico sino también las instalaciones de climatización y calefacción, el uso de las energías renovables y el diseño del edificio.

Los datos administrativos del edificio son completados en la correspondiente ventana, ver figura 11, en la que se recogen los datos del técnico certificador, para asegurar la calidad de los datos obtenidos.

Estudio de la Eficiencia Energética y la Sostenibilidad de los sistemas de generación de energía en un edificio terciario de la Universidad de Jaén mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

**CE3X - PT: Certificación energética simplificada de edificios existentes - Pequeño terciario**  
Archivo Librerías Patrones de sombra Resultados Complementos Ayuda Acerca de

Datos administrativos | Datos generales | Envolverte térmica | Instalaciones

### Localización e identificación del edificio

Nombre del edificio

Dirección

Provincia/Ciudad autónoma  Localidad  Código Postal

Referencia Catastral  +

### Datos del cliente

Nombre o razón social

Dirección

Provincia/Ciudad autónoma  Localidad  Código Postal

Teléfono  E-mail

### Datos del técnico certificador

Nombre y Apellidos  NIF

Razón social  CIF

Dirección

Provincia/Ciudad autónoma  Localidad  Código Postal

Teléfono  E-mail

Titulación habilitante según normativa vigente

Figura 11: Pantalla para la introducción de datos administrativos. Fuente: Software CE3x

Todo ello dentro del parámetro de "cantidad de energía consumida para satisfacer las necesidades asociadas a un uso estándar del edificio". Es por tanto, el indicador para la eficiencia el consumo energético medido en kWh/año del edificio, y que se expresa según la superficie construida de la vivienda como kWh/m<sup>2</sup>-año. Ver figura 12.

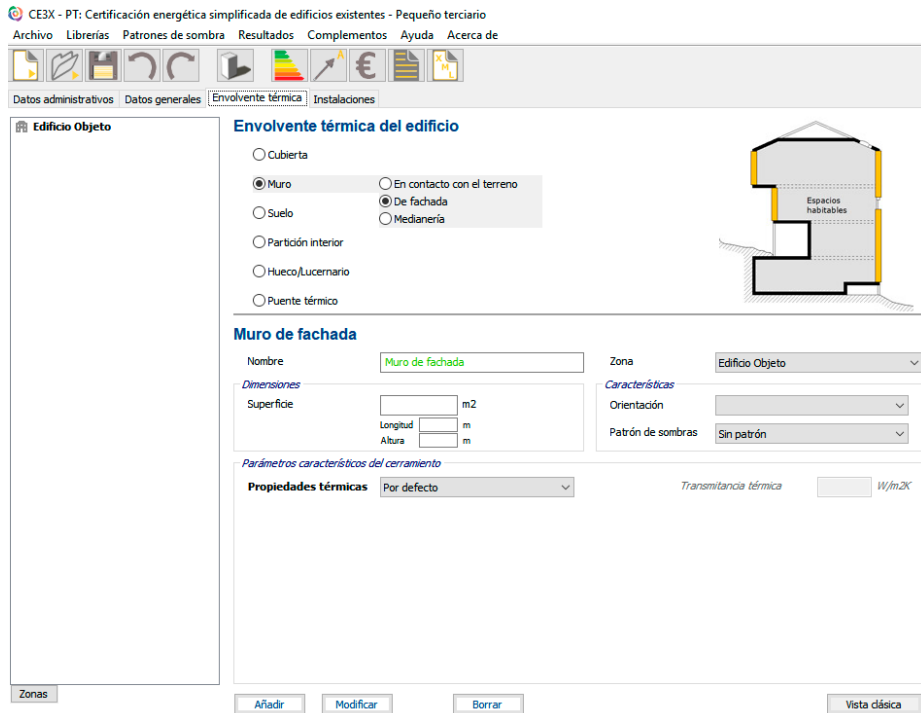


Figura 12: Pantalla para la Introducción de datos de la envolvente. Fuente: Software CE3x

Por último, la Directiva indica que se deben de realizar una serie de recomendaciones para la mejora de la relación coste-eficacia de la eficiencia energética. Ver figura 13. Con la herramienta se permite hacer un desglose del consumo por usos (calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria e iluminación) que será muy útil a la hora de analizar los posibles parámetros de mejora.

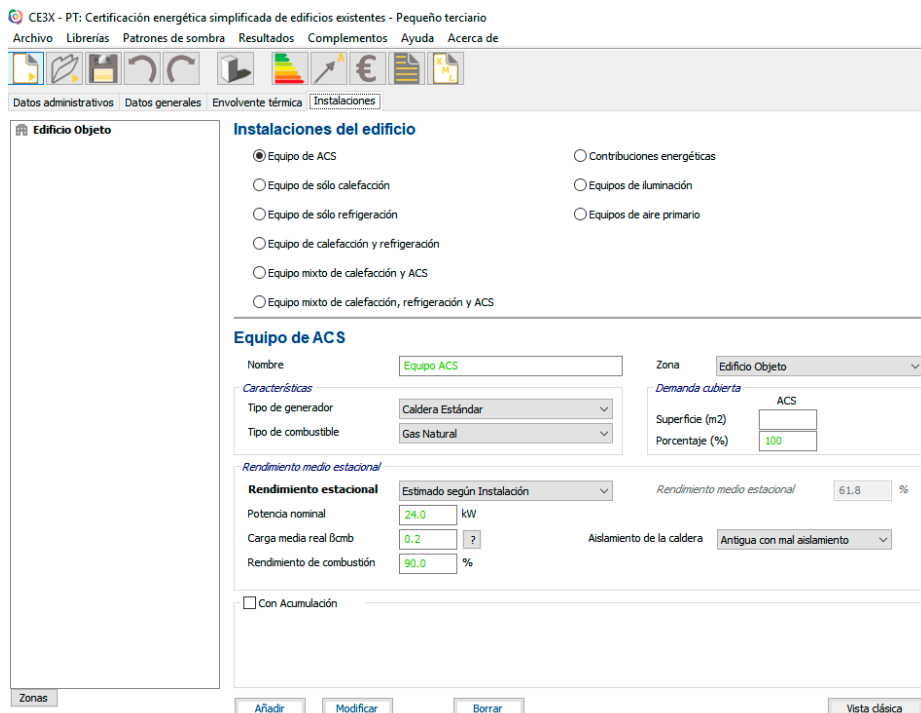


Figura 13: Pantalla para la Introducción de datos de las instalaciones y mejoras. Fuente: Software CE3x

Asimismo, a partir del 5 de julio de 2018 serán admitidos por los Registros de las Comunidades Autónomas los certificados de eficiencia energética realizados con la última versión actualizada de CYPETHERM HE Plus, SG SAVE y del Complemento CE3X para edificios nuevos (ver figura 14), ampliando de esta forma el software con los que se pueden realizar los estudios energéticos de los edificios [11].

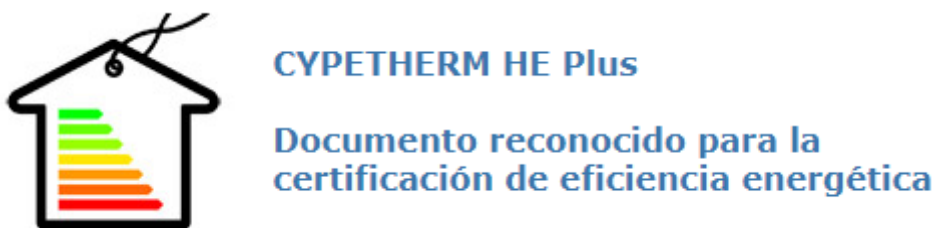


Figura 14: Programa Cype de cálculo de la demanda energética. Iniciativa privada de uso público.

El marco general en los que se basan estos programas informáticos, y los parámetros que deben cumplir son los siguientes:

1. La metodología de cálculo de la eficiencia energética deberá integrar los siguientes aspectos:
  - a. Características térmicas de los edificios (cerramientos exteriores e internos, etc.) Podrán incluir la estanqueidad del aire.
  - b. Instalación de calefacción y de agua caliente, y sus características de aislamiento.
  - c. Instalación de aire acondicionado.
  - d. Ventilación
  - e. Instalación de iluminación artificial (especialmente en el sector terciario)
  - f. Disposición y orientación del edificio, incluidas condiciones climáticas exteriores.
  - g. Sistemas solares pasivos y protección solar.

- h. Ventilación natural
- i. Las condiciones ambientales interiores incluidas las condiciones ambientales interiores proyectadas.

Como la certificación energética debe evaluar la eficiencia energética y el ahorro posible del edificio, estos se deben de obtener a través de una simulación, donde se establezcan las condiciones de operación y de consigna fijas. En la realidad, el cálculo riguroso depende mucho de los consumos que realicen las personas que ocupan el edificio en cada momento.

La nueva Directiva Europea 2018/844/UE marca unos objetivos;

- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en un 40 % de aquí hasta el 2030, en comparación con 1990).
- Aumentar la proporción de energía renovables consumida.
- Descarbonizar el parque inmobiliario, responsable del 36% de todas las emisiones de CO<sub>2</sub> de la Unión, de aquí hasta el 2050, buscando un equilibrio rentable entre descarbonizar el suministro de energía y reducir el consumo final de energía.
- Renovación del parque inmobiliario priorizando en la eficiencia energética y estudiando el despliegue de las energías renovables.
- Impulso de las estrategias de renovación a largo plazo para conseguir que los edificios sean de consumo casi nulo.
- Fomento de las medidas pasivas en los edificios para reducir las necesidades energéticas de calefacción y refrigeración, iluminación y ventilación.
- Instalación de dispositivos de autorregulación de los edificios. Para regular separadamente cada ambiente o espacio interior.
- Instalación de puntos de recarga eléctrica para los coches eléctricos en los edificios.

Respetando las medidas a largo plazo de las Directivas anteriores, se insta a los estados miembros a planificar una estrategia para obtener resultados medibles para el año 2030. Se deberán incorporar progresivamente aislamientos, ventanas de triple cristal, sistemas de ventilación eficientes en un tipo de construcción hermético. Permitiendo una excelente climatización interior y unas reducidas facturas de consumo energético.

## ESTADO DEL ARTE Y DE LA INVESTIGACIÓN

- 2.1. Antecedentes
- 2.2. Eficiencia energética en los edificios terciarios.
- 2.3. Fundamentos de los métodos existentes de evaluación.
- 2.4. Indicadores energéticos.
- 2.5. Métodos de cálculo.
- 2.6. BREEAM. Building Research Establishment Environmental Assessment.
- 2.7. Passiv Haus.
- 2.8. LEED. Leadership in Energy and Environmental Design.
- 2.9. Edificios de energía cero
- 2.10. Los sistemas de generación de energía
- 2.11. La sostenibilidad en los edificios terciarios
- 2.12. El futuro de los sistemas energéticos

### 2.1. Antecedentes

El concepto “Desarrollo Sostenible” se creó por la IPPC en 1988, Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. El aumento de los GEI (Gases de Efecto Invernadero) con evidencias de alteraciones provocadas por los seres humanos, trajo la necesidad de que un cambio fuera visible. Tras varios años e informes, se determinan unas iniciativas y medidas para mitigar el problema. Esto marcó las directrices para un nuevo modelo de desarrollo en todos los sectores.

La Comisión Brundtland en 1990, definió el **desarrollo sostenible** como:

*“aquel desarrollo que es capaz de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer los recursos y posibilidades de las futuras generaciones. Intuitivamente una actividad sostenible es aquella que se puede mantener. Por ejemplo, cortar árboles de un bosque asegurando la repoblación, es una actividad sostenible. Por el contrario, consumir petróleo no es sostenible con los conocimientos actuales, ya que no se conoce ningún sistema para crear petróleo a partir de la biomasa. Hoy sabemos que una buena parte de las actividades humanas no son sostenibles a medio y largo plazo tal y como hoy están planteadas” [12].*

El crecimiento en los últimos años de la construcción, la industria, el transporte, la agricultura, etc... ha llevado de forma aparejada, un incremento en la necesidad de energía. Aunque el sector de la construcción es un sector que de forma directa puede producir pocas emisiones frente al resto de los sectores mencionados, este crecimiento ha traído consigo la necesidad de “equipar” estas edificaciones con sistemas que acondicionen la vida en el interior de las mismas. Desde este punto de vista, el sector urbano, y para nuestro caso, el ámbito de los edificios públicos, representan otros de los impactos indirectos más importantes. Entre estos impactos podemos destacar, el consumo de materiales y recursos, o el uso de materiales con mucho impacto ambiental, tanto en su naturaleza como por el proceso para obtenerlos. Los nuevos procesos industriales que consumen mayor cantidad de energía, tienen como consecuencia mayores emisiones que son contabilizadas a la industria. La industria, de forma general, provoca unos impactos ambientales que incluyen la utilización de materiales que provienen de recursos naturales, y la utilización de grandes cantidades de energía, y por tanto sus efectos medioambientales son muy importantes [13].

El consumo final de la energía se distribuye por sectores, ver figura 15, en función de la importancia y de forma cuantitativa. Hay que tener en cuenta que algunos de los sectores sirven de base para otros, lo que provoca un efecto cadena en el aumento o reducción del consumo o la demanda de la energía final.

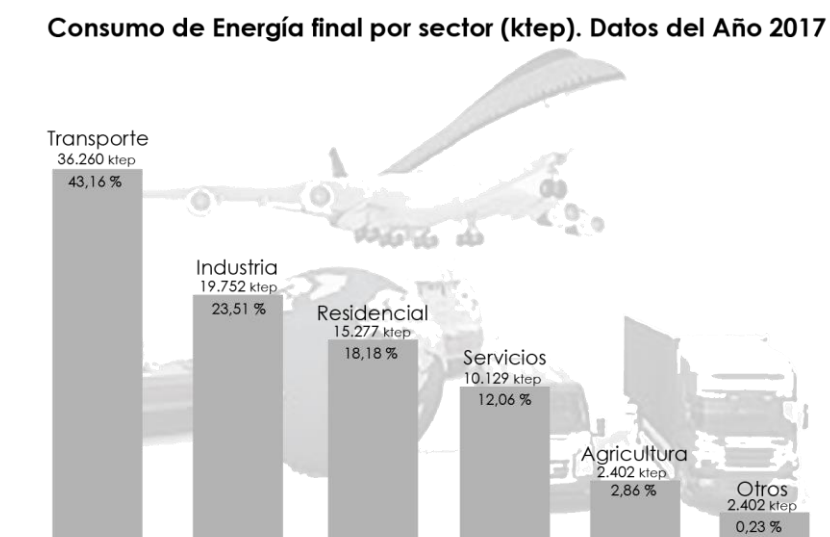


Figura 15: Sectores por importancia en el consumo de energía final. Fuente: Elaboración propia tomando los datos de IDEA.

El sector del transporte representa el mayor porcentaje debido a que es la base para el desarrollo de los otros sectores, pues engloba la necesidad de desplazamiento para el desarrollo del trabajo, la vivienda, la agricultura o el ocio.

Como podemos observar en la figura 16, los sectores que están relacionados muy directamente son la edificación y la industria. Para nuestra investigación, y para tener una idea global del problema medioambiental, hemos recabado algunos datos, obtenidos de la Unión Europea, UNEP, la OCDE y el INE. Estos datos reflejan el consumo y las emisiones que se producen en el sector de la construcción haciendo referencia al resto de los sectores, y en los que podemos analizar el porcentaje importante que supone este sector.

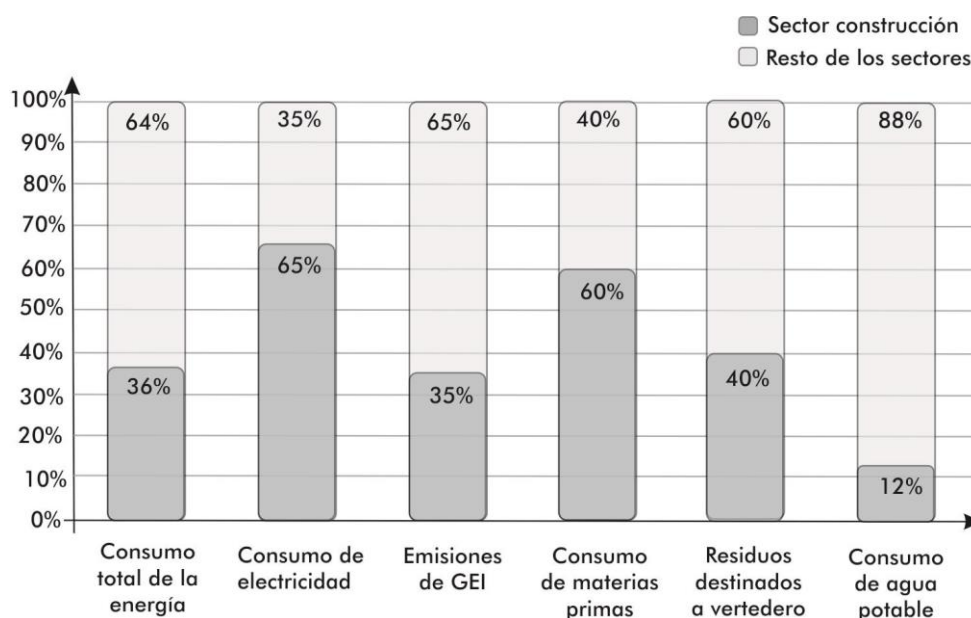


Figura 16: Consumos y emisiones en el sector de la construcción. Fuente: Elaboración propia tomando los datos de UNEP, OCDE y INE.

En la siguiente figura 17 podemos ver un comparativo entre las emisiones generadas en la Unión Europea (EU28) y el porcentaje relativo con España, con respecto a los edificios públicos.

Aunque desde 2009 hasta 2017 las emisiones de GEI han ido en descenso, España sigue siendo uno de los países industrializados donde más han aumentado las emisiones respecto a 1990. El descenso puede imputarse en buena parte a la crisis económica, que supone una moderación importante en el consumo de electricidad y vehículo privado. Siendo este dato visiblemente significativo, pues en cuanto se produce una

reactivación de la economía de los países, vuelven a subir los niveles de emisiones, lo que demuestra la baja implementación de políticas estructurales medioambientales.

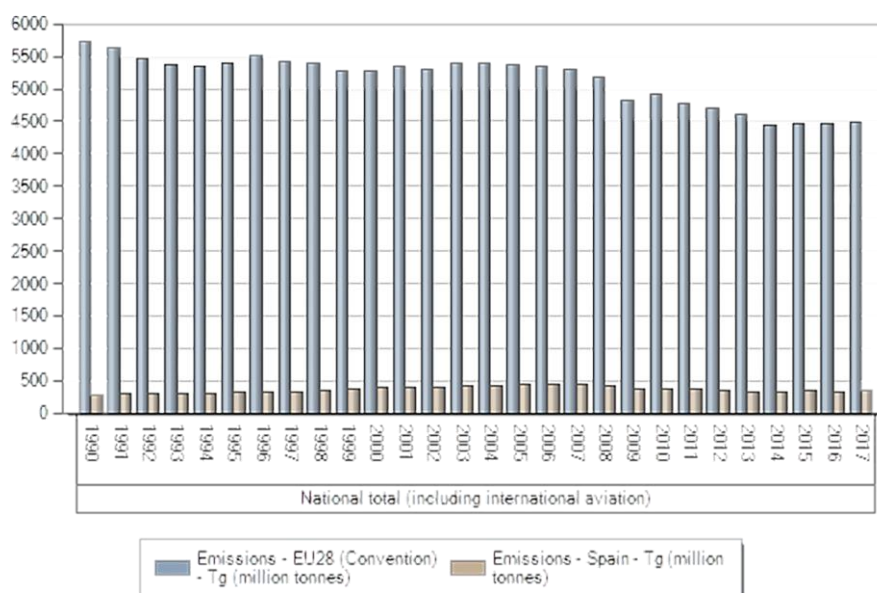


Figura 17: Emisiones en el sector de la construcción. Fuente: Agencia Europea del Medioambiente. [www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu)

Analizando la figura 16, el sector energético sigue siendo el mayor responsable del conjunto de emisiones, representando un 78% del total. El resto corresponde a las diez refinerías de petróleo, consumos energéticos de industria, transporte aéreo, usos residenciales y servicios (sobre todo climatización y agua caliente sanitaria) [14].

Otro punto a tener en cuenta, es la globalización que se produce en todos los sectores. El uso de materiales ya no es local, sino que se transportan materiales desde todo el mundo, basándose en factores estéticos, económicos, de marketing o simplemente por moda. Asimismo, los sistemas industriales rápidamente son exportados e importados por la políticas empresariales. Todo ello, nos lleva a importantes costes energéticos e impactos ambientales, por consiguiente los costes ecológicos.

Es casi imposible cuantificar el impacto negativo sobre el ambiente de las técnicas industriales y constructivas y su coste energético. Se considera que éste coste es proporcional al impacto sobre el territorio debido a movimientos de materiales, aunque es bastante ambiguo, ya que de cada

material se puede contabilizar su coste a través de una serie de operaciones, escondidas e implícitas en el agregado final de energía. Es decir, el impacto ambiental de un solo material, ya no sólo del sistema constructivo, depende del proceso constructivo, eficiencia, distancia de la producción y transporte, residuos de dicho material. Aunque es cierto que por la energía hay una preocupación ambiental, no debe olvidarse que los límites materiales del mundo son mucho más estrictos que los energéticos, y por tanto el futuro preocupa más por la **escasez de recursos**, debido al hecho de resultar más fácil convertir materiales en energía que energía en materiales [15]. Por tanto, los esfuerzos deben ir a favor de una industria sostenible y dirigirse a disminuir el coste del mantenimiento de los edificios, y por lo tanto disminuir el coste de aquellos aspectos que más consumo tienen, es decir, desarrollar sistemas de producción de energía lo más sostenibles posibles.

## 2.2. Eficiencia energética en los edificios terciarios.

De forma general, las primeras normas sobre las características de las envolventes de los edificios, se realizan en los años sesenta. La transferencia de calor de los cerramientos, el comportamiento higrométrico y la permeabilidad, se empiezan a considerar. Seguido a esto se desarrollan reglamentos con respecto al diseño, cálculo, ejecución y mantenimiento de las instalaciones térmicas (climatización y ACS) que incluyen por primera vez valores mínimos del rendimiento de los equipos [16].

Investigadores visionarios comenzaron a ocuparse de la problemática energético-ambiental en la edificación desde 1977. En 2011, se creó la normativa internacional, ISO 50001, sobre la Eficiencia Energética, donde se establecen requisitos para el establecimiento de un sistema de gestión de energía. Este estándar especifica los requerimientos para establecer, implementar, mantener y mejorar un sistema de administración de energía. Su propósito es el de permitir a una organización alinearse con un enfoque sistemático, y de esta manera lograr una mejora continua en el uso de la energía, incluyendo eficiencia energética, seguridad energética, utilización de energía y consumo. Este estándar apunta a permitir a las organizaciones reducir continuamente su utilización de energía, y de esta manera, sus costos relacionados con energía, y la emisión de gases de efecto invernadero [17].

Uno de los atributos más importantes de la ISO 50001 es el requisito de "... mejorar el sistema de gestión de energía, y el desempeño energético resultante". De esta manera, la ISO 50001, ha realizado un salto importante al requerir de la organización una demostración de su compromiso con la mejora de su desempeño energético. No se especifican metas cuantitativas. Cada organización elige las metas que desea establecer, y posteriormente diseña un plan de acción para alcanzar estas metas. Con este enfoque estructurado, una organización tiene más posibilidades de obtener beneficios financieros tangibles.

En España, el IDAE propone una serie de herramientas para hacer frente a la gestión de energía, en materia de eficiencia energética. El último plan de ahorro en eficiencia energética es el 2º Plan de Acción nacional de Eficiencia Energética en España 2011-2020 [18].

Se entiende que los requisitos mínimos en Eficiencia energética de los edificios, han sido desarrollados mediante estos Reales Decretos:

-**Real Decreto 47/2006** de 19 de Enero por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación energética de edificios de nueva construcción.

-**Real Decreto 314/2006** de 17 de Marzo por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación (CTE).

-**Real Decreto 1927/2007** de 20 de Julio por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE).

A estas hay que sumar un cuarto Real Decreto, el Real Decreto de certificación energética en edificios existentes (RD 235/2013). Con todo ello se deben cumplir los requisitos mínimos para la eficiencia energética de los inmuebles y su inspección periódica reglamentaria [19].

Dentro del Plan de Acción 2008-2012 se contemplan una serie de incentivos para la mejora de la eficiencia energética en los edificios existentes que posibilitan su adecuación voluntaria tanto a los nuevos requisitos mínimos de eficiencia energética establecidos por la nueva normativa derivada de la Directiva como para ser certificados energéticamente.

Las medidas contempladas son: rehabilitación de la envolvente térmica, mejora de la eficiencia energética de las instalaciones térmicas y de las instalaciones de iluminación interior en los edificios existentes. Tienen por objetivo reducir el consumo de energía como mínimo en un 20%, subvencionándose con carácter general el 22% de la inversión necesaria. Sin embargo esta cuantía puede aumentarse hasta un 27% de la inversión si la actuación tiene por objetivo que el edificio consiga una calificación energética B o hasta un 35% si se consigue una calificación A.

Uno de los objetivos es reducir el consumo de energía de las instalaciones térmicas de calefacción, climatización y producción de agua caliente sanitaria en los edificios, mejorar la eficiencia energética de las instalaciones térmicas de los edificios, de forma que cumplan con las exigencias mínimas, reduciendo su consumo de energía.

La Directiva 2012/27/UE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética surge en un marco en el que se constata que la Unión Europea no va a alcanzar el objetivo de no aumentar en un 20 % la eficiencia energética en 2020. En este contexto se ha creado, con esta nueva directiva, un marco común, que refuerce dicho objetivo y que favorezca las nuevas mejoras de eficiencia energética más allá del 2020. En este sentido, dicha directiva modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de edificios, en lo referente a los edificios de los organismos públicos [20].

Existen procedimientos establecidos por el que se pueden conseguir certificaciones energéticas de los edificios, tanto para los edificios existentes como para el pequeño y mediano terciario o el Gran Terciario. Con ellos se pueden establecer el grado de eficiencia energética basándose en las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de los consumos asociados a las necesidades de calefacción, refrigeración, calentamiento de agua, ventilación e iluminación. Como se puede ver, todos ellos sistemas de producción de térmica en los edificios.

Con estos valores se procede a la emisión de una etiqueta energética que clasifica al edificio en una escala de siete letras, que parte de la G (edificio menos eficiente) a la letra A (edificio más eficiente) [21].

El calendario de disponibilidad de los datos estadísticos sobre el consumo de energía en España nos permite un análisis exacto del período 2014-2017.

Esto es debido a que los datos se presentan con un cierto decalaje temporal, por lo que a principios del 2017, tanto la serie de datos del Balance de Energía Final, como la que aporta los datos desagregados por usos sobre el consumo en el sector de la edificación sólo permiten llegar hasta el año 2015. Para nuestro caso, es suficiente, puesto que no da una idea del consumo que se está produciendo en nuestra tipología constructiva con respecto a las demás. (Ver figura 17).

Como puede verse en las tablas 1 y 2 de datos estadísticos que se encuentran en el anexo de este trabajo, entre los años 2010 y 2014 se ha producido una notable reducción del consumo de energía final en España, tanto en el conjunto de los sectores como en el sector de la edificación (-3.164 Ktpeps). Esto supone un 31 % en la reducción en el conjunto de sectores, idéntico al que tiene el sector de la edificación, lo que indica un comportamiento paralelo. A partir del 2015 se invierte esta tendencia y el consumo se incrementa respecto a 2014 en 1.253 Ktpeps. Este dato nos marca una posible influencia de la consolidación de la recuperación económica en el consumo.

Como puede verse en las tablas 3 y 4 del anexo A , y que nos muestran los datos concretos del consumo del sector no residencial, y en nuestro caso del educacional, podemos determinar que se ha producido un aumento del consumo eléctrico, pero las fuentes de generación se están derivando a las fuentes renovables (14,8%). Esto no significa que estemos en el camino, puesto que destaca que el peso de los productos petrolíferos, llega al 29,85%, muy por encima de lo que ocurre en el resto de sectores.

### Código Técnico de la Edificación (CTE)

Este documento reconocido surge a partir de los compromisos adquiridos por los países de la Unión Europea para la reducción del dióxido de carbono a la atmósfera. A través de la trasposición de la Directiva europea se fijan los requisitos mínimos de eficiencia energética para los edificios nuevos y para aquellos grandes edificios existentes que se reformen en un tanto por ciento de su volumen. Para conseguir estos objetivos, el CTE incide en la reducción de la demanda energética de los edificios mediante diferentes aspectos de estos. Mediante el empleo de técnicas constructivas sostenibles, el empleo de energías renovables y, fuera de su ámbito, pero no menos importante, mediante la concienciación de los usuarios sobre el uso de dichos edificios.

Más concretamente, las exigencias actualizadas hasta la fecha (está pendiente el lanzamiento de una revisión), son cinco, y son obligatorias tanto para los nuevos edificios como para aquellos que se sometan a rehabilitación.

El documento básico CTE HE de Ahorro de energía, se divide en los siguientes apartados:

- HE 0 Limitación del consumo energético
- HE 1 Limitación de la demanda energética
- HE 2 Rendimiento de las instalaciones térmicas
- HE 3 Eficiencia energética de las instalaciones de iluminación
- HE 4 Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria
- HE 5 Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica

Tanto el Documento Básico DB HE, como las exigencias básicas, se establecen en el artículo 15 del CTE y son las siguientes:

*Artículo 15. "...conseguir un uso racional de la energía necesaria para la utilización del edificio, reduciendo a límites sostenibles su consumo y conseguir que una parte de este consumo provenga de energías renovables..."*

#### HE 1 Limitación de la demanda energética.

"Los edificios dispondrán de una envolvente...que limite adecuadamente la demanda energética necesaria para alcanzar el bienestar térmico en función del clima de la localidad, del uso del edificio y del régimen de verano y de invierno, así como por las características de aislamiento e inercia, permeabilidad al aire y exposición a la radiación solar, reduciendo la aparición de humedades de condensación superficiales e intersticiales que puedan perjudicar sus características, tratando adecuadamente los puentes térmicos ..."

#### HE 2 Rendimiento de la demanda energética

"...dispondrán de instalaciones térmicas destinadas a proporcionar bienestar térmico de sus ocupantes. Esta exigencia se desarrolla mediante el RITE (Reglamento de instalaciones Térmicas en los Edificios) su aplicación quedará definida en el proyecto del edificio"

#### HE 3 Eficiencia energética de las instalaciones de iluminación

"...dispondrán de instalaciones de iluminación adecuadas a las necesidades de los usuarios y que sean eficaces energéticamente disponiendo de un sistema de control para ajustar el encendido a la ocupación real de la zona, así como un sistema de regulación que optimice el aprovechamiento de la luz natural..."

HE 4 Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria.

"...una parte de la demanda se cubrirá mediante sistemas de captación, almacenamiento y utilización de energía solar de baja temperatura..."

HE 5 Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica.

"...cuando así lo establezca el CTE se incorporarán sistemas de captación y transformación de energía solar en energía eléctrica para uso propio o suministro a la red..."

Con fecha 23 de junio de 2017 se publicó en el BOE la Orden FOM/588/2017, de 15 de junio, por la que se modifican el Documento Básico DB-HE "Ahorro de energía" del Código Técnico de la Edificación.

Esta modificación del Documento Básicos DB-HE del CTE, viene derivada de la necesidad de dar respuesta al Dictamen motivado abierto por la Comisión Europea por, a su entender, una incorrecta trasposición de España de la Directiva 2010/31/UE, y tiene los siguientes objetivos concretos:

☀ Adaptar su contenido a lo establecido en la Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 de eficiencia energética de los edificios.

☀ Converger con el procedimiento para la certificación energética de edificios definido en el Documento Reconocido de "Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios".

La modificación publicada en este momento, por tanto, es independiente de la revisión del DB HE de Ahorro de energía que debe realizarse cada cinco años de acuerdo con la Directiva 2010/31/UE, así como de la incorporación de una nueva sección en el DB HS de protección frente al radón obligada por la Directiva 2013/59/EURATOM, previstas ambas para su aprobación en 2018.

Este proyecto es una transposición parcial de la Directiva 2013/59/Euratom: *"por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, en lo relativo a las exposiciones médicas."*

La revisión del DB HE de Ahorro de energía, incluirá una actualización de las exigencias reglamentarias que deberán cumplir los edificios a partir del 1 de 2019 para poder ser considerados como edificios de consumo de energía casi nulo [22].

Esta revisión no ha salido en la actualidad, por lo que queda pendiente el cumplimiento hasta la fecha que marque la actualización.

### Reglamento de Instalaciones Térmicas de Edificios (RITE)

Este Reglamento regula las exigencias en eficiencia energética y de seguridad de las instalaciones térmicas que se instalen en los edificios para cubrir las necesidades de bienestar e higiene de los usuarios.

Para una mayor comprensión se divide en dos partes;

Parte I. Disposiciones generales.

Parte II. Compuesta por las Instrucciones Técnicas (IT), que contienen las exigencias técnicas y su cuantificación. Esto se realiza mediante el establecimiento de niveles o valores límite.

El RITE, establece las condiciones que deben cumplir las instalaciones destinadas a atender la demanda de bienestar térmico e higiene a través de las instalaciones de calefacción, climatización y agua caliente sanitaria, para conseguir un uso racional de la energía.

Las mayores exigencias en eficiencia energética que establece el Real Decreto se plasman en:

1. Mayor Rendimiento Energético en los equipos de generación de calor y frío, así como los destinados al movimiento y transporte de fluidos.
2. Mejor aislamiento en los equipos y conducciones de los fluidos térmicos.
3. Mejor regulación y control para mantener las condiciones de diseño previstas en los locales climatizados.

4. Utilización de energías renovables disponibles, en especial la energía solar y la biomasa.
5. Incorporación de subsistemas de recuperación de energía y el aprovechamiento de energías residuales.
6. Sistemas obligatorios de contabilización de consumos en el caso de instalaciones colectivas. Desaparición gradual de combustibles sólidos más contaminantes.
7. Desaparición gradual de equipos generadores menos eficientes.

Este reglamento se aplicará a las instalaciones térmicas en los edificios de nueva construcción o en sus reformas y a las instalaciones térmicas en los edificios existentes, en lo relativo a su reforma, mantenimiento, uso e inspección [23].

### **2.3. Fundamentos de los métodos existentes de evaluación.**

Para realizar una evaluación correcta de un edificio, tendríamos que obtener los valores necesarios a largo de vida útil, es decir, un control continuo de las entradas y salidas de materiales y energía al edificio.

Si nos centramos en la certificación energética actual, se establece un comparativo entre el comportamiento de nuestro edificio y un modelo. Por eso es necesario recoger cuál es el grado de similitud entre el edificio objeto y el edificio a comparar.

Los criterios de similitud vienen marcados por la localización, orientación, tipología, sector,... y por presentar características análogas tales como la compacidad, ocupación, funcionalidad, temporalidad, etc...

Estas decisiones nos van a condicionar claramente la metodología a seguir para el desarrollo del procedimiento de evaluación y de calificación a obtener por el edificio, ya que obtendremos resultados diferentes si nuestro edificio lo comparamos con la totalidad del parque edificatorio español o lo comparamos con los edificios de su sector o localidad.

Existen tres conceptos fundamentales para cualquier procedimiento de certificación/calificación y son los siguientes:

- La variable calificativa (indicadores energéticos), o el conjunto de variables de ser evaluadas y comparadas.
- El escenario de comparación, formado por el grupo de edificios que permiten generar un marco de comparación.
- La escala de puntuación, o criterios y límites escogidos para dar una determinada puntuación a un edificio cuando su variable calificativa sea cotejada en el escenario de comparación.

## **2.4. Indicadores energéticos.**

Para poder simplificar, cuantificar y resumir, mediante un único parámetro, la información energética de un edificio, aparecen los indicadores. Estos se pueden definir como parámetros, que proporcionan información acerca de la energía que se demanda o consume en un edificio. Pero muestra un significado que va más allá de su valor, pues dependerá de los objetivos perseguidos al realizar la certificación energética del edificio.

Este puede tener un carácter global, afectando a todos los sistemas y subsistemas de edificio o puede ser parcial, afectando solo al consumo de una parte de él, como pueden ser las instalaciones de producción de energía (calefacción, climatización, acs,...).

Existen dos variantes que califican en función de las emisiones de CO<sub>2</sub> correspondientes al consumo de energía primaria o al coste energético. En el caso de usar el consumo de energía final, se evalúan tanto las envolventes como los sistemas activos sistemas de calefacción y climatización, ACS e iluminación. De esta forma, se pueden obtener mejoras sobre el edificio para que se pueda aumentar su calificación.

La normativa europea (EN15203, 2005) propone el indicador que corresponde a la suma ponderada del consumo anual de todas las fuentes de energía dividido entre la superficie total acondicionada del edificio.

Existen tres aspectos que condicionan de forma relevante a la eficiencia energética del edificio y son, la epidermis, el sistema de climatización y el

comportamiento de sus ocupantes. Los dos primeros pueden medirse mediante aparatos y sistemas de medición directa o indirecta, pero el tercer aspecto, es decir el uso que los ocupantes hacen del edificio y sus sistemas, es variable y puede suponer una variación considerable en los resultados finales.

Existe una relación directa entre el consumo energético bajo y la falta de confort térmico en las zonas climatizadas. Esto puede ser debido a que la temperatura de consigna de los aparatos no se haya fijado correctamente.

En España, el sistema de evaluación inicial del edificio, se realiza mediante el programa LIDER, con el que podemos determinar las características térmicas del mismo sin tener en cuenta los sistemas de climatización empleados. De esta forma, podemos determinar las exigencias del CTE HE1 mínimas para nuestro edificio.

La norma ISO 50001:2018 indica cómo puede evaluarse el edificio objeto de estudio y establece la necesidad de definir indicadores que tengan en cuenta aquellos parámetros energéticos. Con ellos se podrá medir y evaluar el rendimiento energético del edificio, qué métodos debemos emplear y cuándo los datos deben ser analizados e informados.

El resultado final que obtenemos es información global y parcial sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> por m<sup>2</sup> y año del edificio en estudio (ver figura 18). Los indicadores parciales se dividen en Calefacción, ACS, refrigeración e iluminación. Obteniendo una etiqueta que gradúa las emisiones desde la A hasta la G.

| INDICADOR GLOBAL  |  | INDICADORES PARCIALES   |   |
|---|--|---|---|
|   |  | CALEFACCIÓN   |   |
|   |  | ACS   |   |
|   |  | Emisiones calefacción<br>[kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ·año] | Emisiones refrigeración<br>[kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ·año] |
|   |  | REFRIGERACIÓN   |   |
|   |  | ILUMINACIÓN   |   |
|   |  | Emisiones ACS<br>[kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ·año]         | Emisiones iluminación<br>[kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ·año]   |
| Emisiones globales [kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ·año] |  |   |   |

Figura 18: Modelo de emisiones en función del consumo energético. Fuente: Norma ISO 50001:2018

En nuestra investigación realizamos el estudio energético del caso de estudio seleccionado, en una primera fase y continuamos con la determinación del impacto ambiental producido por el edificio desde una

perspectiva global, es decir, desde la extracción de las materias primas hasta el fin de vida del edificio.

## **2.5. Métodos de cálculo.**

Para la evaluación energética de los edificios, hay que empezar distinguiendo entre edificios nuevos o existentes, pues existen diferencias en cuanto al método de evaluación. Para los de nueva construcción, se realizará de forma teórica, realizando una evaluación definitiva cuando el edificio se termine. Para los existentes, como es nuestro caso, se deben de recopilar los niveles de consumo, y esto dependerá de las características ocupacionales y funcionales del edificio. Además hay que tener en cuenta otros aspectos como son el mantenimiento de los sistemas de climatización e iluminación existentes.

Como las diferencias entre las predicciones de consumo y los consumos reales en el edificio son diferentes, se deben de concretar los límites que vamos a utilizar para realizar el estudio. De este modo, si los resultados no son coherentes con nuestros límites, será más fácil determinar en dónde se producen los errores.

Para la recopilación de datos hemos contado con la Unidad técnica de la Universidad de Jaén, que nos ha proporcionado tanto los datos técnicos de la construcción del edificio objeto de estudio, como de las instalaciones. Posteriormente se ha comprobado que dichas características se cumplieran en el edificio existente.

La información de consumos energéticos se ha obtenido mediante una estimación, en función de la zona, el horario, el uso y los sistemas de construcción y climatización instalados.

## **2.6. BREEAM. Building Research Establishment Environmental Assessment.**

Dentro de la certificación/calificación energética de los edificios, tenemos ejemplos más significativos sobre los distintos tipos de sistemas de certificación, como son el método BREEAM y el LEED. En ambos casos, para poder justificar la puntuación obtenida se parte de una laboriosa labor de recopilación de información.

Son sistemas que nos dan idea general de los procedimientos de certificación que se utilizan en Europa, y que en este primer caso valoran la calidad medioambiental de varios tipos de edificios nuevos y existentes. Partiendo de una inspección se realizan unos cuestionarios sobre varios aspectos medioambientales. Cada uno de estos aspectos corresponde con unos valores y la puntuación se basará de cada categoría y del total.

En el caso de edificios terciarios, para la obtención de estos valores se relacionan directamente con aspectos energéticos y medioambientales (transporte, agua, materiales, emisiones) así como de salud pública (calidad del aire, iluminación).

La figura 19, muestra la distribución de la puntuación entre las distintas categorías empleadas en el método.

| Checklist | EPI |
|-----------|-----|
| 0-160     | 1   |
| 140-210   | 2   |
| 190-260   | 3   |
| 240-310   | 4   |
| 290-360   | 5   |
| 340-410   | 6   |
| 390-460   | 7   |
| 440-510   | 8   |
| 490-560   | 9   |
| 540 +     | 10  |

Figura 19: Reparto de puntos entre categorías del Método BREEAM. Fuente: [www.breeam.es](http://www.breeam.es)

De forma general este procedimiento sistemático está orientado a la cuantificación medioambiental del inmueble. Se estructura en tres categorías; Impacto medioambiental global, impacto medioambiental local y medio ambiente interior. También pueden ser analizados edificios fuera del Reino Unido utilizando BREEAM Internacional.

Los criterios en la construcción que se valoran para obtener la calificación son:

- a) Gestión. Puesta en servicio, emplazamiento y procedimiento de contratación.
- b) Uso de la energía. Operacional, medidas de eficiencia energética y ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub>.
- c) Salud y bienestar. Aspectos interiores y exteriores que afectan a la salud y bienestar de los usuarios.
- d) Polución. Aspectos de contaminación de agua y aire.
- e) Transporte. Emisiones derivadas del transporte en obra y factores relativos al emplazamiento como transporte público, uso de la bicicleta, etc...
- f) Uso del terreno. Ubicaciones verdes y contaminadas, desarrollo urbanístico.
- g) Ecología. Conservación del valor ecológico y mejora del emplazamiento.
- h) Materiales. Implicaciones medioambientales de los materiales de construcción, incluido el impacto en el ciclo de vida.

## **2.7. Passiv Haus.**

Para Alemania este es el sistema utilizado desde 1996. Es un procedimiento que se utiliza solo para viviendas de nueva construcción, y determina el consumo de energía primaria del edificio, ver la figura 19. Posteriormente estos valores los compara con unos niveles máximos fijados en 15 kWh/m<sup>2</sup>-año para calefacción y 30 kWh/m<sup>2</sup>-año para la suma de los consumos de calefacción, de ACS, de iluminación y de ventilación.

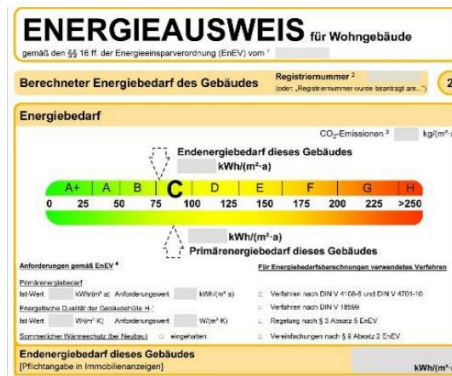


Figura 19. Sello y escala de graduación del método Passiv Haus. Fuente: <http://uvadoc.uva.es/>

El registro cromático va desde el rojo hasta el verde, siendo los valores de consumo más bajos los cercanos al verde. En este certificado se registran los valores del constructor y las reformas que se pueden llevar a cabo para mejorar el consumo energético de la vivienda.

A partir del año 2009 es obligatorio para todas las viviendas.

## 2.8. LEED. Leadership in Energy and Environmental Design.

Este certificado forma parte de los “certificados verdes”, y pretenden abarcar más lejos de los aspectos energéticos del edificio, y certifica en función de consideraciones y aspectos relacionados con el impacto ambiental desde una visión más general. Ha sido desarrollado por U.S. Building Council.

Los proyectos que persiguen la certificación LEED ganan puntos en varias categorías: ubicación y transporte, sitios sostenibles, eficiencia del agua, energía y atmósfera, materiales y recursos, calidad ambiental interior, innovación y más. Según el número de puntos alcanzados, un proyecto obtiene uno de los cuatro niveles de calificación LEED: Certificado, Plata, Oro o Platino (ver figura 20).



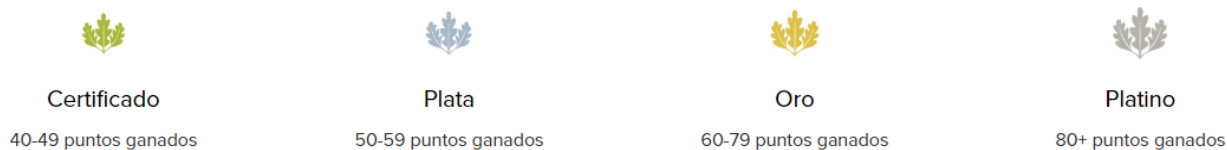


Figura 20. Sello y escala de graduación del U.S. Green building Council [44]

El esquema desarrollado de las categorías y las descripciones generales de cada una es la siguiente:

- a) Emplazamiento sostenible. Transporte, iluminación exterior, relación con el medio exterior,... (1 requisito, 14 puntos)
- b) Uso del agua. Tecnologías y uso eficiente del agua. (0 requisitos, 5 puntos)
- c) Energía y atmósfera. Emisiones, uso de fuentes de energía renovables, etc... (3 requisitos, 17 puntos)
- d) Materiales y recursos. Reciclaje, residuos, origen de materiales... (1 requisito, 13 puntos)
- e) Calidad del ambiente interior: calidad del aire interior, materiales con baja emisividad, confort térmico, iluminación interior... (2 requisitos, 15 puntos)
- f) Innovación y proceso de diseño: acústica, potenciación comunidad, educación... (0 requisitos, 4 puntos)

Este sello incluye aspectos más amplios que los energéticos y entre otras consideraciones incluye:

- Análisis de ciclo de vida del edificio y sus materiales.
- Impacto económico, ambiental y sobre la salud.
- Relación con el entorno (transporte, trabajo...)

## 2.9. Edificios energía cero

Con lo anteriormente expuesto, todos los países europeos deberán cumplir los objetivos en la que la Directiva de Eficiencia Energética de

Edificios (2010/31/EC) marca la fecha límite de implantación en 2020, son los llamados edificios de consumo de energía casi nulo, denominados nZEB (Near Zero Energy Buildings), en inglés. En la figura 21 vemos la implantación para el 2014.



Figura 21: Implantación de edificios nZEB a finales de 2014. Fuente: [www.eadic.com](http://www.eadic.com)

Para el 2014, en 15 países había una definición oficial para los nZEB. En otros 3 países, se han concretado las exigencias, pero la publicación oficial está en fase de aprobación y en los 9 países restantes, aún se está trabajando esta definición.

Sólo 8 países ya han conseguido definir las exigencias nZEB en edificios existentes. Dependiendo del país y de las condiciones del parque edificado, esta regulación exige los mismos requerimientos para edificios nuevos y existentes. Las exigencias en los edificios existentes son menos estrictas que en los edificios de nueva planta.

En el caso de España la definición de los requerimientos para los nZEB existentes y de nueva planta está en fase de desarrollo. Las implicaciones que la aplicación de esta directiva tiene en este sector son de enorme calado porque transformarán muchos de los procedimientos de diseño, construcción y gestión de los edificios hacia una mayor eficiencia energética en los edificios.

El objetivo es que tenemos que construir edificios ecointeligentes que estén diseñados para contribuir al objetivo general de reducción de consumos energéticos y de emisiones de CO<sub>2</sub> con el mínimo coste económico y ambiental [24].

La condición que debe satisfacer un edificio de energía cero es que la generación de energía sea de origen renovable y exceda a la demanda de energía ponderada en un periodo de tiempo determinado, normalmente un año. El balance de energía puede determinarse bien realizando un balance entre la energía suministrada y exportada o bien realizando un balance entre la demanda energética y la generación [25] [26] [27].

Para poder cumplir este requisito, es necesario construir edificios de muy bajo consumo energético, inferior a 60 kWh/m<sup>2</sup> por año.

La adaptación para cumplir las exigencias normativas son las que se prevén según el calendario marcado por las Directivas Europeas y que se muestra en la

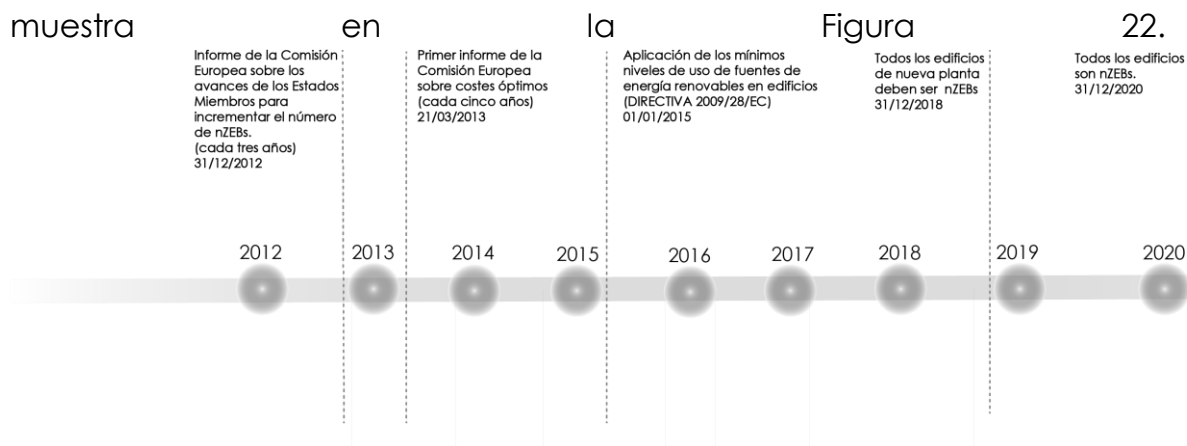


Figura 22: Cronología de implantación de edificios nZEBs por la Comisión Europea.

Fuente: elaboración propia.

Además en los Edificios de Ceros Emisiones, destacamos algunas de sus características:

- Máxima calificación energética. Adaptado a las condiciones climáticas del entorno y a las necesidades de su funcionamiento.
- Necesidades de calor y frío radicalmente por debajo de edificios convencionales.
- Resultado del pensamiento de sus moradores, donde el continente refleja su contenido.
- Empleo de materiales de bajo impacto ambiental: piedra natural, corcho, madera certificada y pinturas naturales.

En Europa, se están dedicando grandes esfuerzos y acciones a la actualización del concepto nZEB. Los Estados miembros de la UE deben proporcionar planes nacionales para nZEB que se convertirán en la norma de referencia para los nuevos edificios públicos para 2020 [28].

Se busca el edificio sostenible, como un edificio que mantiene la integridad estructural, considera la salud, la seguridad y la comodidad de los usuarios, incluye medidas de eficiencia y considera los impactos ambientales en otras palabras "ganancias y eficiencia máximas de energía, minimizando pérdidas".

La figura 23 sintetiza el concepto de edificio sostenible, en el que se empieza a representar el concepto "circular" en el ciclo de vida del mismo.

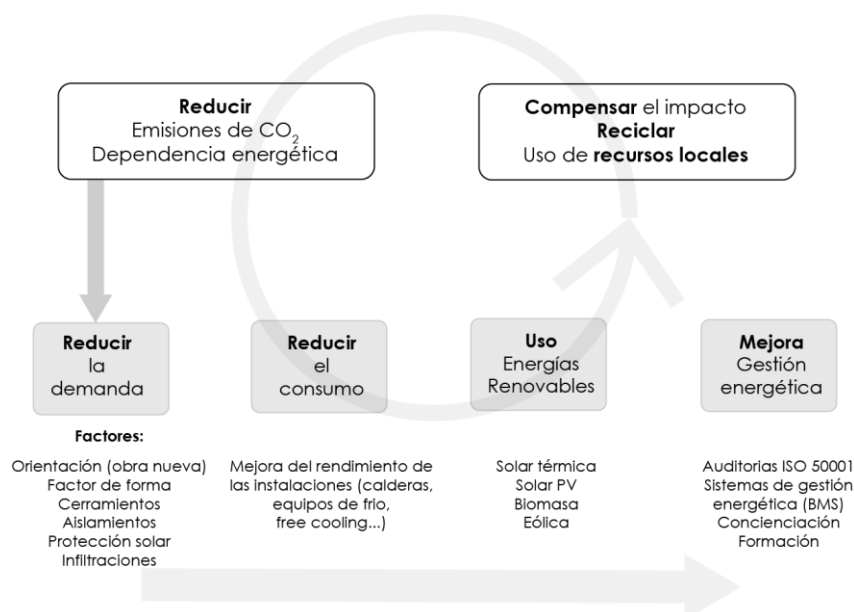


Figura 23: Edificios sostenibles. Fuente: Elaboración propia

Entonces podemos decir que un edificio de balance energético cero (nZEB) es un edificio con un alto nivel de eficiencia energética, donde la poca cantidad de energía requerida debe proceder de fuentes de energía renovables, de manera que su balance energético sea cero.

Se diferencia del concepto de edificio autosuficiente y aislado en que además de generar toda la energía que consumen, están conectados a las redes de suministro energético, y podrían entregar energía que se ha generado en el edificio [29].

Aunque esta definición, muy genérica, debe ser traducida en requerimientos normativos para interpretar lo que es edificio de consumo de energía casi nula. Estos requisitos influirán no solo en las soluciones técnicas propias de los edificios, sino también en los sistemas de generación de energías renovables a utilizar y en las redes energéticas inteligentes (Smart Grid) a las que los edificios se conectan.

Dado que aproximadamente un tercio de las emisiones de GEI pueden atribuirse a edificios y dado que se estima que los edificios representan alrededor del 40% del uso de energía a nivel mundial, los nZEBs brindan oportunidades significativas para reducir las emisiones de GEI y reducir el consumo de energía.

La Comisión Europea en la aplicación de su directiva supone implicaciones en el sector de la construcción que son de enorme calado porque transformarán muchos de los procedimientos de diseño, construcción y gestión de los edificios hacia una mayor eficiencia energética en los edificios

Pero este tipo de edificio presenta algunas dudas en el sentido que no se considera el equilibrio específico entre el diseño de edificios pasivos, las tecnologías de energía renovable y el comportamiento del operador o gestor del edificio.

No se tiene en cuenta el método de generación de energía o las fuentes de combustible y, por lo tanto, no se tiene en cuenta que un tipo de generación provoca más o menos impacto que otra, alejándose del concepto de sostenibilidad. Se supone que cada unidad de energía es equivalente a otra unidad de energía, independientemente de la fuente, por lo que las emisiones que se producen en la generación de la energía se consideran las mismas, no siendo así en realidad.

Además, este modelo no impone el uso conservador de la energía por parte del usuario final o considera la eficiencia de los aparatos directamente. El uso de este modelo también puede ocasionar dificultades para identificar oportunidades de ahorro de costos, tales como aprovechar las tasas de tarifas de energía pico y fuera de horas pico.

El **RD 235/2013** de certificación energética marca un calendario en el que todos los edificios nuevos que se construyan a partir del 31 de diciembre de 2020 serán edificios de consumo de energía casi nulo. Los requisitos mínimos que se deberán satisfacer serán los que en su momento determine el Código Técnico de la Edificación (ver figura 24).

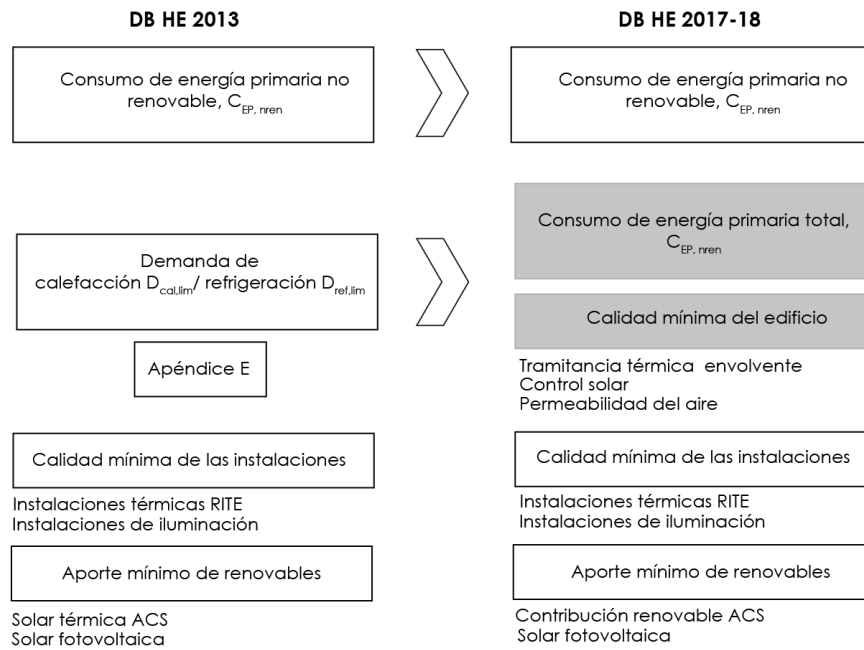


Figura 24: Evolución de las condiciones exigidas por el CTE. Ministerio de Fomento [29]

## 2.10. Los sistemas de generación de energía.

Para entender la dimensión de lo que puede suponer que los edificios puedan aportar suministro energético a la red, hay que analizar el consumo (ver figura 15) y los distintos sistemas de generación y su proporción con el resto ya que el sector de la edificación es, a nivel mundial, el responsable del 40% del consumo de energía primaria.

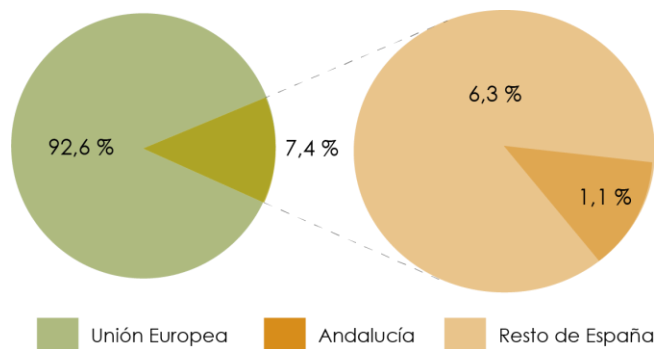


Figura 25: Consumo de energía primaria. Fuente: Datos energéticos de Andalucía en 2017. Agencia Andaluza de la Energía.

Dentro de contexto, nos encontramos con diferentes sistemas de generación de energía para obtener y mantener las condiciones de confort en los edificios públicos.

Si reducimos el análisis a los datos para la generación de energía en la Comunidad Autónoma de Andalucía se observa que incluyen la generación térmica convencional, y la generación en centrales de bombeo. En Andalucía

existe un parque generador de este tipo de 8.679 MW. La tecnología con mayor peso es la de ciclo combinado de la que se dispone de 7 centrales que suman 6.037 MW. Le sigue las centrales de carbón, con tres instalaciones, que suman en la actualidad 2.072 MW. Los datos de estadísticos de potencia instalada en Andalucía para el 2017 ascendían a 15.766,8 MW, debido al aumento de la energía fotovoltaica, siendo la potencia renovable del 38,8% (6.124,7 MW) del total del parque generador andaluz [30]. Estos datos se desglosan como se puede ver en las figuras 26 y 27.

La distribución de la producción de energía no renovable se ve marcada por el incremento de las centrales de carbón y de los ciclos combinados, mientras que la producción de bombeo se reduce.

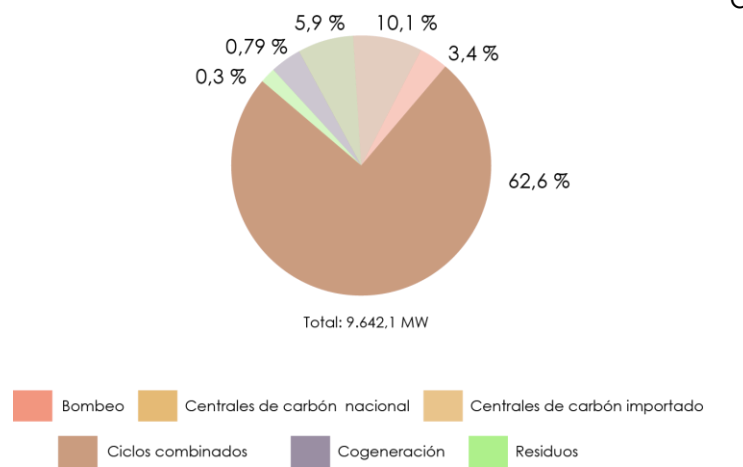


Figura 26: Producción de no renovable. Fuente: Datos energéticos de Andalucía en 2017. Agencia Andaluza de la Energía.

Todas las tecnologías renovables han visto incrementada su producción salvo las hidráulicas, debido a los ciclos pluviales del año de aporte de los datos.

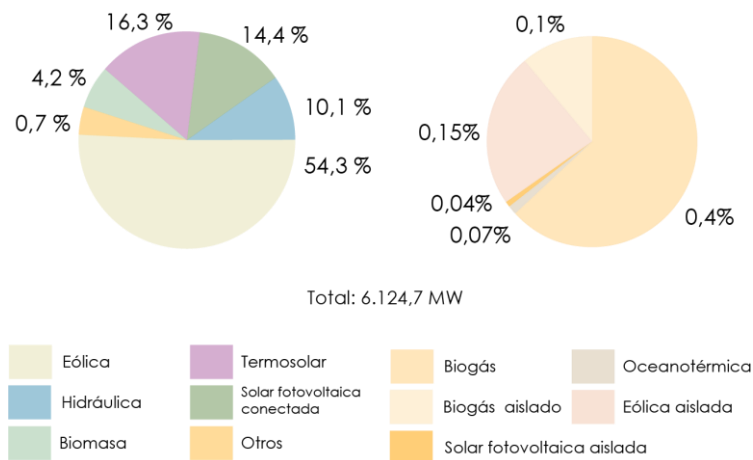


Figura 27: Consumo de energía primaria. Fuente: Datos energéticos de Andalucía en 2017. Agencia Andaluza de la Energía.

Con estos datos podemos llegar a la conclusión de que progresivamente se están incrementando los sistemas de producción de energía por tecnologías renovables. Pero este dato no viene acompañado de los datos de reducción del consumo, sobre todo en el sector servicios, dentro de donde se encuentran los edificios terciarios públicos.

Herramientas como la integración eficiente de tecnologías para la producción de calor, frío y electricidad, la simulación y optimización de sistemas de generación de energía térmica para los edificios y centros de proceso de datos y para los procesos industriales, son algunas de las estrategias de control y reducción de este consumo. La integración de sistemas energéticos de fuente renovable es capital para las reducciones de las emisiones.

## **2.11. La sostenibilidad en los edificios terciarios.**

En la 1ª Conferencia Europea de Ministros sobre Política de Vivienda sostenible, celebrada en Copenhague 22 y 24 Abril de 1996, se fundamentó:

“La necesidad de recuperar el concepto de ciudad próspera y cohesionada de forma que, mejorando su integración en el territorio y el medio natural, se reduzca su impacto ambiental. Por tanto debe aproximarse la regeneración urbana, y por ello, favorecer la reutilización del parque de viviendas y con ellos mejorar su eficiencia energética y medioambiental, considerando la vivienda, no como un elemento aislado, sino intrínsecamente inseparable de su entorno e interrelacionada con la política de suelo en el marco de la construcción de la ciudad” [31].

Este concepto general aplicado a aquellos edificios que tienen una mayor demanda energética, como son los públicos, hace que el estudio de las técnicas y conductas de ahorro energético sean acciones prioritarias para la sostenibilidad general.

En dicha conferencia, hicieron hincapié en varios aspectos como:

- Ahorro energético.
- Tratamiento especial de los desechos de construcción.
- Utilización de nuevos materiales constructivos bajo el concepto de Sostenibilidad.
- Análisis sobre el ciclo de vida.

El objetivo principal de los edificios ha sido el de proteger a sus ocupantes de los elementos naturales. Los principales esfuerzos se han enfocado a la mejora de los aspectos necesarios para llevar a cabo este objetivo, es decir, una mejora en la calidad global del edificio y en el dominio de los costes correspondientes.

Los edificios, a lo largo de su construcción, uso y demolición, ocasionan una gran cantidad de impactos ambientales que nacen de nuestra actividad económica. Éstos ocasionan un gran impacto en el ambiente global a través de la energía utilizada para proveer a los edificios de los servicios necesarios y de la energía contenida en los materiales utilizados en la construcción.

Debido a esto, el concepto **Sostenibilidad** se tomó como una cuestión fundamental, entendiéndola como un estado que requiere que los seres humanos lleven a cabo sus actividades de una manera, que proteja el ecosistema en todo su conjunto.

*"Satisfacer las necesidades de la actual generación sin sacrificar la capacidad de futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades".*

La sostenibilidad fue el objetivo del desarrollo sostenible, tal como se define en el informe Brundtland 1987, y se aplica tanto a edificios y otras obras de construcción, como a cualquier actividad que genere un impacto en el planeta. [32].

Abordar la sostenibilidad en la construcción de edificios incluye la consideración de los tres aspectos principales de sostenibilidad:

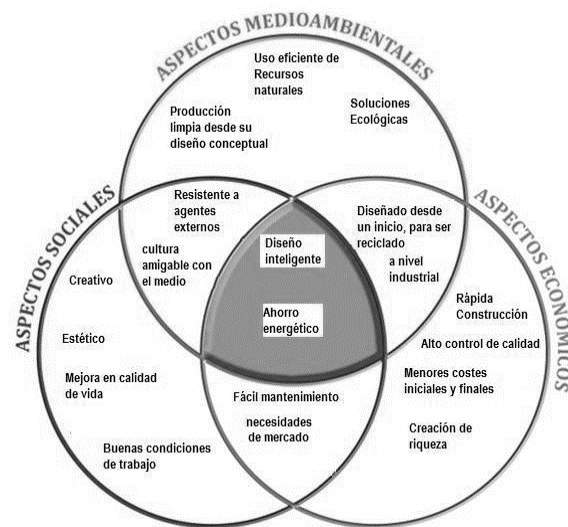


Figura 28. Principales aspectos de Sostenibilidad. Fuente: <https://www.researchgate.net/>

Estos conceptos han sido desarrollados por parte de la norma ISO 21929 de donde obtenemos la figura 29:



Figura 29: Indicadores de sostenibilidad para construcción. Fuente: [www.construible.net](http://www.construible.net).

La construcción sostenible no sólo abarca a edificios, sino también cuenta con el entorno y la forma de comportarse las ciudades y la sociedad que vive en ellas (ver figura 30). El desarrollo urbano sostenible tiene la intención de crear un entorno urbano que no atente contra el medio ambiente, con recursos, no sólo en cuanto a las formas y la eficiencia energética, sino también en su función como un lugar para vivir [33] [34].

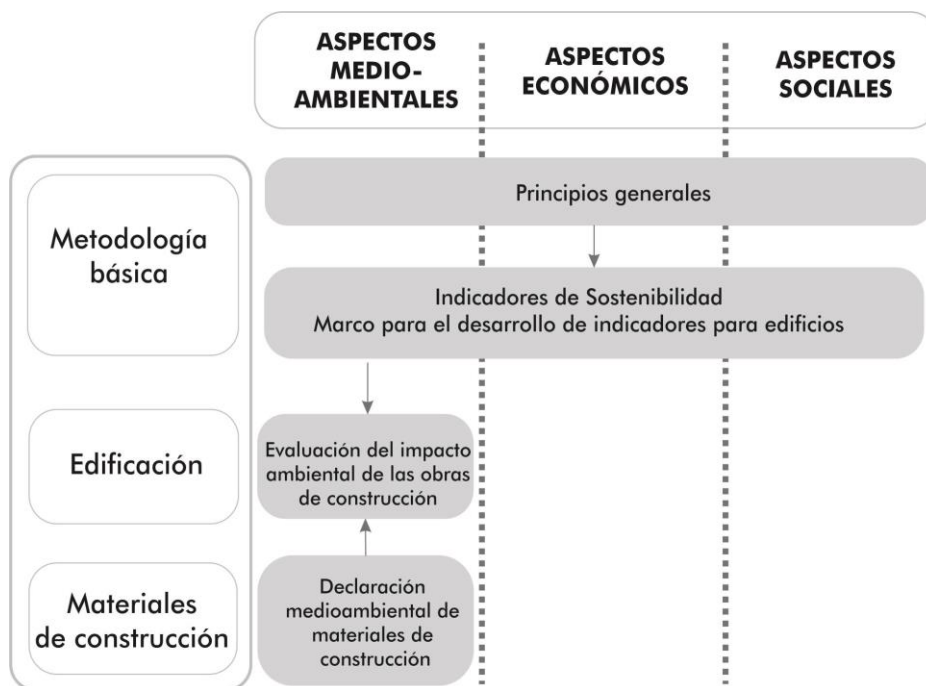


Figura 30. Sostenibilidad en edificios y obras de construcción. Fuente: [www.fao.org](http://www.fao.org).

La norma ISO/DIS 15392:2008 Sostenibilidad en la construcción de edificios. Principios generales, identifica y establece los principios generales de sostenibilidad en la construcción. Se basa en el concepto de desarrollo sostenible que se aplica al ciclo de vida de los edificios y a las obras de construcción, durante todo su ciclo de vida.

Además considera aspectos económicos, ecológicos y sociales de forma equilibrada. Los aspectos sociales y culturales de la sociedad humana se entienden como parte de la función de los ecosistemas, ya que son un elemento

clave de las necesidades humanas. Cuestiones como la seguridad y salud, satisfacción, patrimonio cultural, repercusión en la población. Los aspectos económicos están vinculados con aspectos sociales, aunque condicionada por voluntad y decisiones políticas. Sobre todo influye el valor económico y la productividad. En cuanto a los aspectos ambientales, son fundamentales y determinantes en el encuadre de un desarrollo sostenible, puesto que reflexiona sobre el cambio climático y mejora la relación sobre el ser humano y nuestro entorno. Son valores como el cambio climático, consumo de recursos naturales, contaminación ambiental, pérdida de biodiversidad y de funciones del ecosistema, etc.

Los aspectos energéticos están vinculados a los consumos para la producción de materias primas y contaminación atmosférica, además de los consumos en las instalaciones, que a su vez podríamos hablar de aspectos tecnológicos que favorecen la eficiencia energética.

Los edificios a lo largo de su construcción, uso y demolición, ocasionan una gran cantidad de impactos ambientales que nacen de nuestra actividad económica. Estos impactos ocasionan gran deterioro en el ambiente global y en el entorno, a través de la energía utilizada para proveer a los edificios de los servicios necesarios y de la energía contenida en los materiales utilizados en la construcción [35]. Sin embargo, hablando constructivamente, es un error pensar que basta con cambiar de materiales para alcanzar una arquitectura sostenible. El coste energético de fabricación de una construcción, depende de la cantidad de material utilizado y de su naturaleza, además de la durabilidad general del edificio. Por el contrario, el coste energético de mantenimiento, depende de la forma particular con que se empleen y la eficiencia de sus sistemas energéticos [36].

Es por ello, que el concepto de Análisis de ciclo de vida nos aporta una evaluación de los edificios, para determinar los impactos medioambientales que estos producen desde "la cuna hasta la tumba" (costes de extracción, fabricación de materiales, transporte de elementos, vida útil del edificio, mantenimiento, abatimiento de residuos hasta un estado inerte, reciclado de residuos...).

## **2.12. El futuro de los sistemas energéticos.**

Este concepto de desarrollo sostenible, y por tanto el ciclo de vida, se complementa con la aparición de otro concepto, Ecodiseño (ver figura 31). El ecodiseño, es una metodología que integra criterios ambientales en el diseño de productos y servicios, y en este caso, de edificios, Consiguiendo la reducción de los impactos ambientales que se producen, a lo largo de todas las fases de su ciclo de vida [37].



Figura 31. Evolución hacia el Ecodiseño y el ACV

La norma UNE 150301:2003, especifica los requisitos a aplicar en el proceso de diseño y desarrollo para la mejora de los productos y servicios de una organización, a través de un sistema de gestión ambiental. Su implantación facilita la etapa de diseño, con tareas sistemáticas para identificar, controlar y mejorar aspectos ambientales de lo que se diseñó, sin transferir los impactos de una etapa a otra del ciclo de vida (Traslado del impacto).

En ella se establecieron unas bases para el sistema de gestión ambiental del proceso de diseño, lo cual posteriormente, dio lugar a la ISO 14006: 2011. Ecodiseño, y con ella apareció el mundo de las eco etiquetas [38].

Algunas de estas ecoetiquetas se representan en la figura 32, y de forma general corresponden con todos los ámbitos del diseño, fabricación, procesos de elaboración, manufacturación y reciclaje de los productos.



Figura 32. Etiquetado ecológico. Fuente: [www.miteco.gob.es](http://www.miteco.gob.es)

La etiqueta ecológica garantiza que todos los productos que la llevan cumplen los mismos criterios técnicos para ser considerados mejores desde el punto de vista ambiental, criterios previamente consensuados y recogidos en normas específicas para cada producto.

Con los datos que las emisiones mundiales de dióxido de carbono alcanzarán un nivel récord en 2018 y el dato preocupante del informe elaborado por el Grupo intergubernamental de expertos en cambio climático (IPCC), de que hay un escaso margen de maniobra a la hora de llevar una acción clara para alcanzar el objetivo de mantener el calentamiento global por debajo de 1,5°, el futuro de los sistemas energéticos estará marcado cada vez más por los principios de la sostenibilidad, que ligados al avance de las nuevas tecnologías permitan un control y estabilización de las condiciones de generación y consumo de la energía.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- 3.1. Problema energético en Andalucía y en el sector terciario.
- 3.2. Los consumos energéticos en la Universidad de Jaén.
- 3.3. Declaración de política en sostenibilidad de la Universidad de Jaén.
- 3.4. El ciclo de vida del edificio.
- 3.5. Selección del edificio. Caso de estudio.
- 3.6. Sistemas de producción de energía.
- 3.7. Planteamiento general de la metodología experimental y de simulación.
- 3.8. Calificación energética. LIDER-CALENER. Limitación de la demanda energética. Introducción de las coordenadas.
- 3.9. Introducción en el programa CALENER GT de los sistemas de producción energética.

### 3.1. El problema energético en Andalucía y en el sector terciario.

Los datos de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Andalucía (ver figura 33), vienen caracterizadas desde el 2015 por un sensible aumento, situándose su valor (41.280 ktCO<sub>2</sub>) en un nivel similar al de 2011 y convirtiendo al año 2014 en un punto de inflexión. Este incremento tuvo su origen en el aumento del consumo de todos los recursos primarios fósiles y de manera muy destacada, en el del carbón para la generación eléctrica, la fuente energética más contaminante, con unas emisiones que crecieron en un 37 % respecto al año 2014.

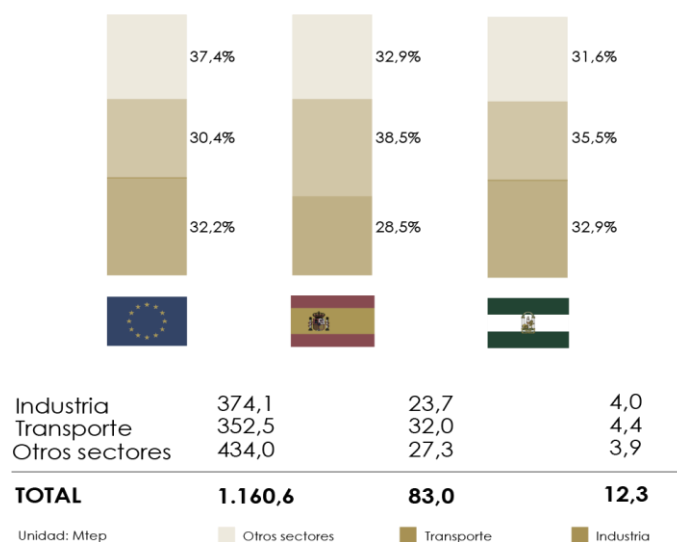


Figura 33. Datos del sector servicios, residencial y primario [41]. Fuente: Datos energéticos de Andalucía en 2017. Agencia Andaluza de la Energía.

Si estos datos los clasificamos por los sectores de actividad, transporte, servicios y residencial se observa en la figura 34, un incremento respecto a los años anteriores, siendo el sector servicios el que mayor porcentaje obtiene con un 37,3% respecto al total.

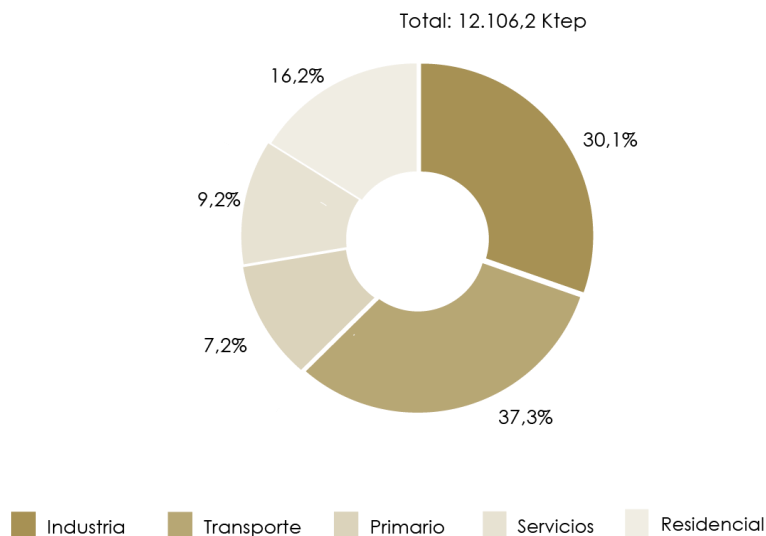


Figura 34. Consumo final por sectores. Fuente: Datos energéticos de Andalucía en 2017. Agencia Andaluza de la Energía.

El consumo final de energía por provincias andaluzas nos refleja que Jaén se encuentra entre las que menor consumo tiene (ver figura 35). En términos generales la demanda se contrae en todas las provincias menos en Cádiz, impulsadas por un incremento del consumo de gas natural en el sector industrial en la provincia. [39-41].

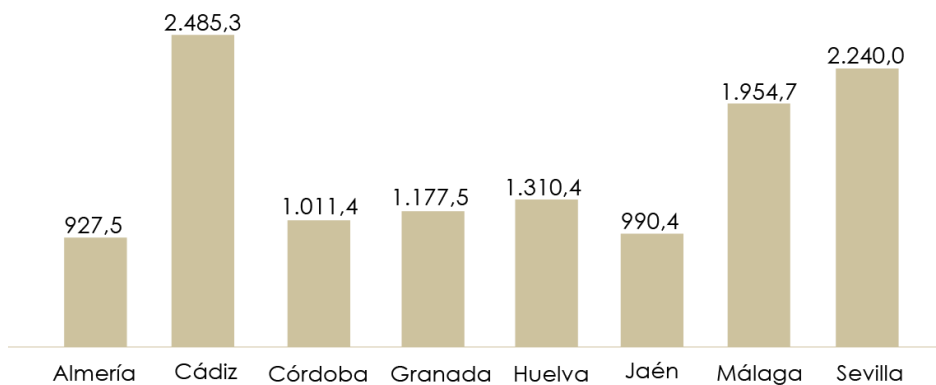


Figura 35. Consumo de energía final por provincias andaluzas. Unidad ktep. Fuente: Datos energéticos de Andalucía en 2017. Agencia Andaluza de la Energía.

Es significativo que la suma del consumo de energía eléctrica y de productos petrolíferos suponga el 60,1% del total del consumo final, las energías renovables un 16,8% y un 22,5% el gas natural (ver figura 36).

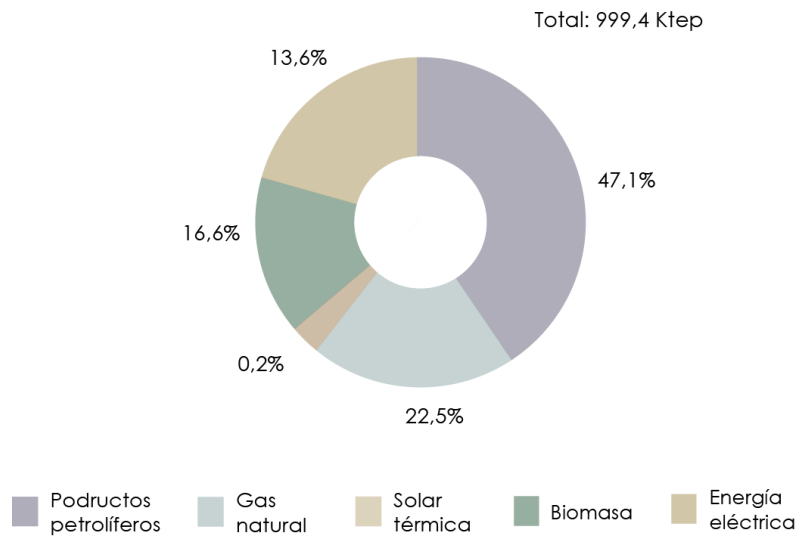


Figura 36. Consumo de energía final por fuentes en Jaén. Fuente: Datos energéticos de Andalucía en 2017. Agencia Andaluza de la Energía.

El consumo por sectores nos muestra que el transporte junto con el consumo de combustibles fósiles se encuentra a la cabeza, seguida de la industria y el sector primario. El sector servicios con un 16,1% indica un consumo importante con respecto a los demás sectores, siendo necesario activar medidas correctoras ver figura 37).

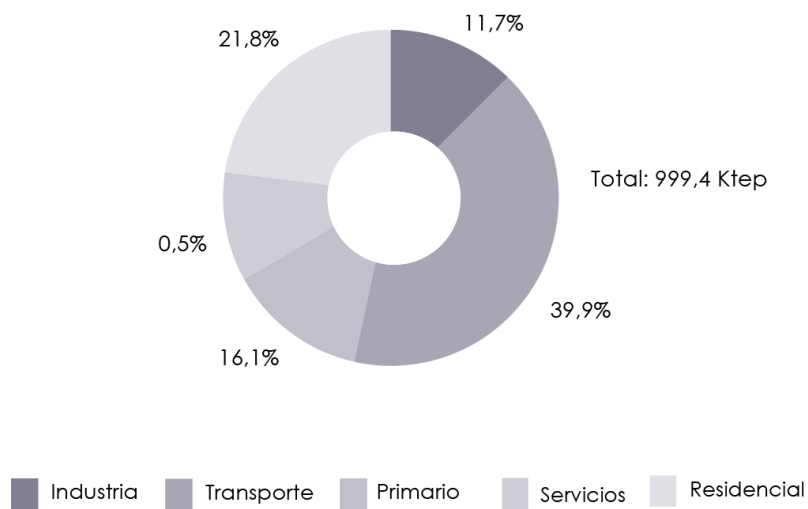


Figura 37. Consumo de energía final por sectores en Jaén. Fuente: Datos energéticos de Andalucía en 2017. Agencia Andaluza de la Energía.

Realizando un análisis de los datos anteriores las emisiones debidas a la generación eléctrica han experimentado un fuerte crecimiento, suponiendo un porcentaje importante y con ello las emisiones se han incrementado en todos los sectores de consumo salvo en el primario.

Por lo tanto, y ante la vinculación directa existente entre la economía y consumo de energía, es de suma importancia activar políticas energéticas que incidan en el desacoplamiento entre este crecimiento económico y el consumo de energía, particularmente energías fósiles [42].

### 3.2. Los consumos energéticos en la Universidad de Jaén.

Esta tendencia de crecimiento se ve reflejada también en los datos obtenidos para el año 2017 en la Universidad de Jaén y que marcan una tendencia al alza. Nos encontramos con un incremento del 4,7% en el consumo global (10.921.013 kWh) respecto a 2016, explicado en parte, por el comportamiento térmico en los meses cálidos. En 2017 la temperatura media anual fue 0,8°C superior a la de 2016 (+4,2%).

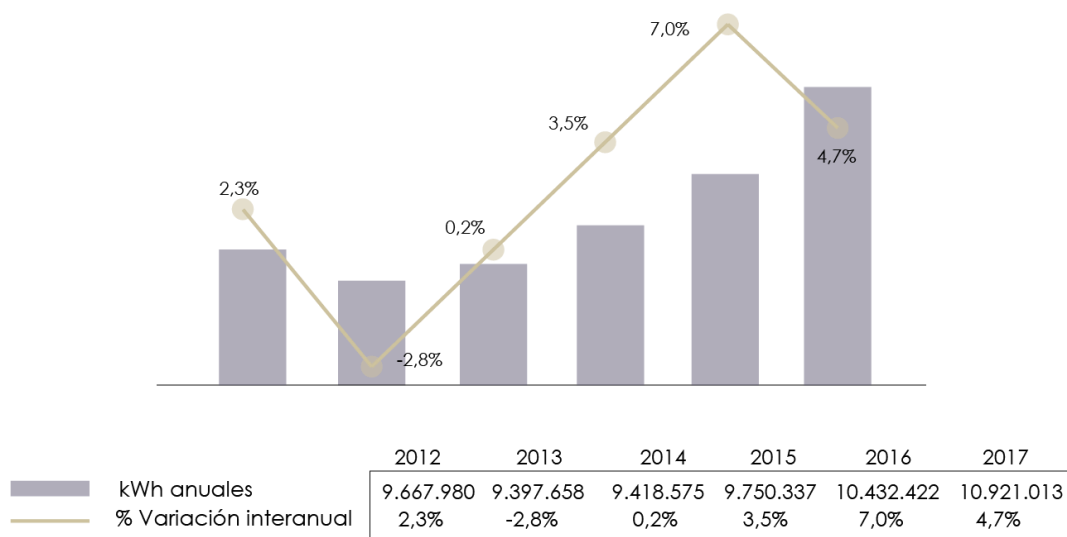


Figura 38. Datos del consumo eléctrico de la Universidad de Jaén. Fuente: Declaración en política ambiental de la Universidad de Jaén.

### 3.3. Declaración de política en sostenibilidad ambiental de la Universidad de Jaén.

La Universidad de Jaén es consciente del papel que como institución tiene en la educación y en la investigación, y dentro de su compromiso de integrar la dimensión ambiental a todas las actividades docentes, investigadoras y de servicios, sirve de referencia para la búsqueda de una sociedad que apueste por la sostenibilidad.

Con esta declaración, asume el compromiso de trabajar por la sostenibilidad, la cual será sustentada en los principios rectores y directrices recogidas en la Agenda 21 de la Conferencia de Naciones Unidas sobre

Medio Ambiente y Desarrollo. Del mismo modo, y teniendo como referencia la Carta Universitaria Copernicus para el Desarrollo Sostenible, documento impulsado por la Conferencia Europea de Rectores y las recomendaciones elaboradas por la Comisión Sectorial de la CRUE para la Calidad Ambiental, el Desarrollo Sostenible y la Prevención de Riesgos en las Universidades (CADEP).

En este sentido la Universidad de Jaén, asume el siguiente decálogo, dentro del cual se desarrolla este proyecto de investigación:

- Adoptar las medidas necesarias para garantizar el cumplimiento de la normativa medioambiental que le sea aplicable, intentando ir más allá de los mínimos reglamentarios en aquellas actividades que le sea posible.
- Establecer un sistema de gestión para prevenir, reducir y eliminar el impacto ambiental derivado de la actividad universitaria, como muestra de su compromiso para la prevención de la contaminación y la mejora continua de nuestro entorno.
- Fomentar el ahorro de recursos naturales, materias primas y energía, racionalizando el consumo mediante la adopción de las medidas necesarias.
- Promover la reducción y valorización (reutilización, reciclaje y recuperación) de los residuos generados por la actividad universitaria.
- Considerar criterios medioambientales en la planificación y gestión de las infraestructuras de la Universidad de Jaén, tanto en el diseño, adecuación y uso de sus espacios e inmuebles.
- Incluir cláusulas sociales y ambientales en los procedimientos de contrataciones y compras, promoviendo con carácter general, condiciones especiales de ejecución para los proveedores y adjudicatarios con objeto de garantizar un adecuado nivel de calidad ambiental.
- Sensibilizar, informar y formar a toda la comunidad universitaria para que observen las directrices marcadas en la política ambiental, promoviendo su participación activa en la gestión ambiental y en la mejora de la calidad del entorno universitario.

- Fomentar la incorporación de los conceptos de responsabilidad social y desarrollo sostenible, y sus principales contenidos, en las competencias transversales de las titulaciones oficiales.
- Desarrollar y fomentar líneas de investigación que propicien la transferencia del conocimiento científico y tecnológico que avance hacia la sostenibilidad.
- Establecer objetivos y metas anualmente que permitan asumir los compromisos de la presente declaración, así como realizar un seguimiento continuo de la repercusión ambiental de la actividad universitaria, evaluando el grado de cumplimiento de los objetivos y metas establecidos, para lo cual, realizará memorias anuales que serán públicas y difundidas para su conocimiento por toda la institución, como proceso de mejora continua con respecto al medio ambiente [43].

### **3.4. El ciclo de vida del edificio.**

Si analizamos todos los procesos que se realizan para la construcción de un edificio, podemos observar que tiene asociada una importante carga tanto de materias primas como de energía consumida.

Desde las primeras fases de diseño, elección de la zona donde construir, fabricación de materiales, construcción, uso y demolición, se están produciendo un intercambio dinámico de flujos energéticos que se encuentran interrelacionados en las que las decisiones de una fase pueden afectar a otras y por consiguiente en su impacto global.

Si se dividen los flujos a lo largo del ciclo de vida, nos encontraríamos en primer lugar con la fabricación o producción (que lleva incorporados otros flujos como los de extracción de materias primas y transporte), puesta en obra de los materiales, instalación uso del edificio y fin de vida.

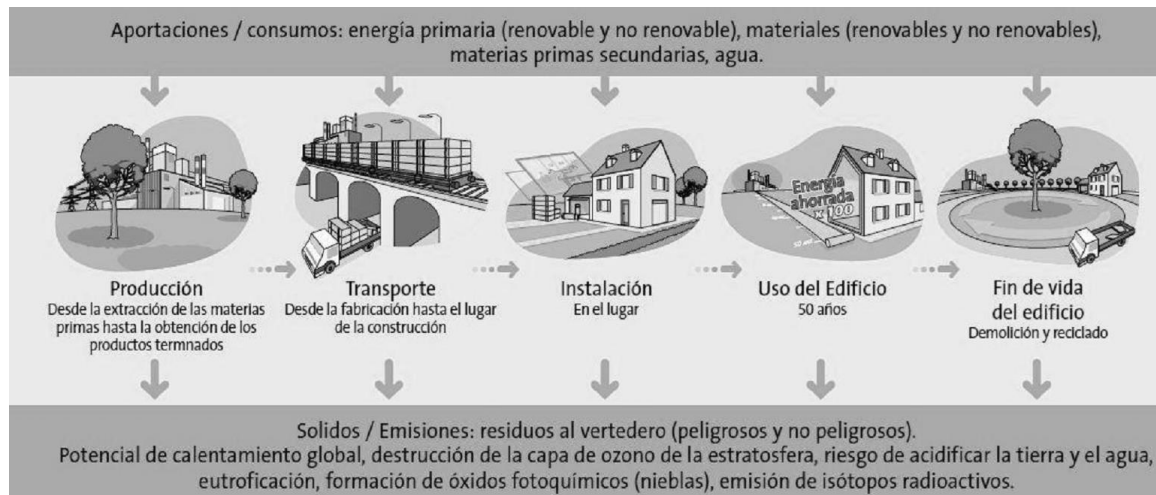


Figura 39. Ciclo de vida del edificio. [44]. Fuente: <https://new.usgbc.org/leed>.

Estos flujos se podrían clasificar en estáticos o en dinámicos, según su duración y la gestión que se realice en cada uno de ellos.

Existen numerosos estudios que han determinado que entre el 20% y el 34% del total de la energía que se consume en el edificio, está asociada a flujos estáticos, mientras que entre un 66% y un 80 % está asociado a flujos dinámicos, asociados a las fases de uso y explotación del edificio [44].

Debido a que la etapa de uso del edificio está directamente relacionada con los usos energéticos (alumbrado, fuerza, climatización, etc.), y ante el incremento del consumo y de las emisiones en la edificación, nuestro trabajo se desarrolla complementando los sistemas de evaluación exigidos por la normativa, con una metodología que determina de forma global las emisiones e impactos en todas las fases del edificio.

En el sector terciario, el consumo de aire acondicionado es del 22% y el consumo de energía no eléctrica para climatización es del 43%. Si consideramos que la calefacción es el 60% de este último se obtiene que el dato para climatización es del 48%. Con los últimos datos obtenidos en Europa, se observa un incremento del consumo de aire acondicionado en los países meridionales (España e Italia representan un porcentaje superior a la media Europea).

En la Universidades se consume una gran cantidad de energía, debido a las condiciones de su actividad diaria. Docencia, investigación, biblioteca, laboratorios, oficinas, despachos, talleres, etc... que se dividen en dos extremos muy claros, refrigeración en verano y calefacción en invierno, quedando en tercer lugar la producción de agua caliente sanitaria y que en otros sectores, como el residencial supone un % mayor.

Para intentar reducir las emisiones y consumos de energía, primero hay que determinar la cantidad y la fase en la que se producen estos. Con ello

podremos determinar las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas y plantear soluciones para la reducción, mejora y eliminación de dichos impactos.

Al ser el edificio un sistema complejo, desde el punto de vista energético, y debido a la gran cantidad de materiales y subsistemas que requiere, hay que dividir el estudio en numerosos niveles. Para ello es necesario la realización de diagramas que incluyan en cada fase todos los elementos que incluyen los subsistemas, estableciendo criterios como mayor consumo, mayor volumen, mayor coste o cualquier otro que nos ayude a la realización de un estudio riguroso.

### 3.5. Selección del edificio y de los sistemas de producción de energía.

El edificio en estudio es el Centro de investigación C-6 de la Universidad de Jaén. El edificio se encuentra en una parcela situada en el extremo Este del Campus Universitario "Las Lagunillas". Presenta fachadas a viales interiores del Campus, una tercera fachada a la carretera y la cuarta frente al edificio C-5. La superficie ocupada tiene una superficie de 3.950 m<sup>2</sup>.

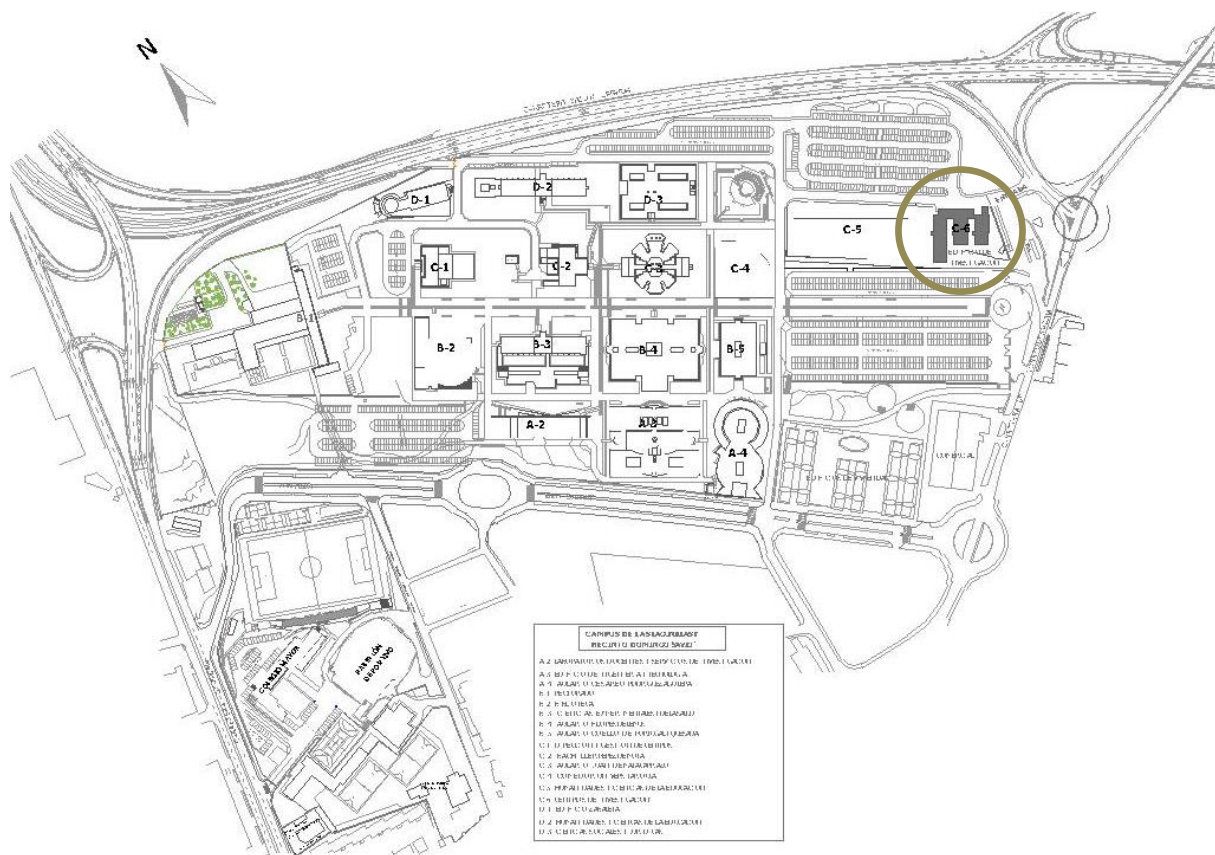


Figura 40. Plano de situación del edificio. Fuente: Proyecto técnico de ejecución.

El edificio se distribuye en planta presentando una forma en peine, formado por 3 alas básicas, una para cada centro de investigación (CAAI, C11, C12), articulados en un único núcleo de acceso y comunicación vertical. Cada uno de los tres centros se desarrolla en tres plantas dentro de su volumen, creándose para cada uno de ellos un núcleo de escaleras con la doble función de comunicación vertical interna y conseguir unas condiciones adecuadas de seguridad en caso de incendio.

Sobre estas plantas, se desarrolla una torre, la cual se trata de una zona de control y vigilancia incorporada en el edificio, independiente de los centros de investigación.

En referente a la piel de fachada, se establece un acabado único a base de revestimiento de granito abujardado para la planta baja y un acabado cerámico brillante en formación de falsa fachada para el resto de las plantas de cada uno de los prismas apaisados y ello en una contraposición descriptiva entre usos. El volumen unificador del acceso que se completa con la torre de vigilancia se reviste, para su diferenciación, de placas de hormigón polímero. Colores y texturas completan la definición formal de la edificación.



Figura 41. Vista aérea del edificio. Fuente: Proyecto técnico de ejecución.

### Características principales:

|                            |                           |
|----------------------------|---------------------------|
| Edificio carácter público: | Intensidad Baja 12h       |
| Situación:                 | Jaén Capital. 37° 46'11 N |
| Zona climática:            | IV (HE1→C4; HE4 →IV)      |
| Altitud:                   | 573 m.                    |

### Superficies:

Superficie útil: 2.723,31 m<sup>2</sup>

Superficie construida: 3.111,32 m<sup>2</sup>

De los datos obtenidos de las memorias constructivas del edificio, obtenemos los sistemas y materiales que componen dicho edificio:

### Características constructivas:

#### *>> Sistema estructural:*

Los parámetros que determinan las previsiones técnicas del sistema estructural del edificio (portante y horizontal) se resumen a continuación:

- El sistema de cimentación adoptado es a través de pilotes de hormigón armado.
- El edificio proyectado se desarrolla en tres plantas y una torre de cinco sobre rasante, con forjado antihumedad. No dispone de plantas bajo rasante.
- La estructura mediante sistemas tradicionales, forjados unidireccional de hormigón armado con bovedillas de hormigón y forjado reticular con entrevigado hormigón aligerado.

#### *>> Sistema envolvente, fachadas:*

Los cerramientos verticales del edificio se han resuelto:

#### **1.- Fachada del núcleo de acceso.**

Con el sistema denominado "fachada ventilada" compuesta por:

-Placas de hormigón polímero de 1 cm colocadas con el sistema ULMA

-1/2 pie de fábrica de ladrillo hueco doble, cámara de aire de 3 cms. de espesor y tabicón de 7 cms. tomados con mortero de cemento y enlucido con pasta de yeso.

- Sobre la hoja exterior se dispone un aislamiento termo-acústico sistema Fix Rock de Puma (mortero especial más lana de roca).

## 2.- Fachadas del resto del edificio.

Para la formación de estas fachadas se plantean dos soluciones diferentes:

### A) En Planta Baja:

-1/2 pie de fábrica de ladrillo hueco doble, tras esta hoja exterior se dispone un aislamiento termo acústico sistema Fix Rock de Puma (mortero especial más lana de roca); cámara de aire de 6 cms. de espesor y tabicón de 7 cms. tomados con mortero de cemento. Por el exterior se proyecta un revestimiento de losas de granito gris de 2 cms. de espesor grapadas con acero inoxidable.

### B) En Plantas Primera y Segunda:

Con el sistema denominado "fachada ventilada" compuesta por:

-Placas de porcelanato rectificado colocadas con el sistema FV de Butech

-1/2 pie de fábrica de ladrillo hueco doble, cámara de aire de tres cms. de espesor y tabicón de 7 cms. tomados con mortero de cemento.

- Sobre la hoja exterior se dispone un aislamiento termo-acústico sistema Fix Rock de Puma (mortero especial más lana de roca)

>> Cubierta:

Se realiza con faldón de cubierta no transitable formada por, pendiente suave con mortero M-20, membrana de betún modificado de 4 mm. de espesor, con doble armadura de polietileno, panel aislante de poliestireno extrusionado de 30 mm de espesor y 30 Kg./m<sup>3</sup>, tejido antipunzonamiento de 100 gr./m<sup>2</sup>, y capa de 5 cms. de espesor con árido rodado 16/32 mm, construida según NTE/QB.

>> Carpinterías:

Compacto de ventana de aluminio tipo Alites 5-T formada por perfiles de aluminio con rotura de puente térmico, con vidrios aislantes bajo emisivo 3+3+6+4. Control solar por medio de cortinilla de láminas tipo veneciana, y nueva cámara con vidrio interior de 5mm.

>> Cerramientos acristalados.

Fachada ligera acristalada formada por perfilería sistema semiestructural y vidriería de vidrio reflectante de 6 mm, cámara de 10 mm y luna stadip 4+4, bajo emisivo.

>> Otros cerramientos:

---

Las puertas exteriores de almacenes situadas en la planta de acceso, son de apertura seccional motorizada por pulsador interior.

Las hojas son de panel sándwich de acero galvanizado con imprimación adherente de poliéster, acabado lacado y con núcleo de espuma dura de poliuretano 100% libre de CFC.

Se toma como referencia el modelo SPU 40 de Hoffman con acristalamiento.

Las puertas de acceso principal son de dos hojas automáticas correderas, que son abatibles por empuje manual en caso de emergencia.

En la puerta primera exterior, el capialzado contenedor del operador se realiza en chapa de aluminio lacado y se continúa en los laterales a guisa de jambas contra las que acomete la fachada ligera acristalada.

En los siguientes planos se pueden ver las plantas y fachadas del edificio, así como las vistas 3D del mismo.

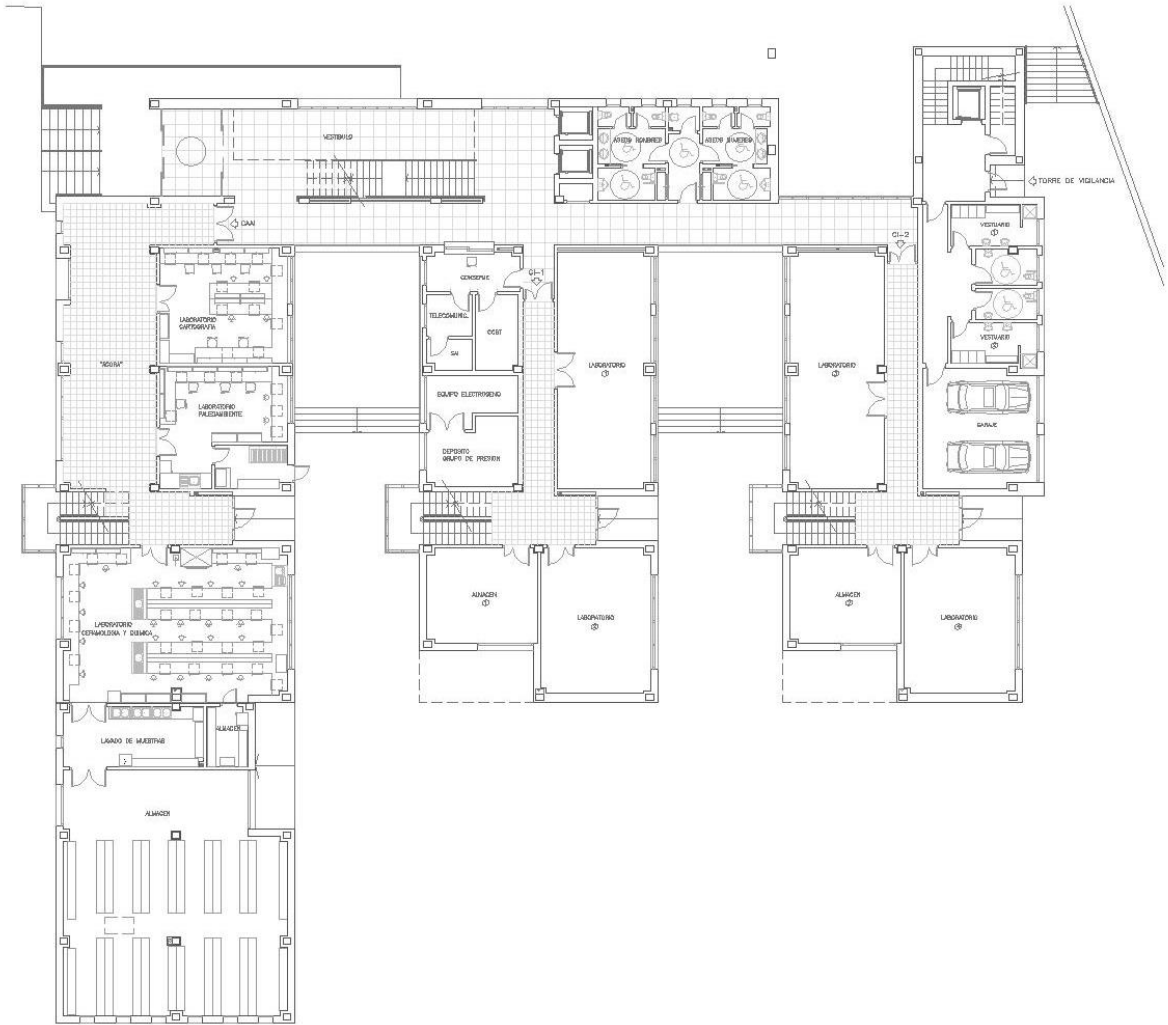


Figura 42. Planta baja. Fuente: Proyecto técnico de ejecución.

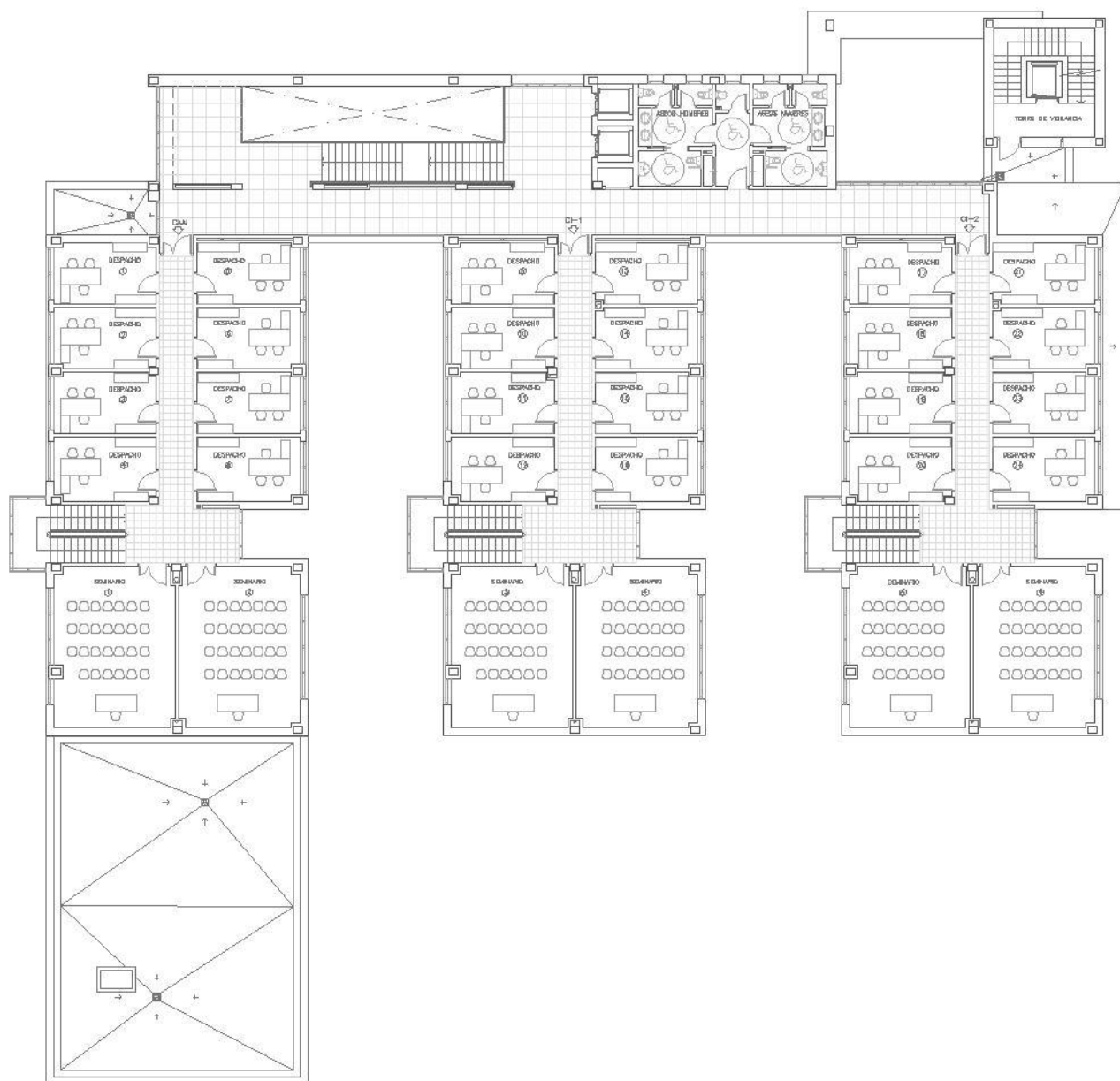


Figura 43. Planta primera. Fuente: Proyecto técnico de ejecución.

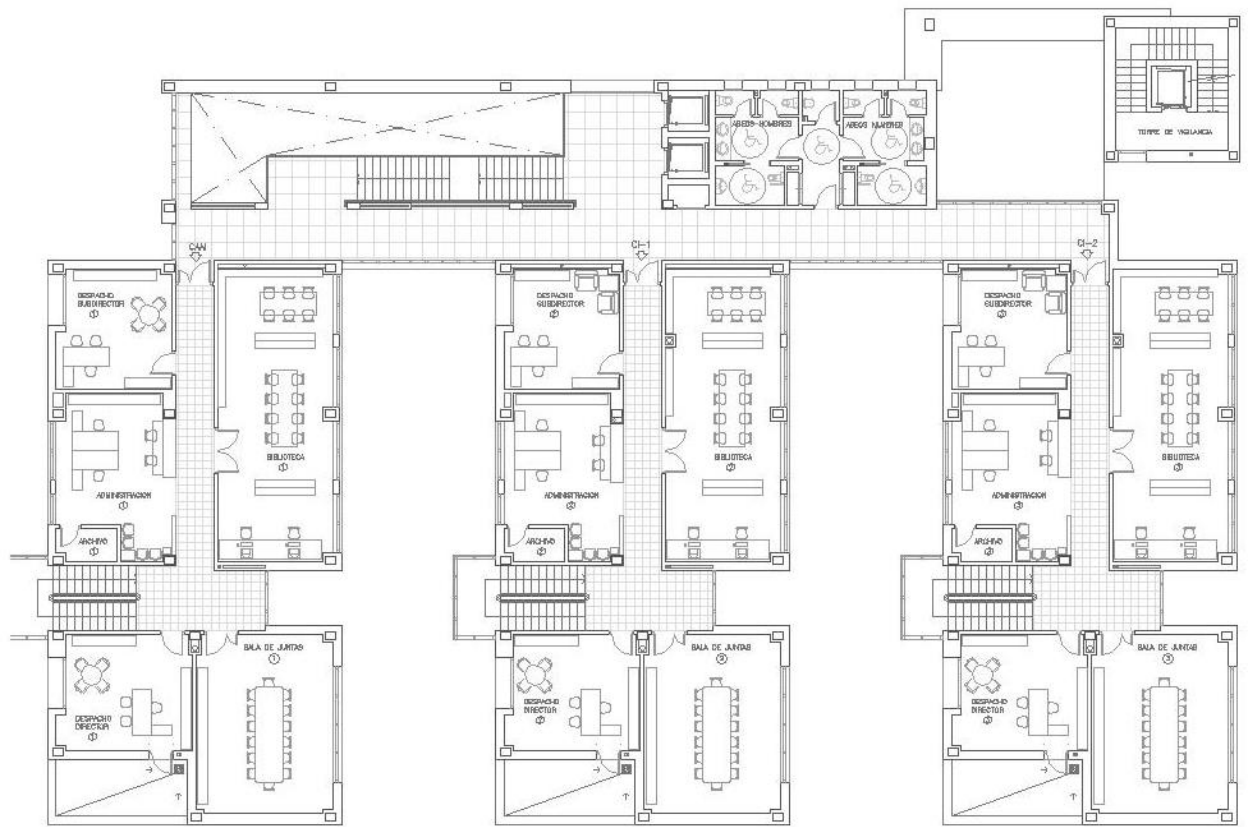


Figura 44. Planta segunda. Fuente: Proyecto técnico de ejecución.

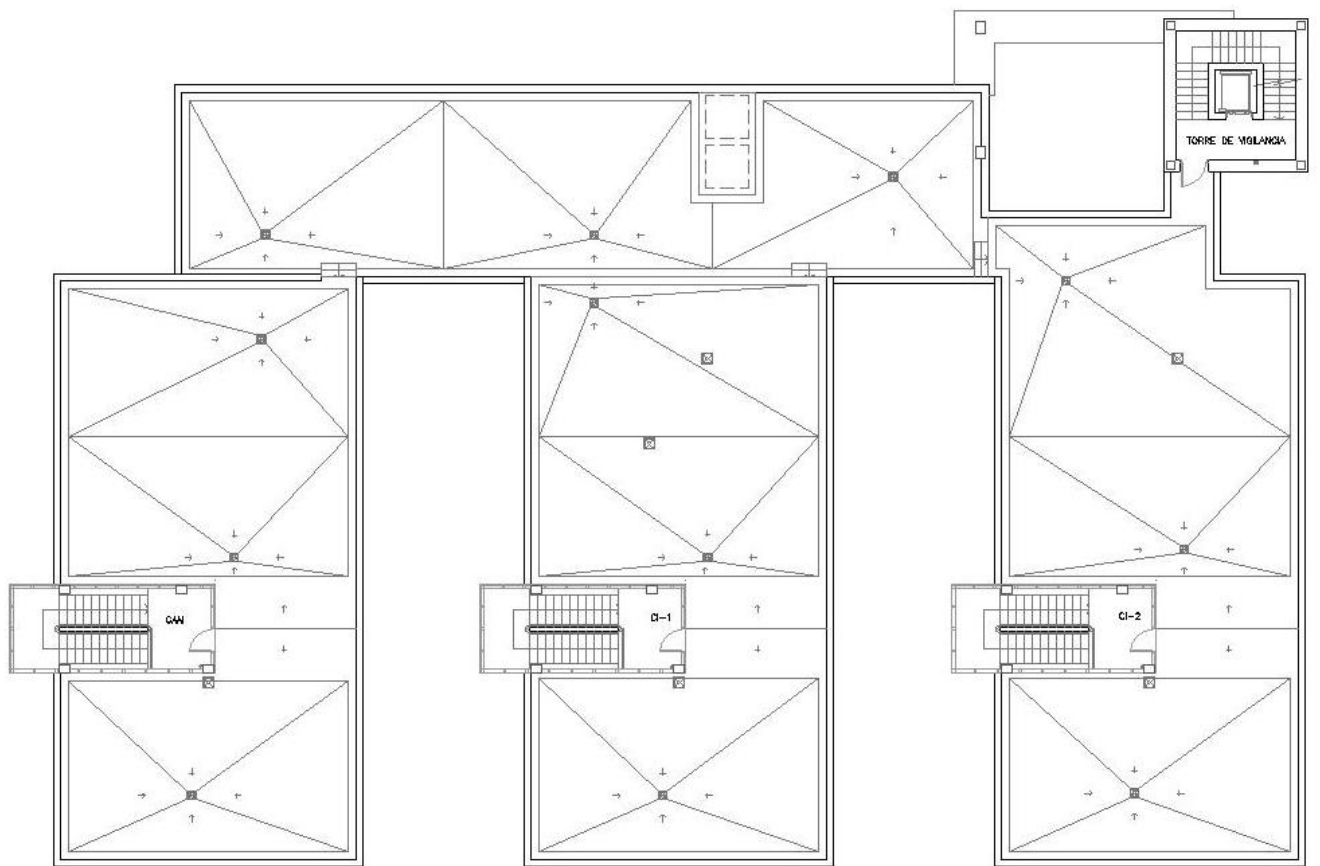


Figura 45. Planta de cubierta. Fuente: Proyecto técnico de ejecución.

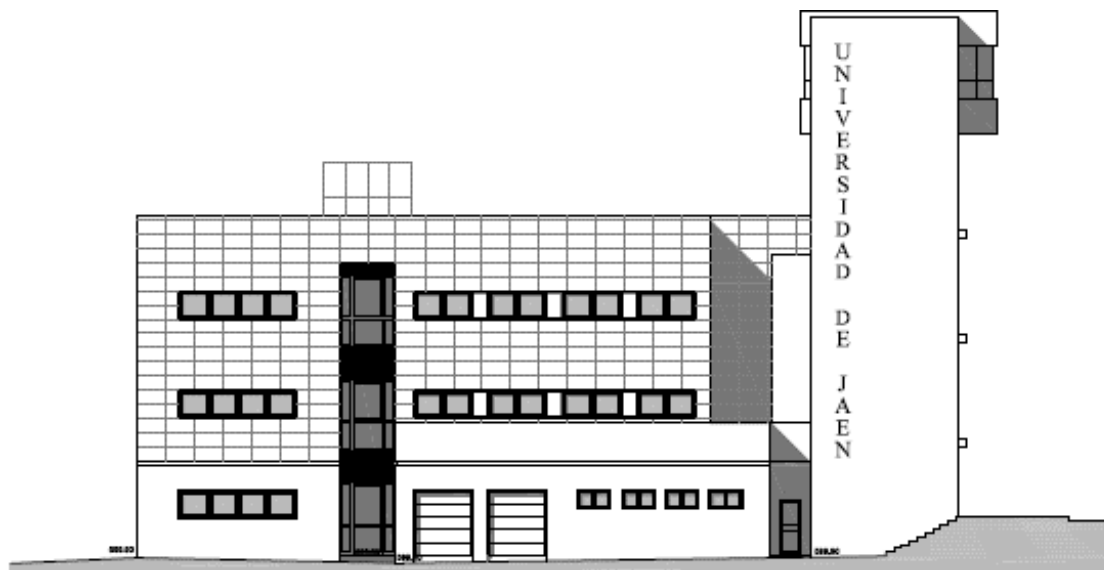


Figura 46. Alzado principal. Fuente: Proyecto técnico de ejecución.

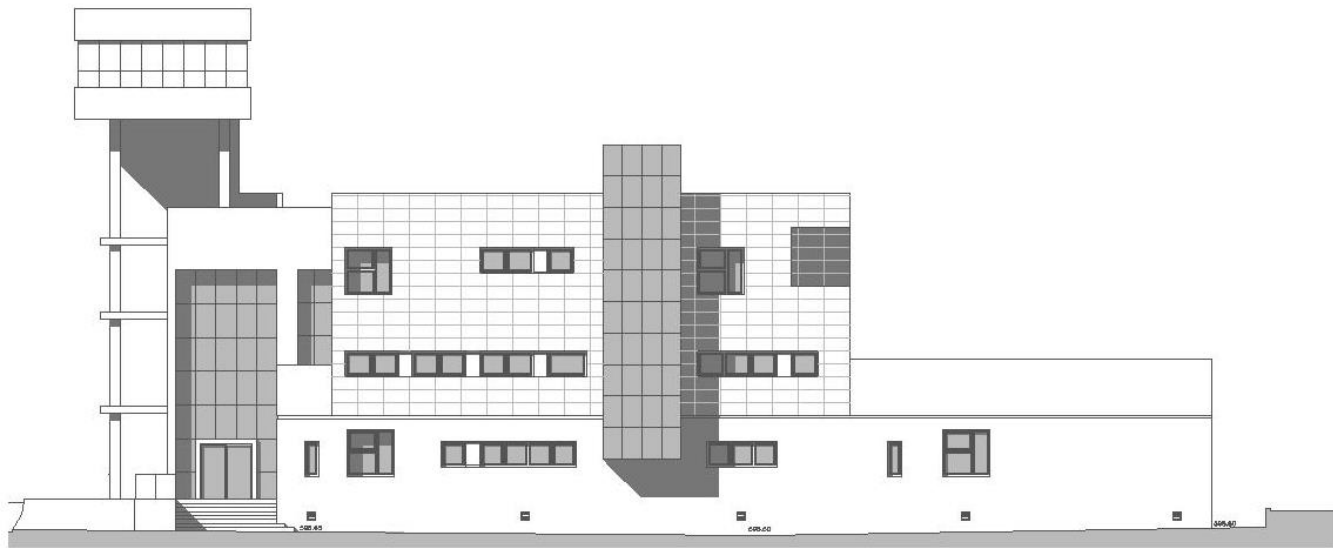


Figura 47. Alzado posterior. Fuente: Proyecto técnico de ejecución.



Figura 48. Vista 1. Fuente: Google Maps.

Estudio de la Eficiencia Energética y la Sostenibilidad de los sistemas de generación de energía en un edificio terciario de la Universidad de Jaén mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).



Figura 49. Vista 2. Fuente: Google Maps.



Figura 50. Vista 3. Fuente: Google Maps.



Figura 51. Vista 4. Fuente: Google Maps.

### **3.6. Descripción de los sistemas de producción de energía.**

Las instalaciones de climatización instaladas en este edificio corresponden con bombas de frío-calor prestando distintos tipos de servicios en función de la capacidad de la instalación, incluso pudiendo ventilar y controlar las condiciones higrométricas de la zona.

A partir del 2009 el RITE limita las temperaturas interiores de los edificios públicos a 21° en invierno y a 26ª en verano. Estos límites son los que mantendremos en nuestro estudio, y en tal caso, si hubiese alguna alteración, quedaría perfectamente descrito.

El sistema se puede describir con el siguiente esquema de funcionamiento (ver figura 50), en el que una máquina exterior alimenta a varias interiores que se distribuyen en función de los m<sup>2</sup> de la zona a climatizar.

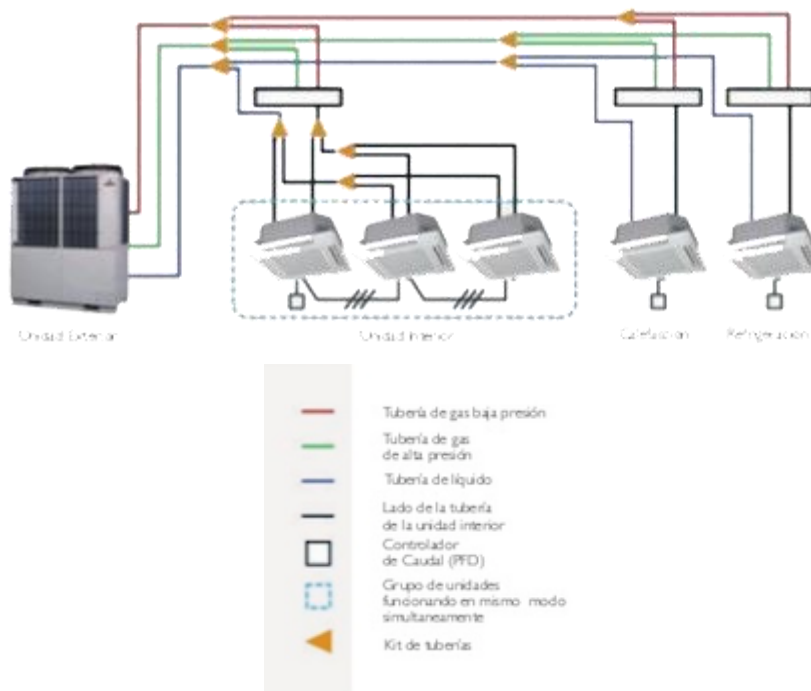


Figura 52. Esquema de las bombas de frío-calor. Fuente: Catálogo técnico del fabricante.

Para nuestro estudio, es evidente que deberemos tener en cuenta todos los elementos del sistema, así como las conexiones, tuberías y elementos de control de dicho sistema.

El fabricante del sistema aporta en su catálogo un diagrama de funcionamiento e instalación recomendado. Como podemos observar la máquina exterior es colocada en una zona común y reservada, que en nuestro caso es la azotea transitable de nuestro edificio. La distribución de las máquinas interiores de las aulas, descrita en la figura 51, es similar a la instalación real, por lo que se puede estudiar el sistema completo [46].

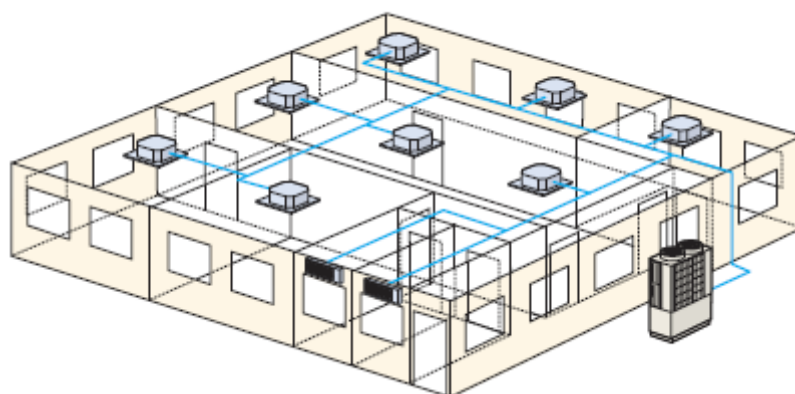


Figura 53. Esquema de las bombas de frío-calor. Fuente: Catálogo técnico del fabricante.

El sistema de climatización del edificio es complejo, debido a que la superficie a tratar es importante [47]. Para simplificar el estudio, realizaremos un análisis de la eficiencia en general del edificio y calcularemos los impactos de un subsistema instalado para climatizar, en modo calor, a un aula de docencia. Una vez obtenidos los resultados, tendremos que comprobar si son coherentes al extrapolarlos al conjunto de la instalación global.

Inventario de elementos instalados en el sistema de climatización:

- 3 Ud. Exteriores bomba de calor Mitsubishi FDCA136HXE4.
- 1 Ud. Exterior bomba de calor Mitsubishi FDCA224HXE4.
- 25 Unidades interior tipo pared marca Mitsubishi Heavy mod. FDK22KX.
- 10 Unidades interior tipo pared marca Mitsubishi Heavy mod. FDT45KX.
- 8 Unidades interior tipo pared marca Mitsubishi Heavy mod. FDK56KX.
- 11 Unidades de tratamiento de aire exterior marca Wolf.
- 1 Bomba de calor partida.
- Red de tuberías vista para la distribución de gas.
- Red de conductos.

El sistema puede funcionar tanto en régimen de frío como en régimen de calor, pero desde el punto de vista energético el servicio a garantizar debe ser de un ambiente interior confortable, manteniendo los parámetros de humedad, temperatura, pureza, velocidad y presión de aire, dentro de los límites anteriormente mencionados. En la figura 52, se muestra un esquema de los componentes interiores de la máquina exterior instalada.

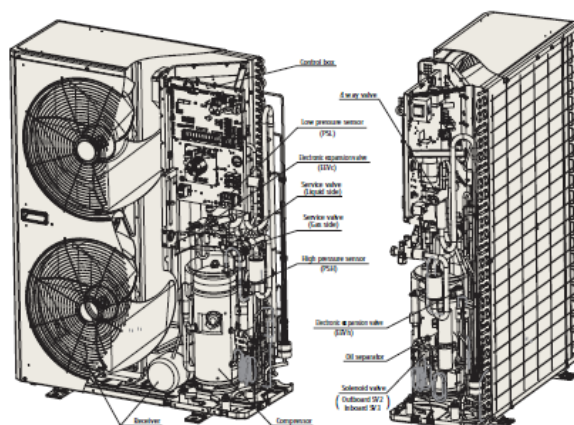


Figura 54. Máquina exterior del sistema. Fuente: Catálogo técnico del fabricante.

Las dimensiones y características de los elementos del sistema se aportan en el anexo B, y es de donde se recogen los datos para el inventario, necesario para la introducción de datos en el software de cálculo. Este método es utilizado cuando no se disponen de medidores necesarios para

obtener los consumos reales. Evidentemente esto dependerá del objetivo final de nuestro estudio y de la exigencia de la normativa en cada caso.

En la figura 53 se puede observar la cantidad importante de subsistemas que componen un equipo de climatización y que pueden provocar la pérdida de datos en el proceso de recogida de valores.

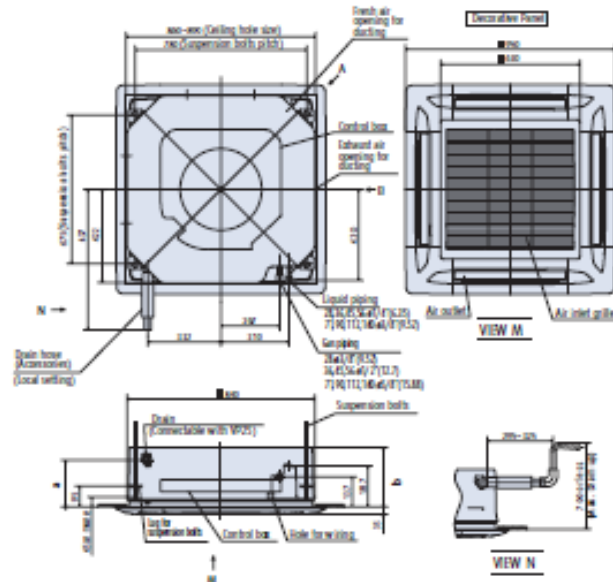


Figura 55. Máquina interior del sistema. Fuente: Catálogo técnico del fabricante.

### 3.7. Planteamiento general de la metodología experimental y de simulación.

La metodología experimental y de simulación térmica de los edificios, se basa en un análisis de las necesidades energéticas a proporcionar por los servicios diseñados para garantizar las condiciones de confort fijadas dentro de un entorno ambiental que se encuentra condicionado por variables de radiación solar directa o difusa, la ocupación de las estancias, la orientación del edificio o la caracterización térmica de sus componentes arquitectónicos.

*“Es el proceso de diseñar un modelo partiendo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema, o evaluar nuevas estrategias , dentro de los límites impuestos por cierto criterio para el funcionamiento del sistema” [48].*

La simulación energética de una instalación térmica consiste en determinar la potencia del sistema para proporcionar ciertos servicios, durante cierta frecuencia temporal. Se determinan las condiciones térmicas de diferentes zonas que conforman el edificio y las prestaciones

que aportan las máquinas en determinadas condiciones de trabajo puntuales en cada instante de tiempo, con el fin de integrarlas durante el periodo de tiempo simulado.

Con el objetivo principal de determinar las demandas energéticas durante un periodo de tiempo y su regulación, podremos optimizar los resultados para obtener una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Mediante programas LIDER, CALENER o su integración en HULC la administración española, ha previsto en el CTE la simulación de estas condiciones en los edificios. La simulación energética es el núcleo principal del programa y se basa en el motor de simulación Energy Plus.

El programa utiliza un edificio de referencia al que nuestro edificio se va a comparar con lo que se denomina grado de disimilitud. La estructura general de la normativa marca que se deben ajustar los datos de epidermis, climatización, ACS, iluminación y equipamiento. El aspecto de climatización es el que resulta más complicado, debido a la gran cantidad de variables energéticas.

El procedimiento interno del programa nos indica cuáles son las verificaciones que realiza en el edificio para cumplir con el CTE DB-HE1.

- a) Limita la demanda energética en función del edificio referencia. Este tiene la misma forma y tamaño que el edificio objeto, la misma zonificación interior y mismo uso, etc, pero con unos elementos de sombra que garantizan el cumplimiento de las exigencias.
- b) Limita la presencia de condensaciones en la envolvente térmica
- c) Limita las infiltraciones de aire.

A partir de aquí el programa calcula lo que se llama respuesta unitaria, y que es un proceso interno con diferentes etapas.

### **3.8. Calificación energética. LIDER-CALENER. Limitación de la demanda energética. Introducción de las coordenadas.**

Procedemos a calcular la exigencia básica del CTE HE 1: Limitación de la demanda energética. Los edificios deben disponer de una envolvente de características tales que se adecue a la demanda energética necesaria para alcanzar el bienestar térmico en función del clima, de la localidad, del uso del edificio, del régimen de verano e de invierno, así como sus características de aislamiento e inercia, permeabilidad al aire y exposición a la radiación solar, reduciendo el riesgo

de aparición de humedades de condensaciones superficiales e intersticiales que pueden perjudicar sus características, y tratando adecuadamente los puentes térmicos para limitar las pérdidas o ganancias de calor para evitar problemas higrotérmicos en los mismos.

Para realizar este cálculo, se hará con el programa recomendado por el Código Técnico de la Edificación, LIDER (Opción general) [49]:

En este programa se introducen todos los datos del edificio objeto: Localidad, zona climática, orientación, y se modela el edificio, con todos sus cerramientos.



Figura 56. Sello del programa. Año 2013-2014. Fuente: Código Técnico de la Edificación.

Se definen las distintas geometrías del edificio, y todos sus huecos para proceder a su análisis (ver figura 55). Mediante este programa podremos comprobar y validar las distintas soluciones propuestas a nivel de cumplimiento de la normativa CTE-HE en lo referido a ahorro energético.

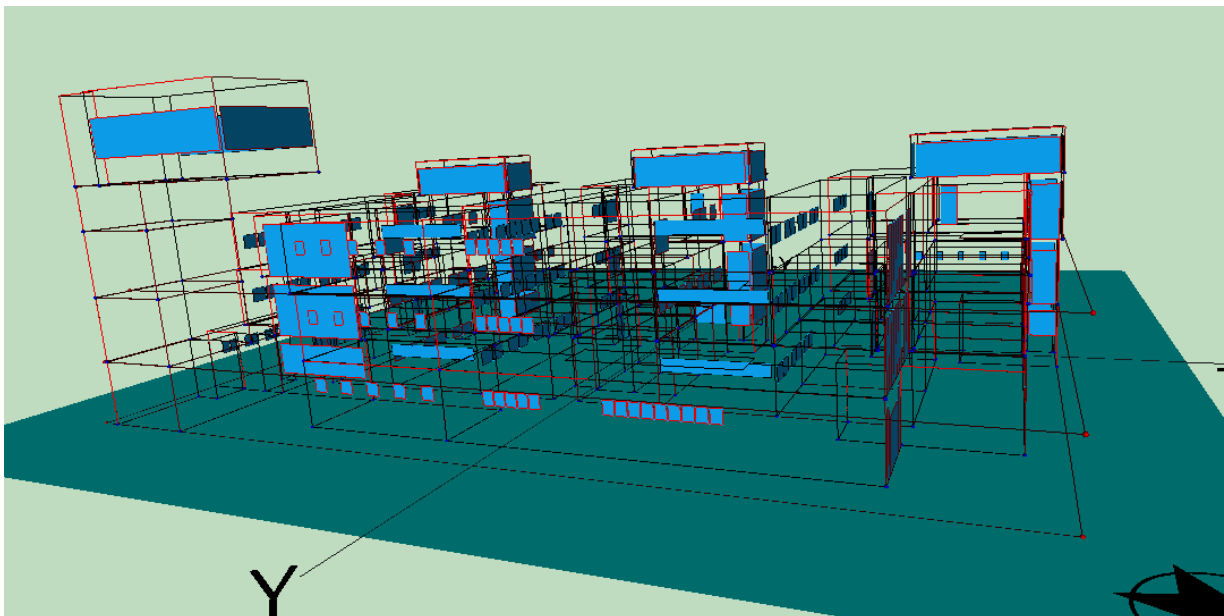


Figura 57. Imagen del edificio. Modelo en LIDER. Fuente: Software de cálculo.

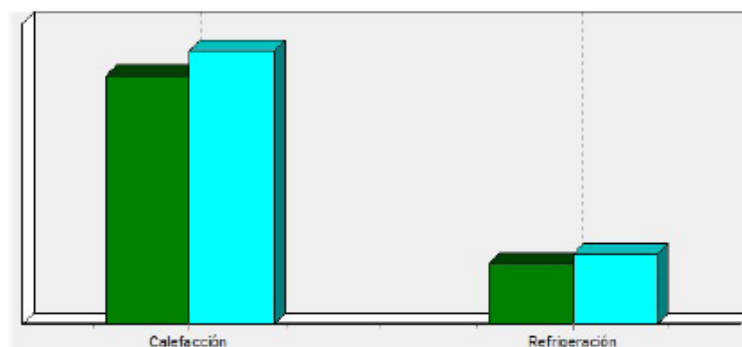
Una vez finalizado el modelado, se procede a calcular el cumplimiento de las distintas normativas que evalúa el programa LIDER [50].

Realmente el programa no indica cuál es el consumo del edificio, sino que compara el edificio en estudio (edificio objeto) con el edificio de referencia. Este último lo obtiene el programa a partir del edificio objeto, sustituyendo los cerramientos por otros que cumplen con los requisitos dados en la opción simplificada. En el resultado global se muestra de forma gráfica la demanda anual para calefacción y refrigeración del edificio en relación a la del edificio de referencia.

A continuación se muestra un resumen de los resultados y una breve explicación para su correcta interpretación.

El edificio descrito en este informe CUMPLE con la reglamentación establecida por el código técnico de la edificación, en su documento básico HE1.

|   | Calefacción | Refrigeración |
|---|-------------|---------------|
| % de la demanda de Referencia                 | 90,9        | 86,6          |
| Proporción relativa calefacción refrigeración | 80,6        | 19,4          |



En el caso de edificios de viviendas el cumplimiento indicado anteriormente no incluye la comprobación de la transmitancia límite de 1,2 W/m<sup>2</sup>K establecida para las particiones interiores que separan las unidades de uso con sistema de calefacción previsto en el proyecto, con las zonas comunes del edificio no calefactadas.

Figura 58. Resultados obtenidos en el programa LIDER. Fuente: Software de cálculo.

Tal y como indican las columnas en verde los valores de demanda del edificio Objeto (nuestro edificio) son inferiores a los del edificio de referencia (columna azul) tanto en Calefacción como en Refrigeración (ver figura 56). Siempre que se cumpla esta condición podemos considerar que el edificio **CUMPLE** los requisitos mínimos exigidos por el CTE-HE en I referente a ahorro energético.

No es necesario aplicar medidas de mejora sobre los cerramientos puesto que el edificio cumple con todas las especificaciones de transmitancias máximas, transmitancias límite condensaciones marcadas en el Código Técnico de la Edificación.

Este resultado evalúa exclusivamente la envolvente térmica del edificio y no tiene en cuenta la eficiencia de los sistemas del edificio.

El informe de la verificación del cumplimiento de la normativa HE-1 del Código Técnico de la Edificación que se ha obtenido se incorpora al anexo C.

Una vez que se ha obtenido y verificado el cumplimiento del DB HE-1 de limitación de demanda energética del edificio, procedemos a obtener su Calificación de Eficiencia Energética. Se pueden exportar los datos desde el programa LIDER al programa CALENER de Grandes Edificios Terciarios (CALENER-GT) [51]. La exportación de los datos de la definición geométrica y constructiva del edificio la realiza el programa LIDER de manera automática.

Para realizar esta evaluación energética inicial procederemos utilizar la opción general que nos ofrece el CTE y que utiliza el programa informático CALENER para analizar la geometría introducida mediante LIDER y tras definir los parámetros de demandas y los sistemas energéticos de ACS, calefacción y refrigeración a utilizar, evaluará nuestro edificio en comparación el modelo de referencia y finalmente otorgará una determinada calificación energética en el ranking establecido por normativa que va desde la A (máxima eficiencia) a la G (mínima eficiencia).

La aplicación CALENER-GT requiere muchos más datos de entrada que el programa LIDER ya que para poder obtener la calificación energética del edificio será necesario introducir en el programa no sólo los datos constructivos y de geometría de la estructura, sino los datos de los sistemas (instalaciones térmicas y lumínicas) que contiene el inmueble. La importación de los datos de LIDER proporciona la mayor parte de los datos de la epidermis del edificio: polígonos, conjunto de capas, cerramientos, plantas, espacios, etc. Pero conviene tener en cuenta que será necesario revisar muchos otros datos como los relativos a la ocupación e iluminación de los espacios o la localización de los cerramientos.

Tras la exportación de todos los componentes constructivos y geométricos, el aspecto del edificio en CALENER es el siguiente:

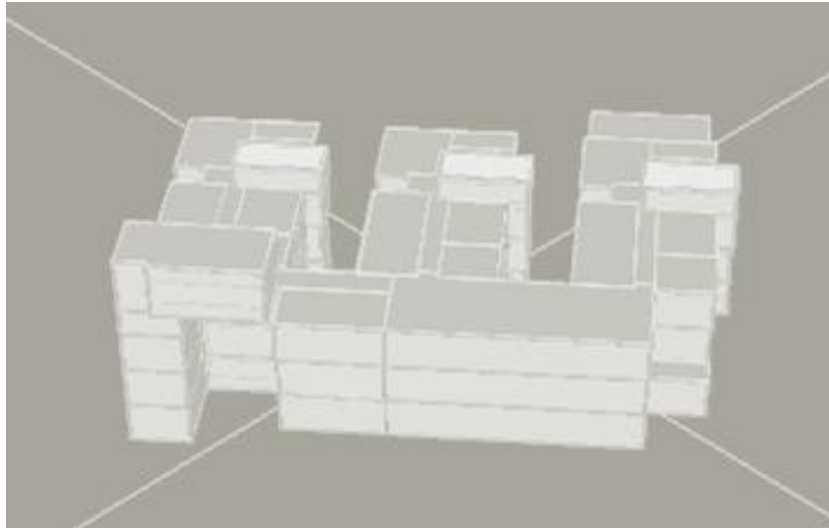


Figura 59. Imagen del edificio en el programa CAENER GT. Fuente: Software de cálculo.

### 3.9. Introducción en el programa CAENER GT de los sistemas de producción energética.

Una vez tenemos el edificio procedemos a introducir la parte de instalaciones (ver figura 58). Se introducen por Subsistemas primarios (En este caso solo Generadores de ACS y circuitos hidráulicos) y subsistemas secundarios (subsistemas de Unidades de Tratamiento de aire, y ventilación, por free-cooling) un esquema del subsistema secundario de ventilación [52]:

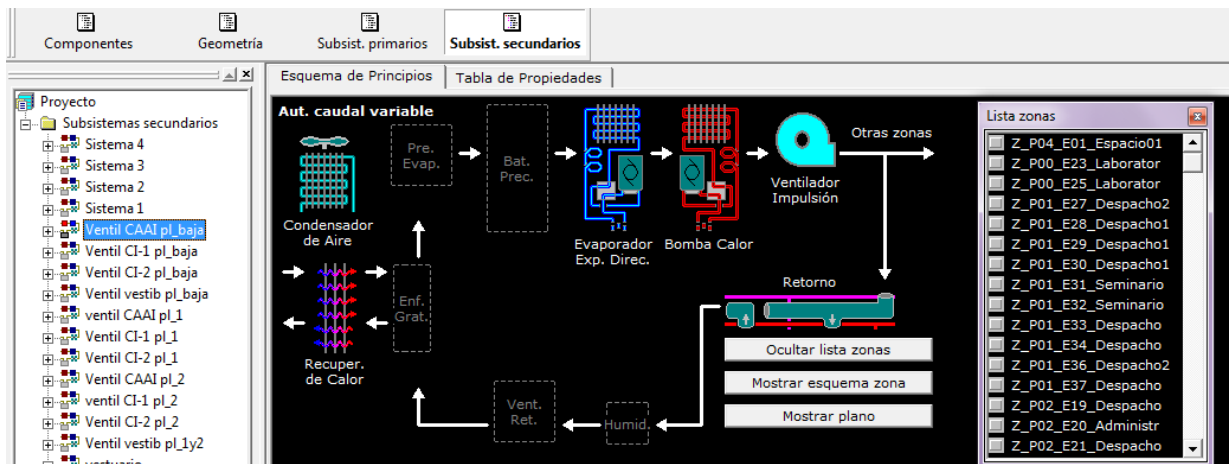


Figura 60. Subsistemas de las distintas zonas en el programa CAENER GT. Fuente: Software de cálculo.

Una vez dimensionado el conjunto de las instalaciones, el siguiente paso será evaluar su eficiencia energética. Un resumen del resultado obtenido es el siguiente 8 (ver figura 59):

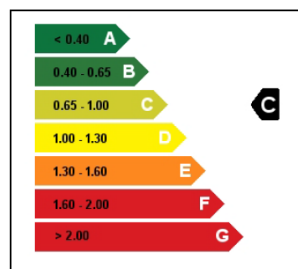
## 2. RESUMEN INDICADORES ENERGÉTICOS ANUALES

| Indicador Energético                   | Edif. Objeto | Edif. Referencia | Índice | Calificación |
|--|--------------|------------------|--------|--------------|
| Demanda Calef. (kWh/m <sup>2</sup> )   | 63.6         | 41.0             | 1.55   | E            |
| Demanda Refri. (kWh/m <sup>2</sup> )   | 171.7        | 192.6            | 0.89   | C            |
| Energía Primaria (kWh/m <sup>2</sup> ) | 422.3        | 449.0            | 0.94   | C            |

|   |       |       |      |   |
|---|-------|-------|------|---|
| Emisiones Climat. (kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ) | 75.9  | 66.6  | 1.14 | D |
| Emisiones ACS (kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )     | 7.6   | 6.5   | 1.17 | D |
| Emisiones Ilum. (kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )   | 21.7  | 41.0  | 0.53 | B |
| Emisiones Tot. (kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )    | 105.3 | 114.1 | 0.92 | C |

Nota: Los valores han sido obtenidos utilizando la suma de las superficies acondicionadas y no acondicionadas

## 3. ETIQUETA Y VALORES TOTALES



| Concepto   | Edif. Objeto | Edif. Referencia |
|--|--------------|------------------|
| Energía Final (kWh/año)                              | 539826.8     | 816001.1         |
| Energía Final (kWh/(m <sup>2</sup> año))             | 162.3        | 245.3            |
| En. Primaria (kWh/año)                               | 1405169.3    | 1493772.1        |
| En. Primaria (kWh/(m <sup>2</sup> año))              | 422.3        | 449.0            |
| Emisiones (kg CO <sub>2</sub> /año)                  | 360347.6     | 379676.1         |
| Emisiones (kg CO <sub>2</sub> /(m <sup>2</sup> año)) | 105.3        | 114.1            |

El consumo real de energía del edificio y sus emisiones de dióxido de carbono dependerán de la climatología y de las condiciones de operación y funcionamiento reales del edificio, entre otros factores.

Figura 61. Indicaciones energéticas anuales, resultado obtenido del programa CALENER GT.

Fuente: Software de cálculo.

En cuanto a la simulación con el Programa Calener GT para la obtención de la calificación energética del edificio, el resultado obtenido es la C. Calificación estándar dentro de la escala de graduación ya que está en 3º posición. El resultado es una media entre los indicadores energéticos frente a un edificio de referencia.

|                           |   |   |
|---------------------------|---|---|
| Demanda de Calefacción;   | 63,6 kWh/m <sup>2</sup>                 | E |
| Demanda de Refrigeración; | 171,7 kWh/m <sup>2</sup>                | C |
| Energía Primaria;         | 422,3 kWh/m <sup>2</sup>                | C |
| Emisiones Climatización;  | 75,9 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> | D |
| Emisiones ACS;            | 7,6 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>  | D |
| Emisiones de Iluminación; | 21,7 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> | B |

Se ha obtenido la Demanda de Calefacción E, por tanto, la etiqueta de valor se encuentra entre 0.65 – 1.00 → **C**.

El consumo real de energía del edificio y sus emisiones de dióxido de carbono dependerán de la climatología y de las condiciones de operación y funcionamiento reales del edificio entre otros.

## METODOLOGÍA GENERAL DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

- 4.1. Una herramienta completa para la evaluación ambiental.
- 4.2. Algunos hitos históricos importantes en sostenibilidad.
- 4.3. Normativa de aplicación.
- 4.4. Herramientas de calificación basadas en el ACV. Software disponible.
- 4.5. Metodología ACV con SimaPro.
  - 4.5.1. Objetivo y Alcance
  - 4.5.2. Inventario
  - 4.5.3. Evaluación del Impacto Ambiental
- 4.6. Análisis de los resultados.
  - 4.6.1. Incertidumbre
  - 4.6.2. Análisis de sensibilidad
  - 4.6.3. Análisis de gravedad
  - 4.6.4. Resultado del inventario
- 4.7. Análisis de los resultados

### **4.1. Una herramienta completa para la evaluación ambiental.**

A escala mundial, el medioambiente y su protección, se están convirtiendo en una de las mayores prioridades para los políticos, para la economía social y para la educación. Nuestra existencia en la Tierra depende, sin lugar a dudas, de la conservación de los recursos naturales, del cuidado de nuestro entorno y de la eficiencia energética. Esto se está viendo reflejado en los problemas ambientales que estamos empezando a sufrir en distintas zonas del Planeta. Mayores sequías frente a grandes fenómenos pluviales en lugares donde antes no ocurrían. Mayor intensidad en los fenómenos provocados por los valores de emisiones de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes que no paran de subir.

Es necesario entender que para corregir estos desajustes, hace falta llegar a un equilibrio entre la calidad de vida, el impacto y el desarrollo, es decir, entre el aspecto social, económico y medio ambiental. Es necesario entender que el hombre se encuentra en relación directa y diaria con el medio ambiente donde desarrolla su actividad, y que estamos dentro de un sistema complejo y dinámico que aún no respetamos.

La economía actual nos lleva a un pensamiento consumista, que conlleva grandes impactos a través de sustancias perjudiciales. Sabemos el origen,

la naturaleza y sus efectos, pero desconocemos en qué fases se producen, en qué cantidades y el modo de reducirlas. Sobre todo sin que afecten a otros procesos.

La actual normativa en edificación exige que tengamos en cuenta los límites energéticos de los edificios, tal y como hemos explicado en los capítulos anteriores. Pero aún no se han considerado aquellos otros impactos que provienen de la extracción y producción de los materiales, del mantenimiento y de los productos y sistemas, del transporte y del fin de vida de todos estos componentes. Todos ellos están considerados como impactos directos al medio ambiente.

Según lo explicado y de forma general el objetivo de un Análisis de Ciclo de Vida es realizar la evaluación de impactos ambientales asociados a los materiales, procesos, construcción, uso y futura demolición y reciclaje de materiales del edificio modelo elegido [53].

Steadman Philip Steadman en 1975 escribe:

*“Si se concibe el edificio como si fuera un sistema completo que utiliza energía y materiales a lo largo de su ciclo vital, el análisis debería empezar con la extracción de materias primas empleadas en la construcción, incluir su transporte y colocación, y luego, al final de la vida del edificio, cuando se derribe, debería tenerse en cuenta cómo se dispersan los materiales y se vuelven a utilizar”.*

La metodología del ACV se emplea para evaluar la influencia de un proceso o de un producto sobre el medio ambiente, visto desde la perspectiva de su ciclo biológico. En un ACV completo, se atribuyen a los productos todos los efectos ambientales derivados del consumo de materias primas y de energías necesarias para su manufactura (ver figura 62), las emisiones y residuos generados en el proceso de producción, así como los efectos ambientales procedentes del fin de vida del producto, cuando este se consume o no se puede utilizar.

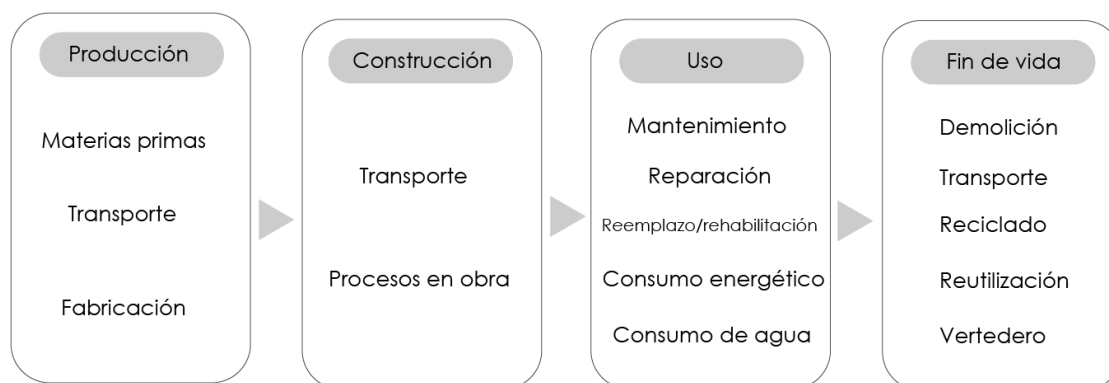


Figura 62. Fases del Ciclo de Vida del edificio. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de ciclo de vida considera todas las fases de vida de los materiales y de cualquier producto. La herramienta de ACV ha sido usada en el sector de la construcción desde 1990 y es una herramienta muy importante para analizar productos, procesos y sistemas. [54].

Entendiendo la construcción como un proceso industrial (ver figura 63). Nos encontramos que se pueden obtener parecidos esquemas sobre las fases de vida industriales. Cualquier producto que el hombre genere, fabrique o modifique se considera que tiene una relación directa con el medioambiente y pasa a ser objeto de la tecnosfera.

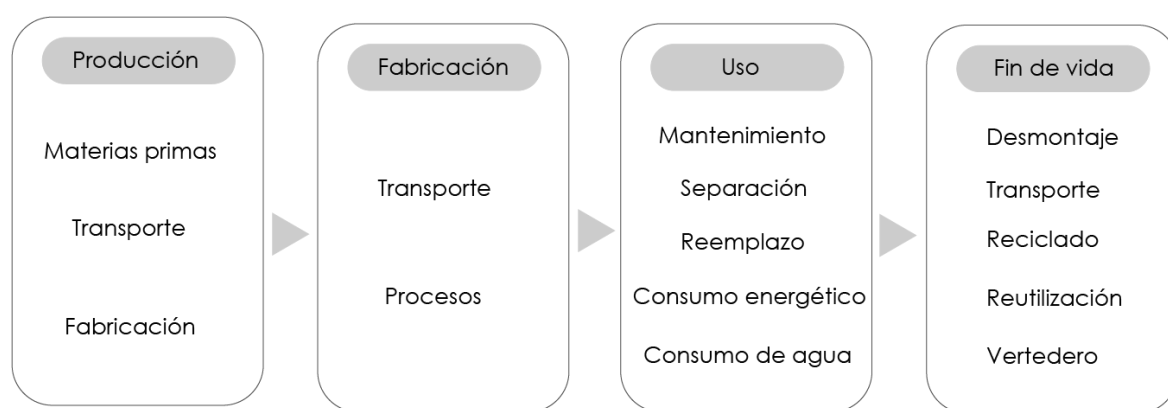


Figura 63. Fases del Ciclo de Vida en la industria. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de ciclo de vida proporciona una herramienta que identifica y evalúa el impacto ambiental de las actividades productivas, y plantea estrategias para dicho impacto (ver figura 64). Es un sistema compuesto por subprocesos económicos, tecnológicos y ambientales que van desde la extracción de recursos hasta el reciclaje o disposición final de desechos. Se basa en la recopilación y evaluación de las entradas y salidas del sistema para obtener unos resultados que muestren sus impactos ambientales potenciales, con el objetivo de poder determinar estrategias para la reducción de los mismos [55].

Estudio de la Eficiencia Energética y la Sostenibilidad de los sistemas de generación de energía en un edificio terciario de la Universidad de Jaén mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

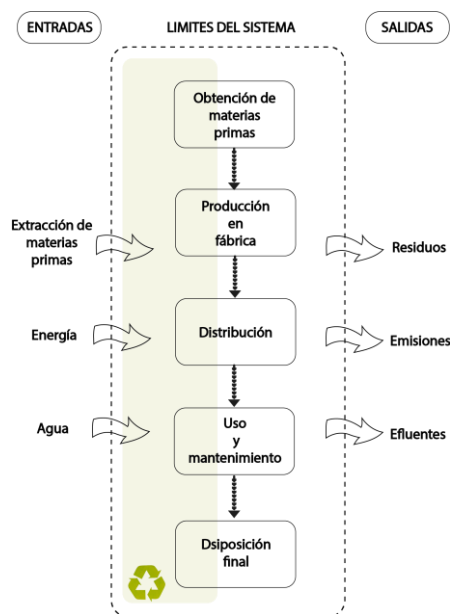


Figura 64: Fases del Ciclo de Vida a considerar. Entradas, límite del sistema y salidas. Fuente: Elaboración propia basada en los esquemas de la ISO 14000.

Según las Normas ISO 14000, el ACV queda definido como una técnica para evaluar los aspectos medioambientales y los potenciales impactos asociados al producto (ver figura 65). Hay autores que subdividen el ciclo de vida en 4 fases, y analizan los aspectos ambientales que influyen en cada una de las fases [56].

| ETAPA                    | ASPECTOS SIGNIFICATIVOS   | OTROS ASPECTOS   |
|--------------------------|---|--|
| EXTRACCIÓN Y FABRICACIÓN | -Consumo de materias primas<br>-Consumo de energía  |  |
| EJECUCIÓN DEL EDIFICIO   | -Consumo de energía<br>-Emisiones atmosféricas  | -Consumo de agua<br>-Generación de residuos<br>-Emisión de ruidos                      |
| USO Y MANTENIMIENTO      | -Consumo de energía<br>-Consumo de agua<br>-Emisiones atmosféricas<br>-Impacto visual<br>-Uso del suelo | -Generación de residuos<br>-Vertidos al agua<br>-Emisiones de ruidos<br>-Biodiversidad |
| DECONSTRUCCIÓN           | -Consumo de energía<br>-Generación de residuos  | -Emisiones atmosféricas<br>-Emisión de ruidos  |

Figura 65. Etapas del Ciclo de Vida del Edificio. Fuente: Elaboración propia.

A diferencia de otras metodologías o herramientas de gestión ambiental, el ACV no se centra exclusivamente en la evaluación de los aspectos

ambientales sino que va más allá, al determinar el impacto que estos generan [57].

Para estudiar el impacto ambiental real de un edificio o un producto, no se pueden estudiar los materiales como elementos individuales, sino como elementos que trabajan conjuntamente para realizar una cierta función en una solución. Según cada herramienta de evaluación, esto podría conducir a una decisión errónea al utilizar un material que por sí solo tiene un buen comportamiento ambiental, pero que requiere la utilización de otros materiales más perjudiciales para formar parte de la solución. El impacto medioambiental de una solución no sólo depende de los materiales de que se compone, sino también del proceso de fabricación, su mantenimiento, longevidad de la solución y sus componentes y transporte desde la producción de los materiales.

El mercado edificatorio se encuentra totalmente ajeno al empobrecimiento de los recursos y de la producción de residuos. El escenario de una futura construcción sostenible deberá tener como uno de sus ingredientes fundamentales el carácter local de los materiales empleados [58].

En estudios anteriores se han estudiado el estado del arte del ACV y la metodología simplificada como complemento para la certificación energética de edificios [59]. Estos antecedentes sirven de base para el estudio que nos ocupa, puesto que dichos artículos consisten en una evaluación de certificación energética con la metodología del ACV simplificada. Esto permite comparar la energía integrada en un edificio y las emisiones de los materiales de dicho edificio, frente a la energía de consumo del edificio y las emisiones del estado de uso, en su vida útil. De hecho, estos estudios coinciden en que la energía integrada en el edificio y en sus materiales, representa más del 30% de la energía primaria en la etapa de uso del edificio. La causa mayor de la energía consumida en los edificios residenciales es la calefacción, y a continuación segundo es la energía generada por la construcción y fabricación de los materiales de construcción que representan hasta el 60% del consumo de calefacción.

Actualmente el abuso de cemento, aluminio, hormigón y PVC, incrementa el coste energético e impacto ambiental. Ante este abuso, el reciclaje de materiales es esencial para reducir el impacto medioambiental, incluso los materiales sostenibles ahorran aproximadamente el 20% de la energía integrada en dichos materiales, para edificios con un ciclo de vida de 50 años, y para materiales reciclados pueden llegar a ahorrar del orden del 18% al 50 % [60].

Una estructura del ACV simplificado es la siguiente figura 66:

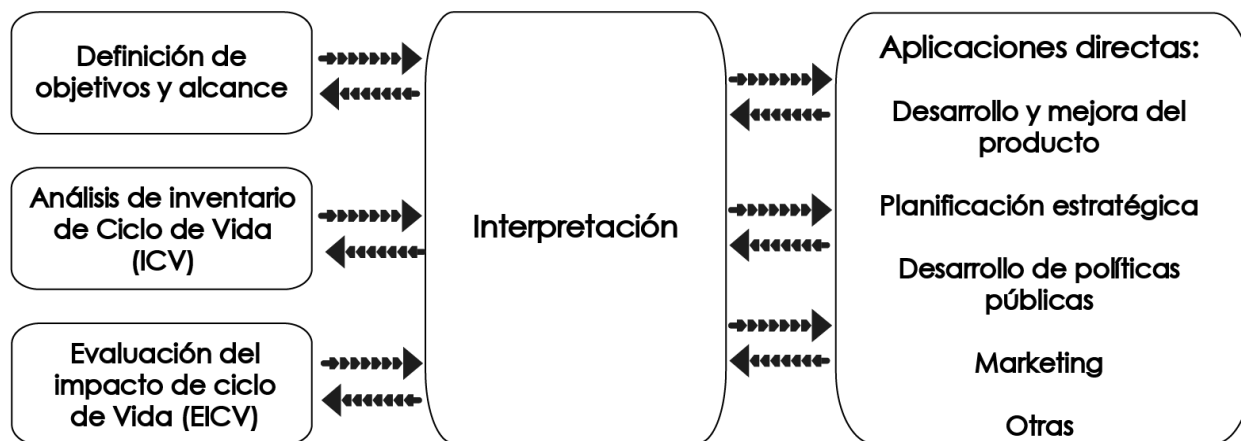


Figura 66. Fases del Análisis de Ciclo de Vida. Fuente: ISO 14000.

Con los procesos de certificación energética que provienen como consecuencia de la Directiva 2002/91/EC para mejorar la eficiencia energética en los edificios, se están produciendo algunas paradojas, debido a que estos métodos no consideran aspectos relativos al ciclo de vida de los edificios, y por tanto existen riesgos de contradicción en los resultados. Se puede obtener una buena calificación, mientras se producen altos consumos energéticos además de emisiones globales en términos generales (ver figura 67) [62].

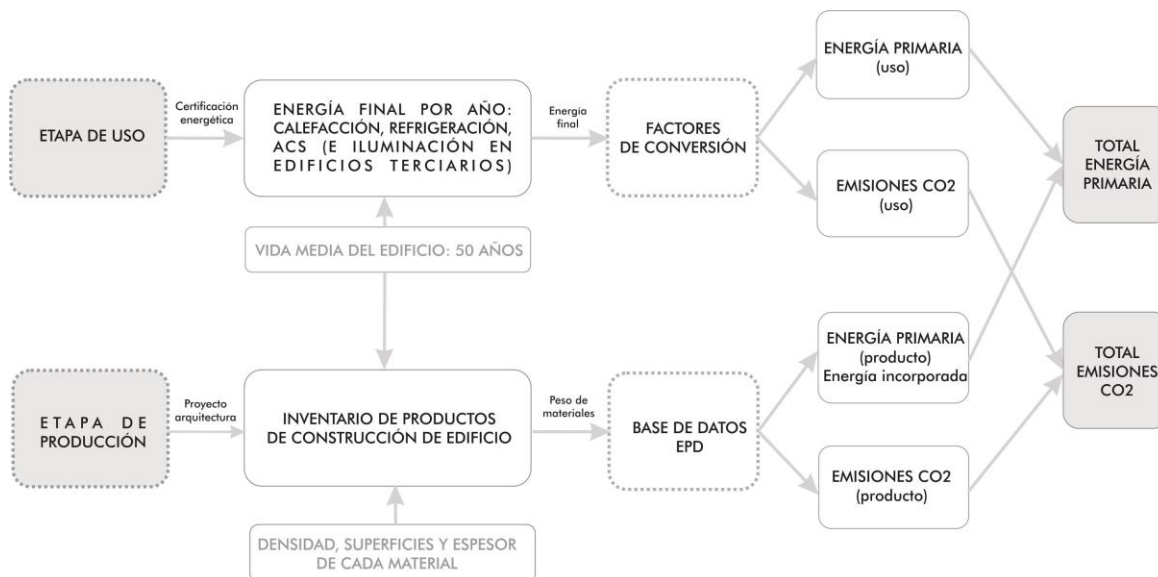


Figura 67. Estructura general de la metodología de ACV simplificada. Fuente: Elaboración propia basada en los estudios referenciados.

Un estudio realizado en la Universidad de Taiwán estudia 4 edificios de alta tecnología en una región de Asia, usando la técnica del ACV, centrado en la cuantificación de impacto en el medio ambiente, la salud y la sociedad. Gran cantidad de energía, productos químicos y agua se consume a lo largo del ciclo

de vida de los edificios, sin embargo, el artículo concluye que el mayor impacto medioambiental proviene de la electricidad, y por tanto el uso de la corriente podría moderar el impacto medioambiental global [63].

Existen otros casos de estudio en diversos artículos que verifican que el mayor impacto proviene de la electricidad. En uno de los casos de estudio, se centra en cuatro edificios localizados en Suiza con diferentes características en la construcción, tomando como el m<sup>2</sup> como unidad funcional, y evaluando la sensibilidad en 3 parámetros (variación de electricidad, materiales de construcción, y energía usada), demostraron que el mayor impacto medioambiental es debido al uso de electricidad en todas sus variables. Considerando una vida útil del edificio de 50 años, concluye que el 70-90% del impacto se genera en la etapa de uso, y aproximadamente 85% y 15% en energía consumida durante su ocupación y fase de fabricación respectivamente [64].

Esto nos indica que la normativa actual deja fuera de sus exigencias aspectos muy importantes en el aspecto de la sostenibilidad en la edificación, pues sigue sin tener un enfoque global de los procesos que son necesarios en todo el ciclo de vida del edificio.

#### **4.2. Algunos hitos históricos importantes en sostenibilidad.**

En los años 60 es cuando algunos investigadores y empresarios, concienciados con el medio ambiente empiezan a estudiar y desarrollar lo que puede llamarse como primeros estudios que guardan semejanza con los actuales ACV.

**En 1963** Harold Smith presentó a la Conferencia Mundial de Energía un estudio en el que se informaba sobre las cantidades de energía e impactos para la fabricación de productos químicos.

**En 1969** la empresa Coca Cola encargó un estudio al Midwest Research Institute (MRI) con el objetivo de determinar la cantidad de energía, materiales e impactos ambientales asociados al ciclo de vida de sus envases. Esta metodología fue denominada "Análisis del perfil ambiental y de recursos" (Resources and Environmental Profile Analysis, REPA).

**En 1971** se realizó el segundo REPA por el MRI para evaluar las bandejas de espuma de poliestireno y las de cartón.

**En 1972** se celebra la primera gran conferencia de la ONU sobre las cuestiones ambientales internacionales, la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Humano (Cumbre de la Tierra de Estocolmo). Marcan un punto de inflexión en el desarrollo de la política internacional del medio ambiente.

**En 1975** W. Franklin, experto en REPA por el MRI, fundó junto con M. Franklin la firma Franklin Associates, empresa líder en Análisis REPA.

**En 1979** se fundó la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC) para discutir la metodología y la utilidad de los REPA.

**En 1982** se publicó el primer estudio en el que utilizaba un diagrama de flujo con entradas y salidas, realizando una aproximación al ciclo de vida de la edificación, remarcando el consumo de recursos naturales utilizados por este edificio.

**En 1987** entra en vigor el Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan el ozono que es un tratado internacional diseñado para proteger la capa de ozono reduciendo la producción y el consumo de numerosas sustancias que se han estudiado que reaccionan con el ozono y se conocen que son responsables del agotamiento de la capa de ozono.

**En 1988** se constituye a petición de los gobiernos miembros el Programa Intergubernamental del Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC). Su principal misión es proveer con evaluaciones científicas el riesgo de cambio climático producida por la actividad humana, sus consecuencias medioambientales y socioeconómicas.

**En 1990** tras un encuentro propuesto por la SETAC se adoptó el término Análisis de Ciclo de Vida. (Life Cycle Assessment).

**En 1992** en la Cumbre de la Tierra de Rio de Janeiro se adoptan las bases para la Convención para la Diversidad Biológica, acuerdo sobre la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

**En 1994** entra en vigor la CMNUCC con el fin de reforzar la conciencia pública, nivel mundial, de los problemas relacionados con el cambio climático.

**En 1995** nace la revista del International *Journal of Live Cycle Assessment*, la cual sigue siendo a día de hoy una de las publicaciones más importantes sobre ACV.

**En 1996** se publican las primeras normas de la serie ISO 14040 sobre el ACV y Gestión Ambiental.

**En 1997** a finales del año se adopta el Protocolo de Kioto. Es un acuerdo internacional cuyo objetivo es reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero, que causan el calentamiento global.

|                  |                         |
|------------------|-------------------------|
| CO <sub>2</sub>  | Dióxido de carbono      |
| CH <sub>4</sub>  | Metano                  |
| N <sub>2</sub> O | Óxido nitroso           |
| PFC              | Perfluorcarburos        |
| SF <sub>6</sub>  | Hexafluoruro de Sulfuro |

**En 2002** en la Cumbre de la Tierra de Johannesburgo se acordó mantener los esfuerzos para promover el desarrollo sostenible, mejorar las vidas de las personas que viven en la pobreza y revertir la continua degradación medioambiental mundial. También se lanzó oficialmente en Praga la Iniciativa de Ciclo de Vida de la UNEP-SETAC para fomentar patrones de consumo y producción más sostenibles. EN la actualidad, la iniciativa *UNEP-SETAC constituye el foro de expertos más importante del mundo en ACV.*

**En 2005** entra en vigor el Protocolo de Kioto.

**En 2006** se revisan todas las Normas relacionadas con ACV y evaluación Ambiental. En los últimos años se ha propuesto ampliar el enfoque de ACV atendiendo a las tres etapas de la sostenibilidad (económica, social y ambiental).

**En 2009** se desarrolla la XV Conferencia Internacional sobre el Cambio Climático en Copenhague, Dinamarca, desde el 7 al 18 de diciembre de 2009. Denominada COP 15, fue organizada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que organiza conferencias anuales desde 1995 con la meta de preparar futuros objetivos.

**En 2012** - RIO+20. junio 2012. Veinte años después de la última Conferencia sobre Medio Ambiente y Desarrollo celebrada en Río de Janeiro, representantes de diferentes países del mundo se reunieron para discutir el problema de la economía “verde”, el desarrollo sostenible y la erradicación de la pobreza.

**En 2015** - Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible, en New York para adoptar formalmente una nueva y ambiciosa agenda de desarrollo sostenible.

**En 2016** se avanza en los caminos iniciados en 2015, como la Agenda 2030 y el Acuerdo de París en materia de desarrollo sostenible y lucha contra el cambio climático abriéndose nuevas sendas en relación al urbanismo sostenible y la transparencia corporativa, y el proteccionismo podría cambiar el sentido de la brújula de la responsabilidad social.

Se empieza a atisbar como difícilmente alcanzable la meta de evitar el aumento de temperatura del planeta a 2°C a finales de este siglo respecto de los niveles preindustriales.

**En 2018** - Estados Unidos decide retirarse del Acuerdo de París comenzando una tendencia de muchas ciudades y empresas por todo el mundo para reafirmarse en su compromiso con el medio ambiente.

**En 2019** - Más de 25.000 representantes de 200 países se reunieron en Madrid, en la Cumbre del Clima del 2 al 13 de diciembre para alcanzar acuerdos y compromisos entre naciones para combatir los efectos del cambio climático. El resultado no fue muy satisfactorio, ya que no se lograron grandes acuerdos entre los países asistentes.

### **4.3. Normativa de aplicación.**

La Organización Internacional de Estandarización (ISO) realizó una serie de normas con recomendaciones técnicas para la gestión ambiental, y más concretamente el ACV. El conjunto de normas y guías ISO 14000 (nombre genérico del conjunto de normas) define la esencia de un sistema de gestión ambiental y los procedimientos de auditoría necesarios para la verificación. Dicha norma nos aporta información respecto al modo de gestionar los aspectos medioambientales de las actividades, productos y servicios de una empresa de manera más efectiva.

Cabe resaltar dos vertientes de la ISO 14000:

La certificación del Sistema de Gestión Ambiental, mediante el cual las empresas recibirán el certificado.

El Sello Ambiental, mediante el cual serán certificados los productos ("sello verde").

Las normas de gestión ambiental ISO 14000 sugieren a las empresas una serie de procedimientos de gestión que les permita asegurar a sus clientes una mejora ambiental continua de sus productos y servicios.

Estas normas 14000 no fijan unas metas ambientales generales ni concretas para la prevención de la contaminación, y no se involucran en el desempeño ambiental a nivel mundial, están enfocadas a establecer las herramientas y los sistemas destinados a los procesos de producción y de organización en el interior de una empresa u organización, contemplando los efectos o externalidades que de estos deriven al ambiente.

De forma resumida la figura 66 nos muestra el conjunto de normas relacionadas con el tratamiento ambiental de forma general.

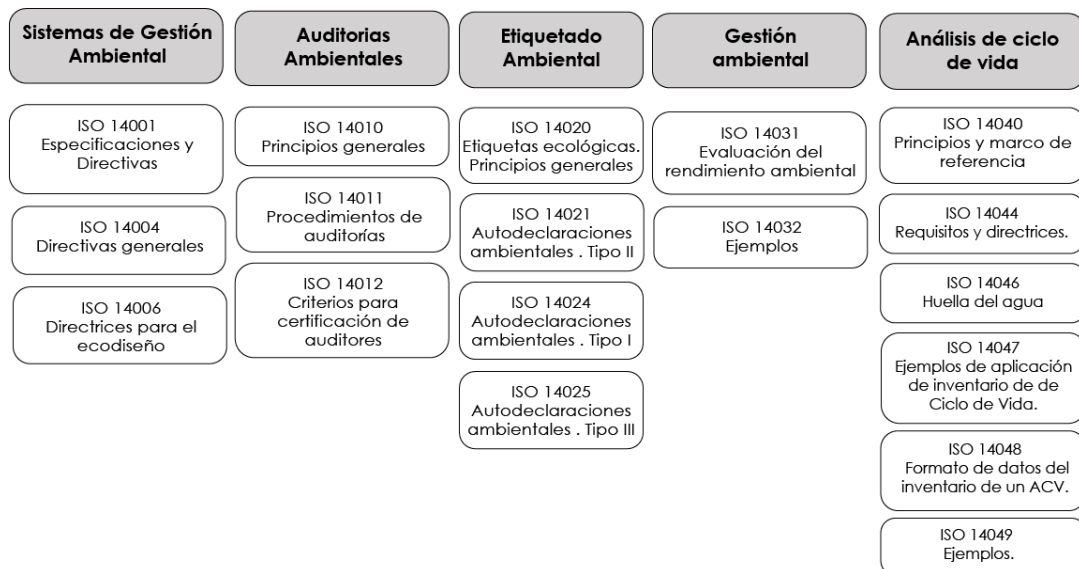


Figura 68. Resumen de las Normas ISO de Gestión Ambiental. Fuente: www. aenor.com

Si desarrollamos la familia de normas ISO 14000 tenemos las siguientes:

#### Sistema de gestión ambiental. ISO 14001

- ISO 14001, especificación para la implementación del Sistema de Gestión Ambiental. Se refiere específicamente al sistema de gestión ambiental, es decir, "a aquella parte del sistema global de gestión que incluye la estructura organizacional, las actividades de planificación, las responsabilidades, las prácticas, los procedimientos, los procesos y los recursos para desarrollar, implementar, lograr, revisar y mantener la política ambiental".

La norma ISO 14001 es aplicable a cualquier organización, de cualquier tamaño o sector, que bajo un supuesto de voluntariedad esté buscando reducir los impactos en el ambiente y cumplir con la legislación en materia ambiental.

- ISO 14004, Guía para la Implementación del Sistema de Gestión Ambiental.
- ISO 14006 Sistemas de gestión ambiental. Directrices para la incorporación del ecodiseño.

#### Auditorías ambientales. ISO 14010

- ISO 14010, Auditorías Ambientales. Principios generales.
- ISO14011, Auditorías de Sistemas de Gestión Ambiental. Procedimientos de auditorías.

- ISO 14012, Criterios para certificación de auditores.

#### Etiquetado ambiental. ISO 14020

- ISO 14020 Etiquetas ecológicas y declaraciones ambientales. Principios generales.
- ISO 14021 Etiquetas ecológicas y declaraciones medioambientales. Autodeclaraciones medioambientales (Etiquetado ecológico Tipo II)
- ISO 14024 Etiquetas ecológicas y declaraciones medioambientales. Etiquetado ecológico Tipo I. Principios generales y procedimientos.
- ISO 14025 Etiquetas y declaraciones ambientales. Declaraciones ambientales tipo III. Principios y procedimientos.

#### Gestión ambiental. ISO 14030

- ISO 14031, Gestión ambiental. Evaluación del rendimiento ambiental. Directrices.
- ISO 14032, Ejemplos de Evaluación del rendimiento Ambiental. (ERA)

#### Análisis de Ciclo de Vida. ISO 14040

- ISO 14040:1997 - Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y Marco de Referencia.
- ISO 14041, ISO 14042, 14043 están derogadas.
- ISO 14044.2006 Gestión ambiental- Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices.
- ISO 14046: Gestión ambiental. Huella de agua. Principios, requisitos y directrices. Derogada.
- ISO/TR 14047: Gestión ambiental - Evaluación del impacto del ciclo de vida. Ejemplos de aplicación de ISO 14042.

- ISO/TS 14048 Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida. Formato de documentación de datos.
- ISO/TR 14049 Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida. Ejemplos de la aplicación de ISO 14041 a la definición de objetivo y alcance y análisis de inventario.
- ISO 14060, guía para la inclusión de aspectos ambientales en las normas de productos.
- ISO 14064-1:2006 Gases de efecto invernadero. Parte 1: Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero.
- ISO 14064-2:2006 Gases de efecto invernadero. Parte 2: Especificación con orientación, a nivel de proyecto, para la cuantificación, el seguimiento y el informe de la reducción de emisiones o el aumento en las remociones de gases de efecto invernadero.
- ISO 14064-3:2006 Gases de efecto invernadero. Parte 3: Especificación con orientación para la validación y verificación de declaraciones sobre gases de efecto invernadero.
- ISO 14065:2013 Gases de efecto invernadero. Requisitos para los organismos que realizan la validación y la verificación de gases de efecto invernadero, para su uso en acreditación u otras formas de reconocimiento.

El conjunto de normas que regula la aplicación de la metodología del ACV fue preparado por el Comité Técnico para la Gestión Ambiental ISO/TC 207. Este Comité fue creado en 1993 y se le dio la competencia de formular las Normas Internacionales.

En el conjunto de normas anterior, la ISO 14040 es la relativa al ACV: Gestión medioambiental, ACV, Principios y estructura. Dada su complejidad, esta normativa establece un protocolo al cual deberá ajustarse todo estudio de ACV [65]. La ISO 14040:1997 da la siguiente definición del ACV:

*“El ACV es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas*

y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio”.

## Normas ISO 14000. Normas de Evaluación de Producto

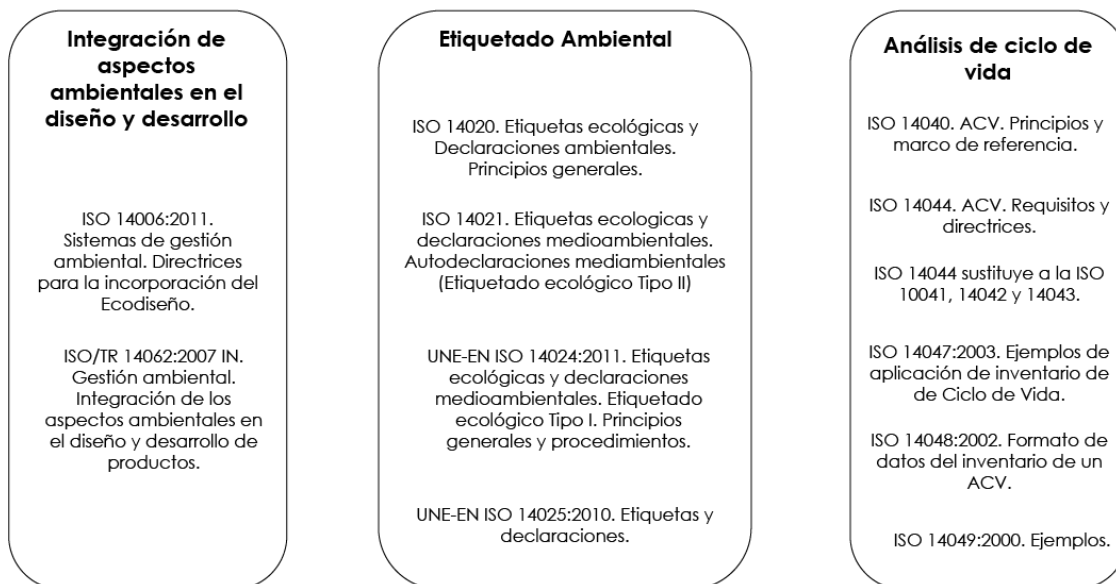


Figura 69. Normas ISO de Gestión Ambiental. Fuente: [www.aenor.com](http://www.aenor.com)

Dentro de estas normas, la que nos afecta directamente es la normativa ISO 14040, y vemos que un proyecto de ACV se divide en cuatro informes técnicos:

### **ISO 14040:2006 Gestión ambiental. Evaluación del ciclo de vida. Principios y marco:**

Describe los principios de referencias que debe cumplir cualquier ACV desde una perspectiva genérica, entre ellos: definición del objetivo y el alcance del proyecto, limitaciones, análisis de inventario, evaluación de los impactos ambientales, interpretación de los resultados, realización del informe y la revisión crítica.

### **ISO 14044:2006 Gestión ambiental. Evaluación del ciclo de vida. Requisitos y directrices.**

Se especifican los requisitos y ofrece las directrices para el desarrollo de un ACV, es decir, se desarrollan todos los puntos y las bases generales establecida en la norma ISO 14040:2006.

### **ISO/TR 14047:2002 Gestión ambiental. Evaluación del impacto de ciclo de vida. Ejemplos de la aplicación de la norma ISO 14044.**

Proporcionan ejemplos para ilustrar la práctica actual de la evaluación de impacto de ciclo de vida de acuerdo a la Norma ISO 14044:2006. Estos ejemplos son sólo una muestra de todas las formas posibles que podrían satisfacer las disposiciones de la Norma. Reflejan los elementos clave de la fase de evaluación de impactos de ciclo de vida del ACV.

### **ISO/TS 14048:2002 Gestión ambiental. Evaluación del impacto del ciclo de vida. Formato de documentación de datos.**

Esta especificación técnica proporciona los requisitos y una estructura transparente y sin ambigüedades del ACV y el inventario del ciclo de vida, lo que permite la documentación coherente de datos, elaboración de informes, compilación de datos, cálculo de datos, calidad de los datos, especificando y estructurando la información relevante.

### **ISO/TR 14049:2012 Gestión ambiental. Evaluación del impacto del ciclo de vida. Ejemplos de aplicación de la ISO 14044 para la definición del objetivo y alcance y el análisis del inventario.**

Proporciona ejemplos acerca de las prácticas en la realización de un análisis del inventario del ciclo de vida como un medio de satisfacer ciertas disposiciones de la norma ISO 14044:2006. Estos ejemplos son sólo una muestra de los posibles casos que cumplan las disposiciones de la norma y reflejan sólo partes de un estudio completo.



Figura 70. Entradas y salidas relativas al ACV. Fuente: ISO 14000

#### 4.4 Herramientas de calificación basadas en el ACV. Software disponible.

Para facilitar el cálculo, desde que apareció el concepto de Análisis de Ciclo de Vida, se han desarrollado numerosas herramientas basadas en su metodología. La mayoría de programas incluyen bases de datos, y otras permiten importarlas y editarlas.

Para estudios de ACV de cualquier producto o material, la Comisión Europea, Methodology Study Eco-Design of Energy-Using Products (MEEUP) clasifica los estudios de ACV según las herramientas informáticas, metodologías y bases de datos. Una de ellas será la que se utiliza para realizar el estudio propuesto. Existen bases de datos de productos químicos, de envases, otras para el ecodiseño de productos, para productos industriales, incluso algunos permiten asociar costes y realizar análisis económicos. Hay herramientas para realizar estudios de ACV prácticamente de todos los productos y sectores específicos.

En lo que refiere a evaluación de edificios, existen gran variedad de herramientas para hacer un estudio de ACV. Según un artículo publicado recientemente, [66] las herramientas de ACV que pueden servir de apoyo, se pueden clasificar en 4 niveles:

**NIVEL 1:** Herramientas genéricas de ACV. Son difíciles de utilizar en la fase inicial de un proyecto, por el tiempo y conocimiento que requiere y por no ser exclusivas para la construcción. Tienen gran complejidad, y requiere gran conocimiento y dedicación para abordar un proyecto de diseño de un edificio aplicando el ACV desde los materiales y materias primas:

- Aist-LCA, eVerDEE, Gabi 4, JEMAI-L-LCA, Lcapix, SimaPro, Team™, Umberto 5.5

**NIVEL 2:** Son las bases de datos de ACV de productos de construcción, o de procesos, que se desarrollan para su uso en la fase inicial de diseño, más concretamente en la fase del Inventario de materiales, pero también resultan difíciles de utilizar.

- ECOTECH SUDOE: Primera base de datos española de ACV. Financiado por Europa (FEDER), se centra en las cuestiones

sociales y ambientales ACV; Ecodiseño; y ecología Industrial y territorial. Escala parcial europeo Sudoeste, que incluye España, Portugal y cuatro regiones del sur oeste de Francia [67].

- ECOINVENT: Base de datos de Suiza con más de 2500 procesos, que integra las bases ETH-ESU 96, BUWAL 250 entre otras
- BUWAL 250/SAEFL250. Desarrollada por el Instituto Suizo y está basada parcialmente en la base de datos ETH-ESU. Contiene un inventario para materiales de embalaje, además de sistema de energía y transporte utilizados. La versión del 97 engloba 248 procesos.
- ETH-ESU: Tiene base Suiza, y en ella abarca la producción e importación de combustibles, la producción y comercialización de electricidad incluso las emisiones desde la extracción de la energía primaria, refinado, la extracción de recursos minerales materias primas, etc.
- IDEMAT96: Base de datos con origen Holandés que contiene información sobre materiales, procesos y componentes utilizados en el desarrollo de productos.
- INDUSTRY DATA: Base de datos de diversas asociaciones de industrias internacionales. Versión de 2001 con 74 tipos de procesos.
- FRANKLIN: Base de datos estadounidense sobre materiales, transporte y energía. 78 procesos en la versión del 96.
- IVAM 2.0: Origen Holandés. Es una base de datos genérica que contiene información de BUWAL y APME. Engloba materiales de construcción.
- ICE: Inventory of Carbon and Energy, Inglesa. Es una hoja de cálculo que incluye más de 400 valores de energía en aproximadamente 170 tipos de materiales diferentes de construcción.
- FDES: Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire des Produits de construction, de Francia. Es una base de datos

online francesa, con más de 5000 fichas de declaración ambiental.

- DAPc: Ecoetiquetado de productos de la construcción. Basadas en estudios de ACV verificados de forma independiente y realizados bajo unas directrices consensuadas, permitiendo una comparación equitativa entre distintos productos.

**NIVEL 3:** Se recogen herramientas específicas para el ACV en edificación, que se desarrollan expresamente para ser utilizadas en la fase inicial del diseño de un proyecto. Son exclusivas en construcción, fáciles de utilizar y facilita el uso de las mismas a nivel de sistemas constructivos y expresamente dedicados a la fase de diseño del proyecto:

- ATHENA Estimator, BEAT 2002, BeCost, BEES, EcoBat, EcoCalculator, EcoEffect, Eco-Quantum, EcoSoft WBF, Invest2, EQUER, LCAid, LEGEP, LISA, Metabase, TCQ2000, OFEN.

**NIVEL 4:** Son las herramientas de certificación global de edificaciones. Estas no han sido desarrolladas para la fase inicial de diseño, sino que son de aplicación a fases avanzadas de diseño, o cuando el proyecto está finalizado. Herramientas de certificación sostenible:

- Breeam, Casbee, GBTool, Green Calc, GreenGlobesTMB, Leed, Verde, Qsostenible (Ver figura 71).



Figura 71. Sellos ecológicos. Fuente: breem.com

La clasificación de herramientas permite identificar la validez de las herramientas como ayuda al proyectista en el diseño del edificio o de sus sistemas constructivos o de sus instalaciones. Aunque todas las

herramientas pueden ser utilizadas para la evaluación medioambiental de sistemas constructivos, las más útiles para el diseñador en la fase inicial del proyecto son las del 3º nivel, ya que son exclusivas para edificación y fáciles de usar en dicha etapa, puesto que se han desarrollado para ello.

Pero todas estas herramientas tienen limitaciones [68]:

- Son difícilmente aplicables a la construcción española.
- Algunas consideran consumos de agua, pero no todas.
- Pocas tienen información por defecto de la fase de ejecución.
- Algunas no contienen información por defecto de los impactos en la fase de uso y mantenimiento.
- La limitación más importante es que ninguna de dichas herramientas es de aplicación real en otro país que en el originado, ya que el nivel de impacto ambiental causado por los materiales y soluciones constructivas, varía en función del territorio, y por tanto, debido a la ubicación geográfica de la obtención de las materias primas y de los centros de transformación con relación a la situación del proyecto de edificio. Las pocas herramientas que son españolas basan el análisis en sus pasos en datos europeos, por lo que su aplicabilidad al caso español es bastante reducida.

Una revisión sobre estudios de ACV realizado a diferentes proyectos constructivos entre los años 2000 y 2007 [69] se centró en 2 caminos diferentes para determinar el ACV. Uno de ellos es *LCA for the Building Material and Component Combinations* (BMCC) y el otro se conoce como *Whole Process of the Construcción* (WPC). El primer estudio, se centra en la implementación de productos con declaraciones medioambientales de cada material, es decir, ecodiseños, como estrategia adoptada para reducir el impacto medioambiental de un producto. Considerando este hecho, se declara que se puede reducir en torno al 60% de su impacto de ciclo de vida si se consideran los criterios medioambientales desde la etapa de diseño del producto. Cuando se aplica el *Whole Process of the Construcción* (WPC), el análisis de ciclo de vida se divide en edificios residenciales, comerciales y edificios civiles. Este estudio considera el ciclo de vida del edificio completo como un proceso no estático, y varía en cada edificio, desde sus propias funciones y diferentes características. Las técnicas constructivas, el estilo arquitectónico y condiciones diferentes como el tamaño de la edificación, el clima, el consumo energético y la situación, afectan a cada estado del análisis del ciclo de vida. El 40% de

los casos de estudio aplican el *Whole Process of the Construcción (WPC)* y el 60% aplican el estudio de ACV con *Building Material and Component Combinations (BMCC)*.

#### **4.5. Metodología ACV con SimaPro.**

Esta metodología normalizada por la ISO 14000, tiene una serie de fases que pasamos a describir a continuación:

##### **4.5.1. Objetivo y Alcance**

Para hacer un estudio sobre el análisis del ciclo de vida, necesitamos pasar por las 4 fases que marca la normativa [70].

Para la realización de cualquier estudio de ACV, es necesario ir incorporando todos los materiales que componen los sistemas y sus procesos asociados, así como la energía empleada en la propia construcción y uso de los mismos.

El orden que conlleva estos estudios, está basado en la normativa explicada anteriormente y en las etapas para evaluarlo:

- a) Energía requerida para la obtención de materias primas, transporte de las mismas, y su transformación en los diferentes materiales destinados a la fabricación de los sistemas.
- b) Transporte de los materiales hasta las fábricas donde se fabrican los componentes y la energía que se consume en las etapas de fabricación.
- c) Cuantificación del gasto propio del sistema, durante la etapa de uso y mantenimiento de los sistemas, que no tiene por qué coincidir con la etapa de vida del edificio.
- d) Posteriormente se determinación de la energía empleada en el desmontado y reciclaje de materiales hasta sus alternativas de fin de vida.

El software SimaPro tiene un interfaz amigable, en el que se distribuyen las 4 etapas de la norma ISO 14040 en una columna situada a la izquierda. Como se puede ver en la figura 72, es necesario ir introduciendo los datos necesarios para poder realizar el estudio, y habrá una relación directa entre la calidad de estos datos y lo riguroso de los resultados obtenidos en el estudio.

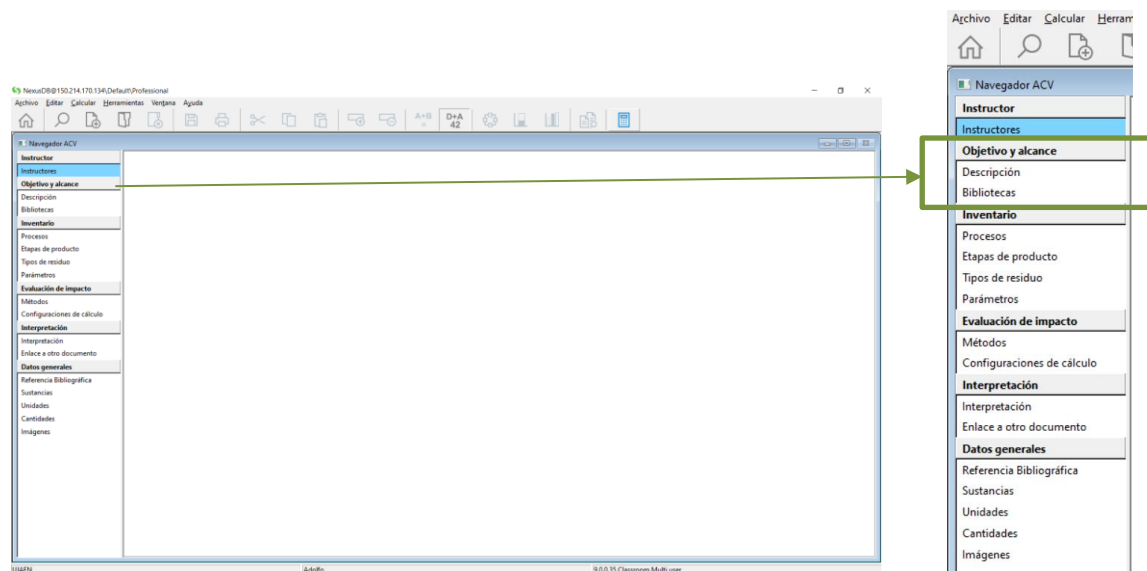


Figura 72. Fase de Objetivo y alcance en el software SimaPro.

Si pulsamos sobre “Descripción”, aparece una ventana donde nos aparecen los datos administrativos del estudio. Se nos presentan dos apartados importantes a definir: el tipo de ACV y la definición de la unidad funcional.

La incorporación de estos datos permite una organización, clasificación y control de los estudios que realicemos, ya que pueden servir de base a otros usuarios para tomar información de los procesos introducidos.

Sin duda alguna es la base para la posterior redacción y generación del informe que presente los resultados y el motivo del estudio que se ha realizado.

El desglose de información es completada por la persona responsable del estudio, que debe explicar adecuadamente el origen de los datos, el tipo de ACV, el responsable del encargo, el sentido del estudio, a quién va dirigido, así como los flujos de referencia y los escenarios alternativos utilizados. (Ver figura 73).

Estudio de la Eficiencia Energética y la Sostenibilidad de los sistemas de generación de energía en un edificio terciario de la Universidad de Jaén mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

**Navegador ACV**

**Instructor**

Instructores

**Objetivo y alcance**

**Descripción**

Bibliotecas

**Inventario**

Procesos

Etapas de producto

Tipos de residuo

Parámetros

**Evaluación de impacto**

Métodos

Configuraciones de cálculo

**Interpretación**

Interpretación

Enlace a otro documento

**Datos generales**

Referencia Bibliográfica

Sustancias

Unidades

Cantidades

Imágenes

Nombre  
ACV bomba de calor

Fecha  
29/01/2020

Autor

Comentario

Tipo ACV  
Unspecified

Objetivo

Motivo

Quien ordena el proyecto

Parte interesada

Ejecutor del Proyecto

Unidad funcional

Flujos de referencia

Escenarios alternativos

Figura 73. Datos a completar en Descripción. Software SimaPro.

En el apartado siguiente (figura 74) se realiza una selección de las bases de datos, denominadas “bibliotecas”, que contiene el programa. Se realiza una descripción del origen, forma de obtención y estudios realizados con los datos que se aportan en cada biblioteca. Esta selección incluirá en nuestro estudio los datos necesarios desde donde vamos a ir desarrollando los procesos de los sistemas a analizar.

Existen bibliotecas de multitud de áreas. Industria, construcción, agricultura y alimentación, transportes, etc... y que habrá que analizar previamente para seleccionar la más adecuada a nuestros intereses.

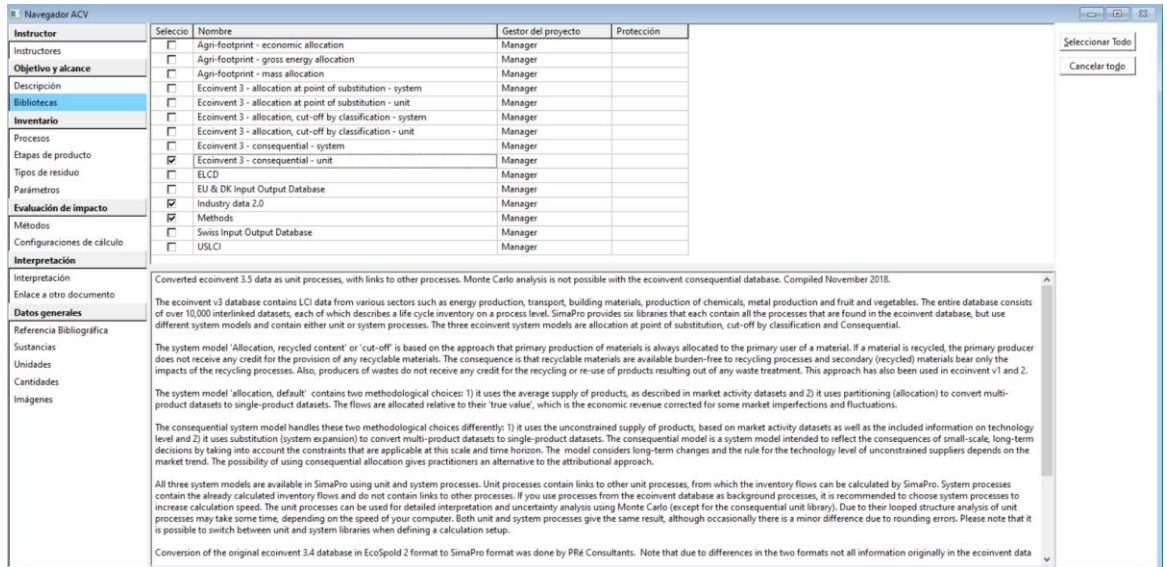


Figura 74. Bibliotecas que contempla el software SimaPro.

## 4.5.2. Inventario

La fase más larga del proceso, es la del inventario, pues consiste en contabilizar todos los distintos impactos medioambientales que ejerce el "objeto" sobre el medio, a través de balances de materia y energía.

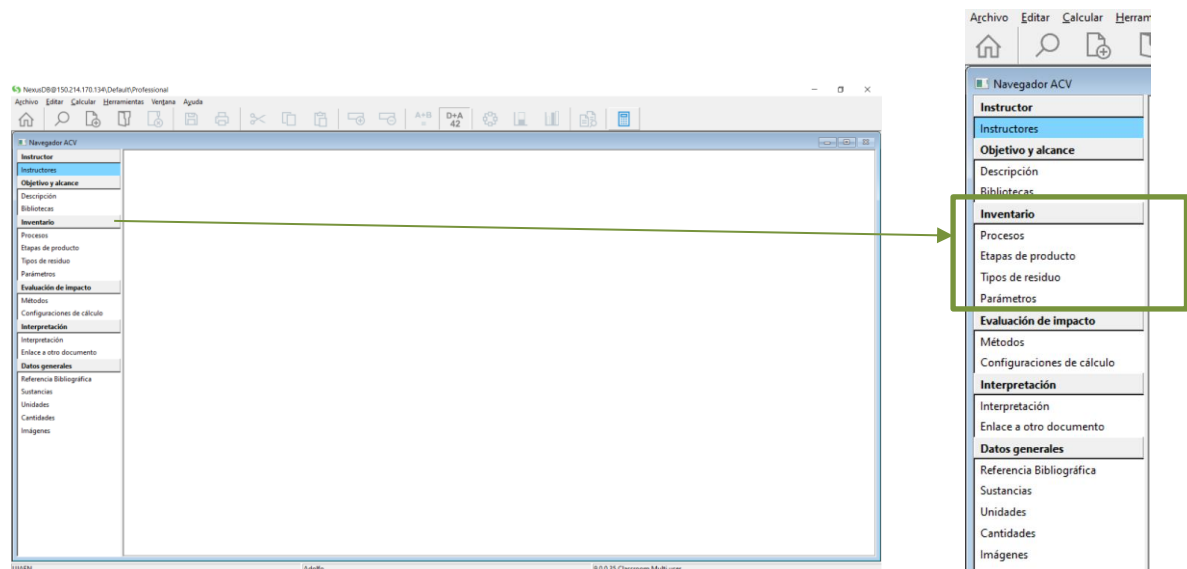


Figura 75. Fase de inventario en el software SimaPro.

Estudio de la Eficiencia Energética y la Sostenibilidad de los sistemas de generación de energía en un edificio terciario de la Universidad de Jaén mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Para esta fase, es necesario contar con bases de datos que incorporen los elementos necesarios para el estudio. Existen diversas bases de datos, públicas o privadas, que contienen información contrastada y de alto rigor. En un estudio se pueden combinar diversas bases de datos o utilizar una única base.

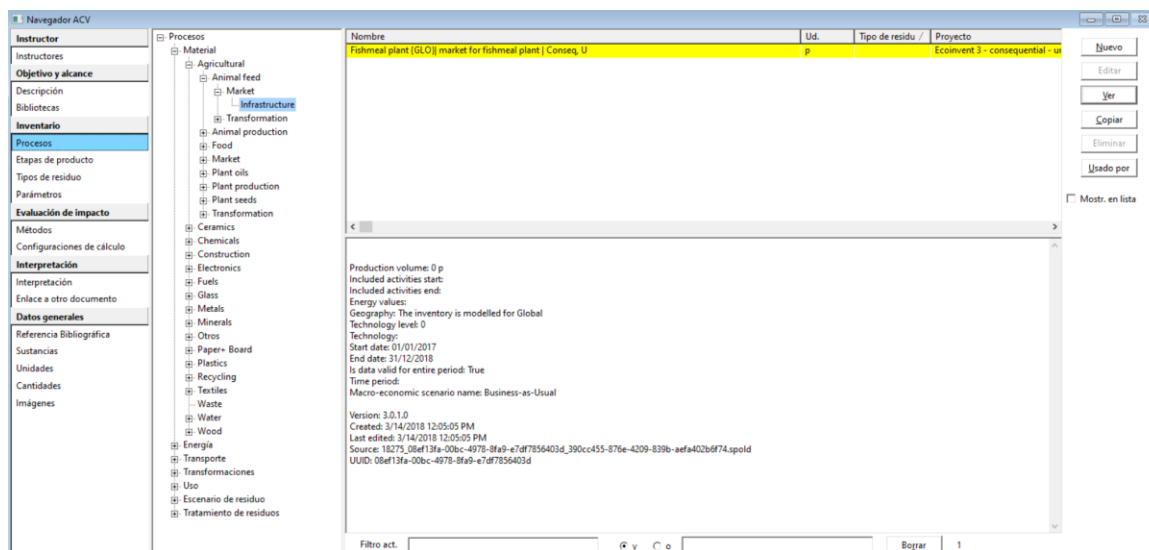


Figura 76. Software SimaPro.

En algunos casos, también es importante estudiar la Gestión del ciclo de vida (LCM), que son fundamentos del Coste del ciclo de vida (LCC). Análisis económico del coste del ciclo de vida y evaluación del coste del ciclo de vida. Es básicamente un estudio de Ciclo de Vida al que se incorporan criterios económicos a los resultados obtenidos, teniendo de este modo información sobre el coste estimado del uso de una solución u otra y sus efectos medioambientales.

Para realizar el trabajo futuro, el ACV completo de las instalaciones elegidas como modelo, se necesita una herramienta de evaluación de impacto ambiental. Dicha herramienta debe permitir calcular el ACV completo para así evaluar los impactos reales, e introducir las mejoras propuestas, y valorar y verificar las hipótesis establecidas. Para ello utilizaremos un software clasificado en el nivel 1. El programa elegido es SimaPro [71].

Desarrollado por la empresa Holandesa PRé Consultants, es comercializado por la empresa Lavola. SimaPro es una herramienta profesional para el cálculo de los impactos ambientales, sociales y económicos, asociados a un producto o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida, con aplicación al ecodiseño, al desarrollo de ecoetiquetas, al cálculo de huellas de carbono o huellas hídricas, entre otros.

Este programa tiene una interfaz de usuario basado en la normativa ISO 14040 mencionada anteriormente, y puede ser utilizado para desarrollar complejos modelos parametrizados en distintos escenarios. La aplicación presenta los cálculos de evaluación de impacto para cada etapa del sistema estudiado, permitiendo realizar análisis de distintos escenarios de tratamientos de residuos y de reciclaje, análisis de sensibilidad y análisis de incertidumbre (denominado Monte Carlo).

SimaPro utiliza bases de datos de materiales y procesos muy complejos, además contiene las principales métodos de evaluación de impacto: Eco-Indicador 99, Eco-indicador 95, CML 2001 baseline, Récipe, EDIP/UMIP, EPS 2000, Ecopuntos 97, Impact 2002+ y TRACI. Utiliza base de datos de inventario propias (creadas por el usuario) y bibliográficas como Ecoinvent, BUWAL, IDEMAT, ETH, IVAM, con más de 7.000 procesos, y además cuenta con un módulo específico para edificación.

Permite realizar ACV completos con múltiples métodos de evaluación de impactos. Presenta complejas y variadas bases de datos y es adecuada para los departamentos de diseño o I+D. Es una herramienta informática compleja y flexible que permite desarrollar estudios de ACV de gran cantidad de productos y actividades, aunque directamente no está diseñada para evaluar el impacto de un edificio, sí que podemos utilizarla para realizar el estudio de los impactos de nuestros sistemas de climatización. Por tanto, si quisiéramos calcular los impactos del edificio completo deberíamos recurrir a la combinación con otras herramientas de simulación energética para edificios. Este no es nuestro caso.

Además permite realizar un análisis interactivo de los resultados con una buena trazabilidad y posibilita efectuar un análisis de los puntos débiles a través del árbol de procesos del sistema analizado.

Actualmente en su última versión SimaPro 9 (19 de Octubre de 2019), existen diferentes versiones adaptadas a cada funcionalidad:

Estudio de la Eficiencia Energética y la Sostenibilidad de los sistemas de generación de energía en un edificio terciario de la Universidad de Jaén mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

-SimaPro compact. Para resultados rápidos. Realizar el modelado y análisis de productos.

-SimaPro Analyst. Para la realización ACV más completos. Permite el uso de parámetros, el análisis de escenarios y el análisis de incertidumbre.

-SimaPro Developer para enlazar con software externos. Permite además enlace directo con Excel u otras aplicaciones externas.

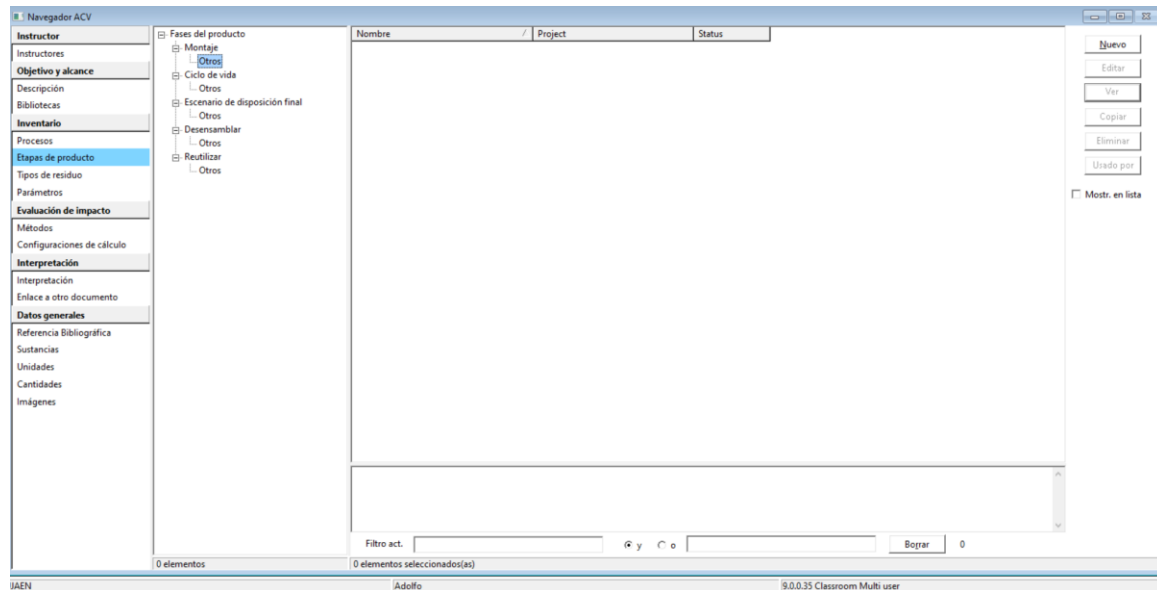


Figura 77. Software SimaPro.

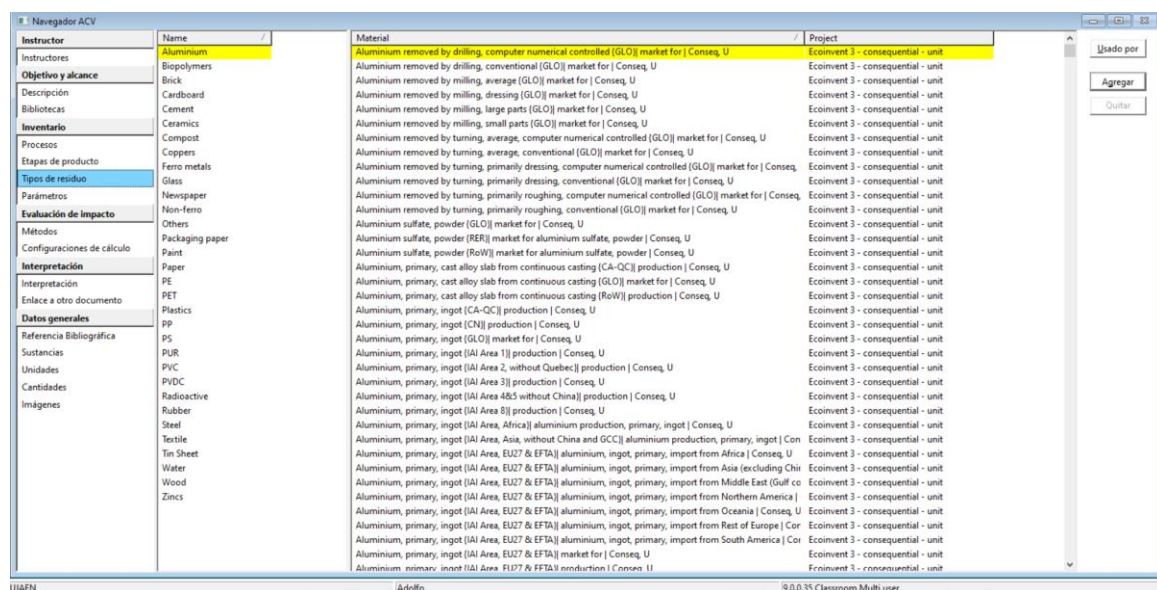


Figura 78. Fase de inventario en el software SimaPro.

### 4.5.3. Evaluación del Impacto Ambiental

La evaluación de impacto para el ciclo de vida es definida como la fase en LCA dirigida a entender y evaluar la magnitud y el significado de los impactos potenciales para el medio ambiente de un sistema producto. Esta fase tiene como finalidad la interpretación del inventario, analizando y evaluando los impactos producidos por las cargas ambientales identificadas en el mismo. Para ello, se relacionan los datos del inventario con una serie de categorías de impacto definidas previamente y se cuantifica la contribución de cada contaminante a la categoría de impacto correspondiente, pudiendo identificar las partes del sistema que más afectan y que deben ser valoradas de manera más detallada.

El estándar ISO 14040 define ACV como una compilación y evaluación de entradas y salidas y de los impactos potenciales para el medio ambiente de un sistema a lo largo de su ciclo de vida. En esta definición queda claro que la evaluación de impacto es una parte integral de ACV.

Los métodos de evaluación de impacto son descritos en la ISO 14042. En este estándar, se distingue entre:

- Elementos obligatorios, tales como clasificación y caracterización
- Elementos opcionales, tales como normalización, jerarquización, agrupación y ponderación.

Eso significa que según ISO, cada ACV por lo menos debe comprender clasificación y caracterización. Si tales procedimientos no son aplicados, uno solo puede referirse al estudio como un inventario del ciclo de vida (LCI por sus siglas en inglés).

Se hace una distinción importante entre aplicaciones internas y externas. Si los resultados se usarán para comparar productos (competitivos) y se presentarán al público, no se puede usar la ponderación.

Estudio de la Eficiencia Energética y la Sostenibilidad de los sistemas de generación de energía en un edificio terciario de la Universidad de Jaén mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

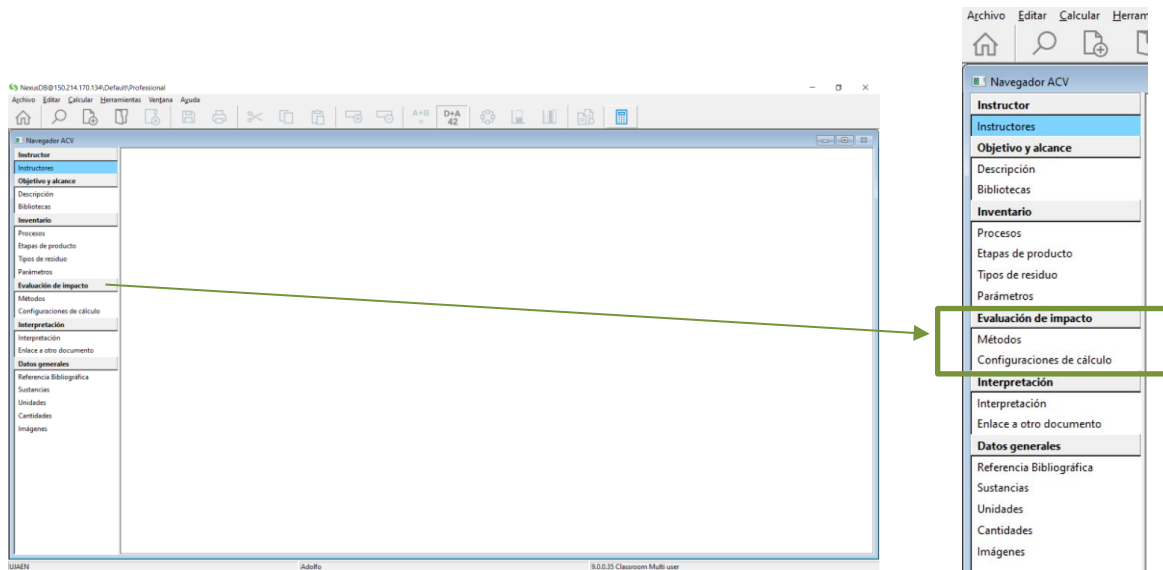


Figura 79. Evaluación del impacto en el software SimaPro.

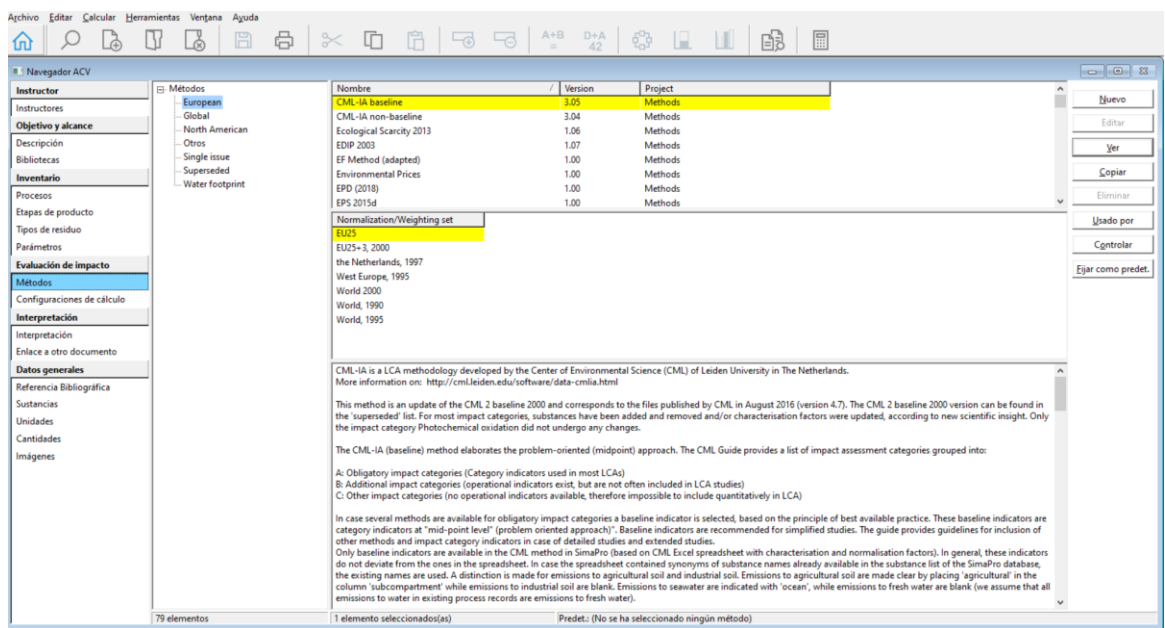


Figura 80. Evaluación del impacto en el software SimaPro.

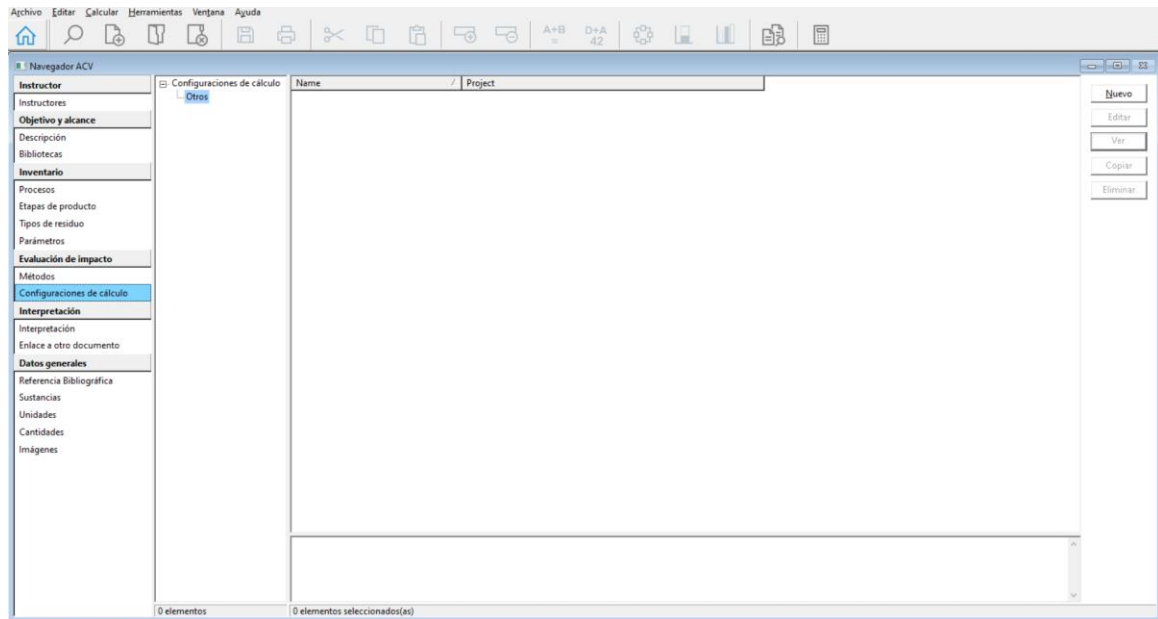


Figura 81. Fase de inventario en el software SimaPro.

### Elementos obligatorios.

Clasificación: El resultado del inventario LCA usualmente contiene cientos de emisiones y parámetros de extracción de recursos diferentes. Una vez que las categorías de impactos relevantes hayan sido determinadas, estos resultados LCI deben ser asignados a estas categorías de impacto.

Ejemplo: CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> están asignados a la categoría de impacto "Calentamiento global", mientras que SO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub> están asignados a una categoría de impacto de acidificación. Es posible asignar emisiones a más de una categoría de impacto a la vez.

Caracterización: Una vez que las categorías de impacto hayan sido definidas y los resultados LCI hayan sido asignados a estas categorías de impacto, será necesario definir factores de caracterización. Estos factores deberían reflejar la contribución relativa de un resultado LCI al resultado del indicador de la categoría de impacto.

### Elementos opcionales.

Normalización: La normalización es un procedimiento que se requiere para demostrar hasta qué grado la categoría de impacto contribuye en forma significativa al problema ambiental global. Lo anterior se hace dividiendo

los indicadores de la categoría de impacto por un valor “normal”. Hay diferentes formas para determinar el valor “normal”. El procedimiento más común es de determinar los indicadores de la categoría de impacto para una región durante un año y, si así se desea, de dividir este resultado por la cantidad de habitantes en esta área. La normalización tiene dos propósitos:

1. Determinar las categorías de impacto que solo contribuyen un tanto por ciento muy pequeño en comparación a otras categorías de impacto.
2. Excluir las de la comparación, reduciendo así la cantidad de puntos que deben ser evaluados.

Los resultados normalizados demuestran el orden de magnitud de los problemas ambientales generados por el ciclo de vida de productos comparado con el total de los impactos para el ambiente en Europa.

Agrupación y clasificación: Se realiza para evitar de este modo la interpretación de los resultados se hace más fácil, los indicadores de categorías de impacto pueden ser agrupados y clasificados atendiendo a algunos criterios:

- >> Indicadores de categoría de impacto que tienen algunas características comunes pueden ser presentados como un grupo. Ejemplo: Una caja para un grupo de indicadores de categorías de impacto con significado global, regional y local.

La clasificación se refiere a un procedimiento donde categorías de impacto son clasificadas por un foro en orden descendente de importancia.

Ambos procedimientos pueden ser usados para presentar los resultados.

Evaluación de daños: Los métodos son difíciles de interpretar puesto que existe una amplia gama de indicadores de categorías de impacto. Para simplificar la interpretación, se puede usar un procedimiento de agrupación en el Eco-indicator 99, y en la metodología EPS2000. En estos métodos, los indicadores de categoría son definidos cerca de uno de los tres puntos finales para lograr una relevancia ambiental óptima. Los indicadores de categoría de impacto que se refieren al mismo punto final son definidos de tal manera que la unidad del resultado del indicador es

la misma. Eso permite la adición de los resultados del indicador por grupo. Los resultados del indicador pueden ser presentados como tres indicadores a nivel del punto final sin cualquier ponderación subjetiva.

La interpretación de tres en vez de un juego múltiple de indicadores es mucho más fácil. El procedimiento sería el siguiente:

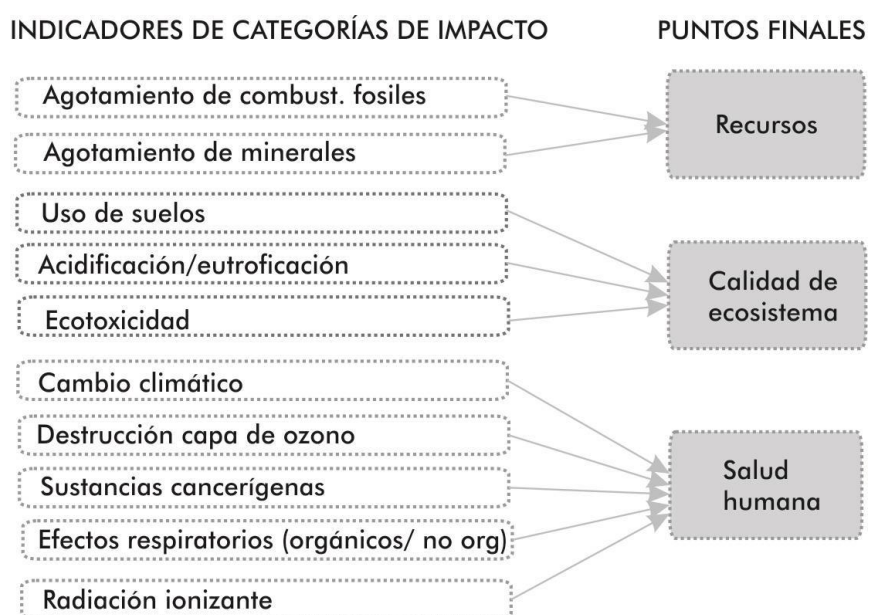


Figura 83. Indicadores de categoría de impacto. Fuente: SimaPro.

Ponderación. La ponderación es el paso más controvertido y difícil en la determinación del impacto en el ciclo de vida, especialmente para métodos de puntos intermedios. Varias soluciones han sido sugeridas para resolver o simplificar el problema de la ponderación:

- **Usar un foro que evalúe la categoría de impacto** y que sugiera ponderaciones estándar. En algunas de estas reuniones, en las que participan expertos en ACV, no consiguen alcanzar los objetivos marcados que aclaren la importancia relativa de los impactos, es por ello que tiene grandes dificultades.
- **Distancia al objetivo.** Es posible establecer un objetivo para cada categoría de impacto y este objetivo podrá ser utilizado para derivar un factor de ponderación. El método Ecopoint utiliza objetivos establecidos por el gobierno de Suiza; el

método Eco-indicator 95 usa objetivos que reflejan la reducción necesaria para disminuir el daño hasta cierto nivel el cual es igual para todas las categorías de impacto.

- **Monetarización:** En EPS2000, todos los daños son expresados en la misma unidad monetaria: Unidades de impacto para el medio ambiente comparables a Euros. En la metodología se supone que estos tipos diferentes de costos (costo actual y disposición a pagar y costos futuros de extracción) pueden ser agregados. Eso puede ser interpretado como un paso de ponderación en el cual los factores de ponderación para estos diferentes tipos de costos equivale uno.

Esta fase, describe varios chequeos que deben ser efectuados para ver si las conclusiones que se quieren sacar del estudio son adecuadamente apoyadas por los datos y los procedimientos utilizados. Este capítulo explica los procedimientos más importantes y demuestra cómo son apoyados en SimaPro.

## **4.6. Análisis de los resultados.**

### **4.6.1. Incertidumbre**

Todos los datos en los modelos de ciclos de vida tienen alguna incertidumbre. Se pueden distinguir tres tipos principales:

1. Incertidumbres en los datos.
2. Incertidumbres con respecto a la exactitud del modelo.
3. Incertidumbres por ser incompleto el modelo.

### **4.6.2. Análisis de sensibilidad**

Es recomendable hacer el análisis de sensibilidad, para ver la influencia de las suposiciones más importantes, sobre todo durante y al final del ACV. Para ello es necesario cambiar la suposición y recalcular ACV. Con este tipo de análisis, se entenderá mejor la magnitud del efecto de las suposiciones. Una vez realizado, podemos encontrar que el resultado de ACV puede depender bastante de algunas de las suposiciones. Eso no necesariamente debe ser un problema siempre y cuando las conclusiones del estudio sean estables.

Sin embargo, podemos encontrar que bajo una suposición el producto A está más perjudicado que B y bajo otra suposición el producto B está más perjudicado que A, y debemos explicar cuidadosamente bajo cuáles suposiciones sus conclusiones tienen validez. También podemos concluir que no existe una sola respuesta puesto que todo depende de suposiciones.

#### **4.6.3. Análisis de contribución**

Esta es una herramienta importante para entender la incertidumbre del resultado. Con dicho análisis, se podrán determinar cuáles son los procesos que juegan un papel significativo en los resultados. Se conoce que un ACV incluye cientos de procesos diferentes, el 95% hasta el 99 % de los resultados es determinado para solo diez procesos. Con la información, la atención puede concentrarse en estos procesos si son suficientemente representativos, completos y si hay suposiciones importantes incluidas en ellos.

#### **4.6.4. Análisis de Gravedad**

En el apartado anterior, el análisis de contribución demuestra qué procesos causan un gran impacto al medio ambiente. Sin embargo, lo anterior no revela la causa del impacto.

Ejemplo: Si el proceso A usa una gran cantidad de electricidad generada con carbón, el análisis de contribución demostrará que la electricidad generada con carbón es importante, pero no nos dice que el impacto viene del uso del carbón para producir la electricidad. En el análisis de gravedad se pueden observar las interrelaciones entre los procesos y se puede demostrar qué procesos son responsables del perjuicio y cuáles son los procesos que puedan causar emisiones bajas.

#### **4.6.5. Resultado del inventario**

El resultado de la fase de inventario es denominado AICV o resultados de inventario. Es una lista de emisiones y materias primas con una cantidad. En muchos casos, la lista cubre cientos de sustancias lo que lo hace muy difícil interpretar el resultado. Sin embargo, la ventaja es que el resultado es muy detallado y no está afectado por las incertidumbres introducidas en la determinación del impacto.

En este caso, siempre es útil aplicar procedimientos de determinación para entender mejor el significado de cada resultado AICV, como pueden ser:

**Estrategias de mejora del impacto ambiental a lo largo de todo su ciclo de vida de los productos. (Herramienta para la elección de materiales y procesos):**

- Estudio de alternativas de materiales y sistemas de fabricación/construcción desde el punto de vista del ACV.
- Estudio de alternativas de instalaciones, diseño, uso y mantenimiento de un edificio/sistemas desde el punto de vista del ACV.
- Estudio de alternativas de fin de vida desde el punto de vista del ACV.

#### **4.7. Análisis de los resultados.**

Si volvemos al estudio energético de nuestro edificio y en relación a la Limitación de la Demanda Energética, era de esperar que el edificio cumpliera con lo establecido en el CTE- HE1, ya que se trata de un edificio relativamente reciente. Presenta un resultado favorable, quedando en una pequeña proporción por debajo del edificio de referencia (90.9% de Calefacción y 86% de refrigeración de la demanda de referencia). El resultado es final es que el edificio, por su envolvente, situación y características, va a demandar un 80.6% Calefacción y 19.4% de Refrigeración. Los resultados obtenidos son favorables, aunque posiblemente con algunos cambios se pueda mejorar.

Es por esto que nos centramos en el Análisis de Ciclo de Vida de las instalaciones del edificio ya que el análisis de ciclo de vida del edificio entero sería necesario para identificar y evaluar la clave de los parámetros de diseño y lo que influyen en el cambio medioambiental, algo que no es necesario puesto que ya está construido, y nuestro objetivo no es el cambio de parámetros del diseño del mismo.

En la etapa de interpretación del ACV es donde determinamos cuales son las fases del ciclo de vida del edificio/sistema/producto que generan importantes cargas ambientales, y por tanto serán los puntos que deben mejorarse. Y una vez modificado, ver cual presenta mejor comportamiento ambiental.

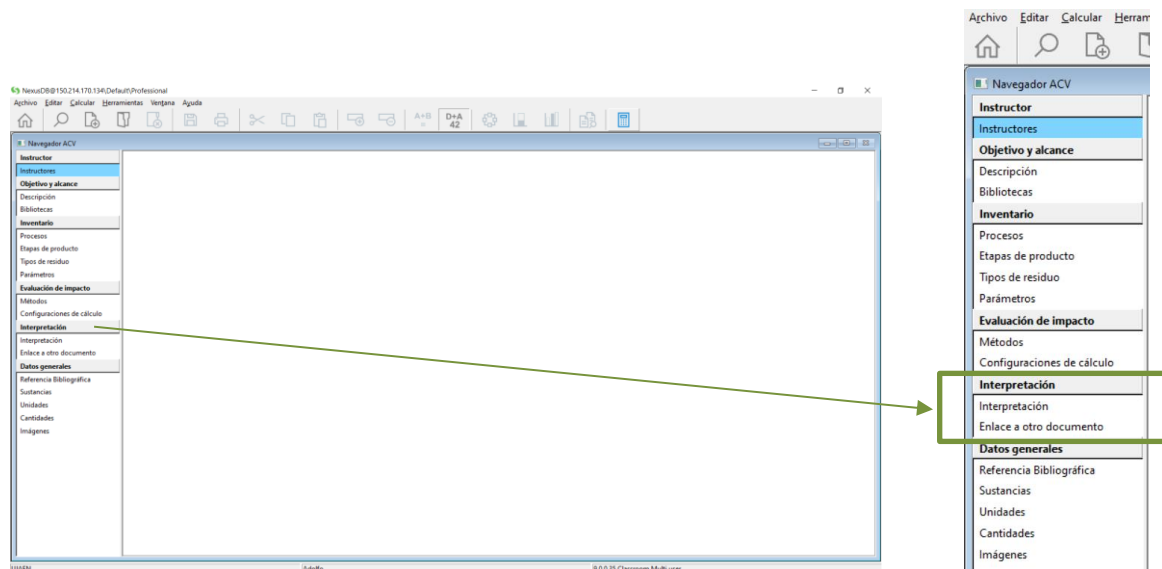


Figura 76. Fase de interpretación de resultados en el software SimaPro.

Se ha demostrado que el uso de ACV para evaluar los materiales de construcción y el proceso de construcción/instalaciones, no es nueva, ni el uso de los costos y el análisis de sensibilidad. Sin embargo la mayoría de estudios de ACV se centran en la evaluación y el uso de indicadores de sostenibilidad. Para el desarrollo constructivo, el ACV representa una metodología innovadora que mejora la sostenibilidad en todas las etapas del ciclo de vida [72].

Además se ha observado que el 90-95% de los casos de estudio de ACV se centraron en la evaluación de los impactos ambientales en la toma de decisiones. Las cargas ambientales identificadas eran con gran potencial de calentamiento atmosférico PCA, acidificación y consumo de energía. Además se evaluaron otros problemas ambientales, como el uso ineficiente de la tierra, la escasez de agua, la contaminación atmosférica, la congestión del tráfico, el deterioro de sistemas ecológicos, el alto consumo de energía y la gestión de los residuos [73].

Sin embargo, el Green Building Challenge Estocolmo declaró que los aspectos como el potencial de calentamiento global (GWP) , el uso del suelo , la acidificación , eutrofización , el agotamiento del ozono

estratosférico, abióticos los recursos y la toxicidad humana son más impactos identificados dentro del sector de la construcción. La principal influencia del cambio en el clima son las emisiones de gases de efecto invernadero, con respecto a la selección de las categorías de impacto, que clasifica las emisiones de efecto invernadero más importantes como es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), los clorofluorocarbonos (CFC), los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), perfluorocarbonos (PFCs). Además se ha visto que el calentamiento global ha aumentado debido al cambio medioambiental por parte de la construcción, incrementado en los periodos en el que se utiliza la calefacción, ventilación y aire acondicionado en los edificios.

Existen estudios sobre el cálculo de la energía en el ciclo de vida de un edificio universitario nuevo, incluyendo modificaciones de modelado e implicaciones de diseño [74]. Se trata de un edificio de la Universidad de Michigan, de 7.300 m<sup>2</sup> (casi el triple de que el edificio objeto), con características distintas, pero las conclusiones nos sirven como referencia para la futura investigación. Tras el ACV de dicho edificio, se cuenta que la Energía Primaria Total (EPT) generada en el edificio se aproxima a 2.3 x 10<sup>6</sup> GJ, o 316 GJ/m<sup>2</sup>, de los cuales:

- Producción de materiales, transporte y construcción: 2.2% consumo EPT
- Calefacción, Ventilación, Refrigeración y electricidad: 94.4% consumo EPT
- Consumos de agua: 3.3% EPT
- Demolición de edificio y transporte de desechos: 0.2% EPT

El edificio objeto de esta investigación está diseñado bajo otros criterios arquitectónicos, y por tanto esto no sirve de precedente sobre futuros resultados, pero sí nos puede servir de comparativa y conocer de antemano que los resultados que debemos obtener deben ser parecidos, es decir, que en la etapa de uso del edificio, es cuando se necesitan los sistemas de climatización, y es la etapa de mayor impacto ambiental.

A priori podemos determinar algunas conclusiones parciales antes de empezar con nuestro estudio:

- En la etapa de producción de materiales y transporte, puede reducirse la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera debido a la reducción del consumo de energía y que dependen directamente de

algunos parámetros, como pueden ser el uso de materiales locales, naturales, reciclables, etc...

- En la etapa de uso, si se prevé un diseño bioclimático que genere muy poca demanda de calefacción y refrigeración, el porcentaje tan alto de demanda energética para la climatización del edificio disminuirá significativamente, y por tanto, no habrá tanta diferencia entre etapas.

- Por otro lado, el consumo de agua durante la fase de construcción, también puede disminuirse con el reciclaje de aguas provenientes de la misma Universidad,

- y además en la etapa de demolición y desechos, pueden ser reutilizados algunos de los materiales reciclados y de esta forma producir menos impacto en el planeta.

## DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

- 5.1. El edificio y sus instalaciones.
  - 5.1.1. Consumo anual de energía.
- 5.2. ACV de un sistema de bomba de calor aire/aire como contribución a una energía renovable.
  - 5.2.1. Objetivo y Alcance.
  - 5.2.2. Análisis de Ciclo de Vida.
  - 5.2.3. Inventario de los equipos.
  - 5.2.4. Evaluación del Impacto Ambiental
  - 5.2.5. Análisis de los resultados
- 5.3. ACV de un sistema de caldera de Pellets como contribución a una energía renovable.
  - 5.3.1. Objetivo y Alcance.
  - 5.3.2. Inventario de los equipos.
  - 5.3.3. Análisis de Ciclo de Vida.
  - 5.3.4. Evaluación del Impacto Ambiental
  - 5.3.5. Análisis de los resultados
- 5.4. ACV Comparativo de una bomba de calor aire/aire y una caldera de Pellets aplicados a un edificio terciario.
  - 5.4.1. Objetivo y Alcance.
  - 5.4.2. Metodología ACV aplicada a los sistemas.
  - 5.4.3. Resultados y conclusión.

### 5.1. El edificio y sus Instalaciones

Sin perder de vista cuál es el objetivo principal del presente trabajo, hemos visto la situación energética global, autonómica y local, así como el problema que se plantea sobre los impactos ambientales que se producen por la actividad humana y concretamente por el sector de la construcción y la industria.

Mediante este estudio específico en la sostenibilidad tecnológica actual, y con utilización de la metodología de ACV como herramienta de evaluación del impacto ambiental, hemos ido acercándonos al estudio específico de los sistemas utilizados en un edificio de uso terciario de la Universidad de Jaén.

Este estudio nos permitirá obtener, de forma general, la información necesaria para la toma de decisiones en el ámbito del diseño de los sistemas de producción energética, y que van a marcar aquellas soluciones que sean alternativas reales a las menos sostenibles, siempre teniendo como principal indicador los impactos ambientales y climáticos que generan estos sistemas.

La hipótesis del trabajo sostiene que estos sistemas que son considerados como renovables, en modo calor, o que utilizan fuentes de combustibles "verdes", son los que teóricamente menos impactos ambientales generan si los comparamos con otros, que cubren las mismas demandas energéticas. Pero será la Metodología de Ciclo de Vida, la que nos permita determinar cualitativa y cuantitativamente, que materiales, procesos, o sistemas son los que producen estos impactos.

Para desarrollar el trabajo, se han utilizado los sistemas de producción de energía de un edificio de uso terciario, concretamente un edificio destinado a uso docente, al que se le realiza un cálculo mediante programas de certificación energética en una primera fase, y posteriormente se ha procedido a introducir al Análisis del Ciclo de Vida de dichas instalaciones, mediante una evaluación con la herramienta de cálculo SimaPro.

En líneas generales, los factores que afectan a los consumos energéticos de un edificio durante su uso son:

- El factor de la forma y la orientación del edificio sobre las cargas de calefacción y de refrigeración.
- El papel de la envolvente del edificio y la luz solar, la ganancia de energía del sol y la ventilación natural.
- La eficiencia energética de los equipos de climatización, iluminación y la producción de agua caliente sanitaria.
- El papel de los ocupantes en la estrategia de operación para el control climático del edificio.

Y por lo tanto, vamos a realizar un estudio en profundidad de la sostenibilidad de dos sistemas de generación de energía considerado según la DIRECTIVA (UE) 2018/2001 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de

11 de diciembre de relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y que considera como renovables la bomba de calor en modo calor y la caldera de biomasa por el uso de material vegetal. Las instalaciones suponen el principal aspecto dentro de la eficiencia energética en la etapa de uso del edificio.

### 5.1.1 Consumo anual de energía

Para el cálculo del consumo anual de energía se han considerado los siguientes límites: la temperatura de funcionamiento seleccionada para el interior de los edificios terciarios es de 22 ° C invierno y de 24 ° C en verano, considerando la normativa española sobre diseño de máquinas térmicas. El horario de trabajo (aulas de docencia), es de 09.00 h a 20.00 h (11 horas). No consideramos consumo eléctrico en el periodo no lectivo, debido a que su uso es mínimo. El cálculo de los días lectivos viene desarrollado de la siguiente manera: 2 cuatrimestres de 22 días/mes, con lo que obtenemos un uso de 176 días/año. Por lo que el total de horas de trabajo del sistema es de  $2 \times 4 \times 22 \times 11 = 1.936$  horas/año. Considerando una expectativa de vida de la bomba de calor de 10 años, obtenemos un total de 19.360 horas. Por lo tanto el consumo de energía en este periodo, sería de 115.772,80 kWh, o lo que es lo mismo 0,4167 TJ. En la figura 77, podemos analizar la estacionalidad significativa en el consumo, debido a la actividad a la que está destinado el edificio, edificio terciario con uso docente. [80-82].

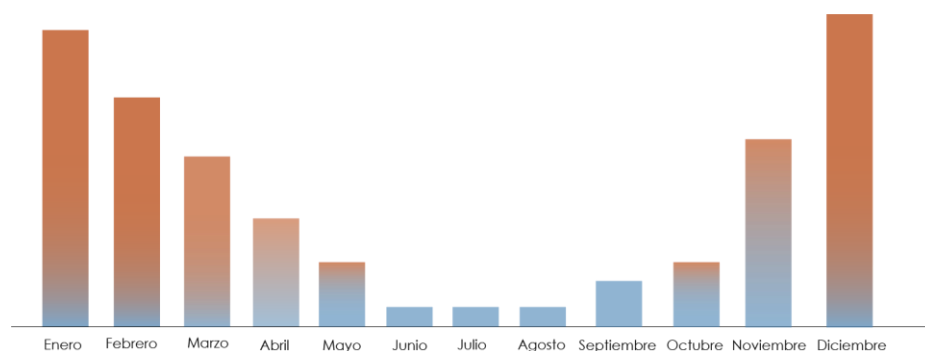


Figura 77. Consumo de energía anual del edificio. Fuente: elaboración propia.

## 5.2. ACV de un sistema de bomba de calor aire/aire como contribución a una energía renovable.

### 5.2.1. Objetivo y Alcance.

Nuestro principal objetivo es la aplicación de un Análisis de Ciclo de Vida a un Sistema de Bomba de Calor situado en un edificio terciario, basándonos en el conjunto de normas ISO 14040, y para ello usamos la metodología EPS 2000. Esto nos permitirá, en un futuro, tener conocimiento de los impactos que producen otras alternativas, y poder tener otro criterio más, además del económico o de mantenimiento, a la hora de la elección de un determinado sistema de producción de energía. En la tabla 78, se describen las características del equipo necesario para la realización del ACV, de esta manera la unidad funcional será:

"Sistema de bomba de calor formado por una maquina exterior y una interior, modelos Mitsubishi FDCA1360HKXE4 y Mitsubishi Heavy mod. FDT36KX, respectivamente, para cubrir la demanda de calor de cuatro aulas de 93,30 m<sup>2</sup> de superficie total y situadas en un edificio terciario de la Universidad de Jaén".

### Equipo Interior.

| Modelo                                      |                  |                   | FDC280KXZE1   | FDC335KXZE1 |
|---|------------------|-------------------|---|-------------|
| Alimentación eléctrica a la ud. Exterior    |                  |                   | III - 380 V . 50 Hz   |             |
| Capacidad nominal                           |                  |                   | 10  | 12          |
| Capacidad                                   | Frio             | HP                | 28  | 33,5        |
|   |                  | kcal/h            | 24.200  | 28.810      |
|   | Calor            | kW                | 31,5  | 37,5        |
|   |                  | kcal/h            | 27.100  | 32.250      |
| Consumo eléctrico total                     | Frio             | kW                | 7,24  | 8,96        |
|   | Calor            | kW                | 7,28  | 9,04        |
| Intensidad nominal                          | Frio             | A                 | 11,90   | 14,60       |
|   | Calor            | A                 | 12,00   | 14,80       |
| Intensidad máxima de arranque               |                  | A                 | 5   |             |
| EER   |                  |                   | 3,87  | 3,74        |
| COP   |                  |                   | 4,33  | 4,15        |
| Nivel sonoro                                |                  | dB (A)            | 55  | 61          |
| Dimensiones (alto x ancho x fondo)          |                  | mm                | 1.690 x 1.350 x 720   |             |
| Peso  |                  | kg                | 272   |             |
| Caudal de Aire (estándar)                   |                  | m <sup>3</sup> /h | 13.200  | 16.800      |
| Presión estática                            |                  | Pa                | 50  |             |
| Control del refrigerante                    |                  |                   | Válvula expansión electrónica                                 |             |
| Tipo de compresor y cantidad                |                  |                   | SCROLL multi-descarga x 1                                     |             |
| Motor del compresor                         |                  | kW/ud             | 4,76 x 1  | 5,94 x 1    |
| Motor del ventilador                        |                  | W x ud.           | 386 x 2   |             |
| Aceite refrigerante                         |                  | l                 | 2,25 (M - MA32R)  |             |
| Refrigerante                                |                  |                   | R 410 A   |             |
| Cantidad de refrigerante                    |                  | kg                | 11  |             |
| Tipo de ventilador y cantidad               |                  |                   | Ventiladores axiales x 2                                      |             |
| Método de conexión tubería refrigerante     |                  |                   | Conexión gas soldada - Conexión líquido abocardada            |             |
| Drenaje                                     |                  |                   | Orificios de drenaje ( Ø 20 mm x 10 uds.) ( Ø 45 mm x 3 uds.) |             |
| Aislamiento para la tubería de refrigerante |                  |                   | Necesaria para línea de líquido y gas                         |             |
| Tubería de refrigerante                     | Línea de Líquido | Pulgadas          | 3/8"  | 1/2"        |
|   | Línea de Gas     | Pulgadas          | 7/8"  | 1" (7/8")   |
| Unidades interiores conectadas              |                  |                   | 1 a 24  | 1 a 29      |
| Rango de Capacidad Conectable               |                  |                   | kW  | 14 - 36,4   |
|   |                  |                   | %   | 50-130      |

**Notas:**

(1) Los datos están tomados en las siguientes condiciones (ISO-T1). Refrigeración: temperatura interior de 27° CDB, 19° CWB y temperatura exterior de 35° CDB. Calefacción: temperatura interior de 20° CDB y temperatura exterior de 7° CDB, 6° CWB. Longitud de tubería 7,5 m.

(2) Nivel de presión sonora medido en una habitación anecoica. Durante la operación estos valores pueden variar debido a las condiciones ambientales.

## Equipo Exterior

| Serie                               |         |                   | FDTC   |            |            |            |            |            |
|-------------------------------------|---------|-------------------|--|------------|------------|------------|------------|------------|
| Modelo                              |         |                   | FDTC15KXE6 **  | FDTC22KXE6 | FDTC28KXE6 | FDTC36KXE6 | FDTC45KXE6 | FDTC56KXE6 |
| Capacidad                           | Frío    | kW                | 1,5  | 2,2        | 2,8        | 3,6        | 4,5        | 5,6        |
|                                     |         | Kcal/h            | 1.290  | 1.900      | 2.450      | 3.150      | 3.900      | 4.850      |
|                                     | Calor   | kW                | 1,7  | 2,5        | 3,2        | 4          | 5          | 6,3        |
|                                     |         | Kcal/h            | 1.462  | 2.200      | 2.800      | 3.500      | 4.300      | 5.450      |
| Fuente de alimentación              |         |                   | I - 220 V. 50 Hz   |            |            |            |            |            |
| Consumo eléctrico total frío /calor |         | W                 | 20   | 30         | 30         | 30         | 50         | 50         |
| Nivel sonoro (Velocidad baja)*      |         | dB (A)            | 25   | 30         | 30         | 31         | 31         | 31         |
| Dimensiones (alto x ancho x fondo)  | Unidad  | mm                | 248 x 570 x 570  |            |            |            |            |            |
|                                     | Panel   |                   | 35 x 700 x 700   |            |            |            |            |            |
| Peso (Unidad/Panel)                 |         | Kg                | 14 / 3,5   | 14/3,5     | 14/3,5     | 15/3,5     | 15/3,5     | 15/3,5     |
| Control del refrigerante            |         |                   | Válvula de expansión electrónica   |            |            |            |            |            |
| Caudal de Aire                      |         | m <sup>3</sup> /h | 480  | 570        | 570        | 600        | 660        | 780        |
| Toma de aire fresco                 |         |                   | Opcional con KIT   |            |            |            |            |            |
| Filtro de Aire y Cantidad           |         |                   | Filtro de larga vida x 1 (lavable)   |            |            |            |            |            |
| Control opcional                    |         |                   | Control por cable táctil RC-EX3, Control por cable RCH-E3, RC-E5 o inalámbrico RCN-TC-24W-E2 |            |            |            |            |            |
| Ø Tuberías de refrigerante          | Líquido | Pulgadas          | 1/4"   |            |            |            |            |            |
|                                     | Gas     |                   | 3/8"   |            |            | 1/2"       |            |            |
| Accesorios                          |         |                   | Kit de montaje, manguera de drenaje  |            |            |            |            |            |

Datos tomados según condiciones ISO-T1

\* Nivel presión sonora en una habitación anecoica. Durante la operación estos valores pueden variar.

\*\* (Solo compatible con KXZ 2 TUBOS 224-1360 Kw)

Figura 78. Especificaciones técnicas del equipo exterior e interior de la bomba de calor. Fuente: Catálogo técnico del fabricante.

Completada la fase del inventario e incluyendo en dicho inventario todos los materiales y la energía consumida durante las horas de funcionamiento para las máquinas, continuaremos con la introducción al programa elegido para evaluarlo, abriendo camino para la futura investigación de la Tesis Doctoral del Análisis del Ciclo de Vida completo.

### 5.2.2. Análisis de Ciclo de Vida.

Este punto de la metodología de ACV, consiste en determinar las principales entradas y salidas de materiales y energía que se producen en el objeto o sistema a estudiar.

Para entender de una manera sencilla el ciclo de vida de la bomba de calor, hemos realizado el siguiente diagrama representativo, tal y como se observa en la Figura 79. En él se desglosan los flujos de materiales y la energía que habitualmente se necesitan para este tipo de sistemas. Los datos para la realización del inventario fueron obtenidos de los catálogos correspondientes a cada máquina, y adaptados a las unidades y características de la base de datos utilizada. Así mismo, para el cálculo de distancias para el transporte de los aparatos ya fabricados, se ha considerado que la fábrica se encuentra en Sevilla, tal y como nos indica el fabricante de los sistemas, y que para su montaje en el edificio, se ha

utilizado un camión completo hasta el almacén de la empresa instaladora. Posteriormente, la distribución se ha realizado mediante furgoneta hasta el edificio donde se realiza la instalación.

De la misma forma, al introducir los datos en el programa informático, se han considerado los elementos y procesos que nos aportan más información medioambiental. Otro punto a considerar es, que al final de la vida útil del sistema, se produce un desmontaje y reutilización de algunos elementos, siendo esta fase, opcional según diversos factores. Se ha considerado la recogida y recuperación del refrigerante y el aceite mineral, proceso obligatorio por la normativa española.

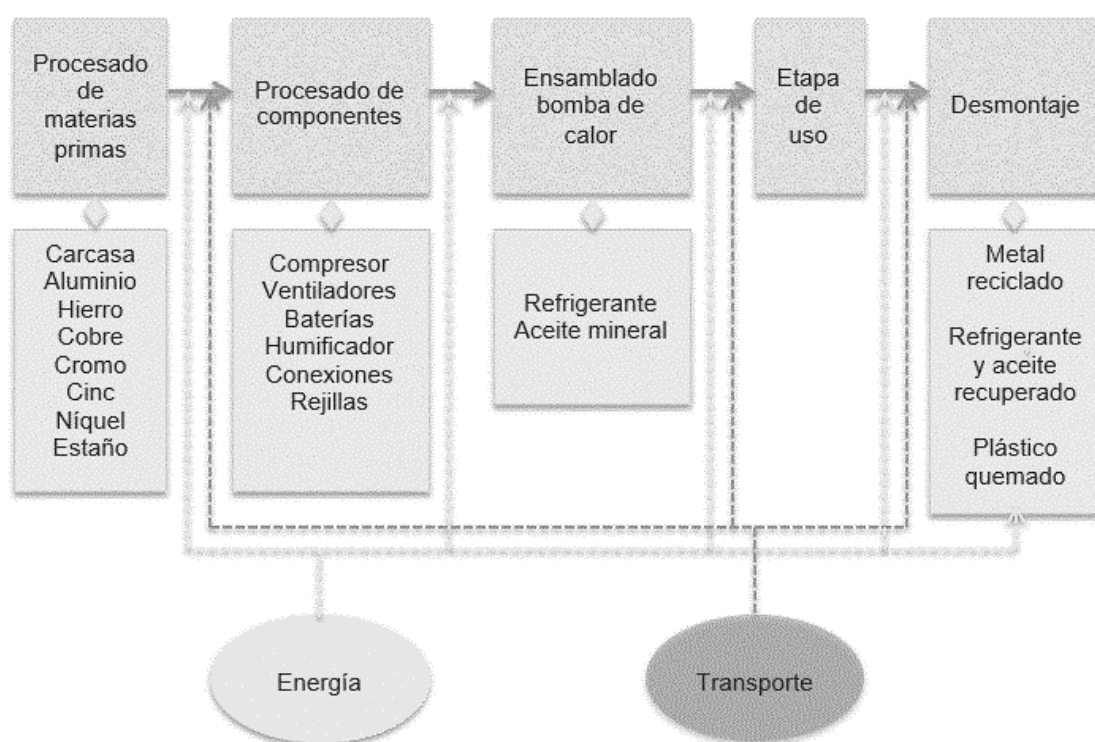


Figura 79. Diagrama de los procesos en la bomba de calor. Fuente: Elaboración propia.

Para nuestro estudio los componentes analizados son los siguientes;

- Máquina exterior: Ud Bomba de calor modelo Mitsubishi FDCA 224HKXE4 de 22,4 Kw de potencia y situada en cubierta.
- Máquina interior: Ud tipo interior techo, modelo Mitsubishi Heavy FDT36KX de 3,60 Kw de potencia y situada en el seminario de la planta 1ª del edificio.

### 5.2.3. Inventario de los equipos.

Esta fase comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para identificar y cuantificar todos los efectos ambientales de los materiales asociados a la unidad funcional.

Estos efectos ambientales serán la “carga ambiental”, que se definirá como la salida o entrada de materia o energía del sistema causando un efecto ambiental negativo. Consultando la memoria constructiva del edificio en cuestión, se realiza la comprobación de todos los materiales del sistema hasta conseguir la unidad de medida que permita la medición real de los elementos que han sido instalados en el propio edificio. Se ha realizado un inventario, ver figura 80, de todos los materiales que conforman el sistema de producción de energía, descartando los que afectan a la parte constructiva y arquitectónica.

| INVENTARIO                          |               |              |              |               |
|-------------------------------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| CONCEPTO                            | EXTERIOR      | INTERIOR     | CONEXIONES   | TOTAL         |
| MATERIAS PRIMAS (kg)                | FDCA224HKXE4  | FDT36KX      | 4 ud         | 1 ext + 4 int |
| Carcasa (plástico)                  | 86,89         |              |              | 86,89         |
| Hierro                              | 78,07         | 35           |              | 112,93        |
| Aluminio                            | 40,17         | 38           |              | 77,95         |
| Cobre                               | 17,11         | 9            | 16,35        | 42,79         |
| Níquel                              | 3,48          |              |              | 3,48          |
| Plomo                               | 3,48          |              |              | 3,49          |
| Cromo                               | 2,89          |              |              | 2,89          |
| Polietileno                         | 5,82          | 6            |              | 11,36         |
| Cinc                                | 1,11          |              |              | 1,46          |
| Estaño                              | 0,02          |              |              | 0,04          |
| PVC                                 | 0,09          |              |              | 0,19          |
| Goma                                | 0,82          |              |              | 0,82          |
| <b>Total</b>                        | <b>240,00</b> | <b>88,00</b> | <b>16,35</b> | <b>344,36</b> |
| <b>ENERGIA</b>                      |               |              |              | <b>MJ</b>     |
| Petróleo (Caldera, 1 MW)            | 1.538,81      | 618,57       | 154,64       | 2.312,03      |
| Gas natural industrial (>100 kW)    | 1.538,81      | 618,57       | 154,64       | 2.312,03      |
| Electricidad de Medio Voltaje       | 112,83        | 45,36        | 11,34        | 169,54        |
| <b>TRANSPORTE</b>                   |               |              |              | <b>tKm*</b>   |
| Camión (40 t)                       | 23,91         | 8,80         | 1,63         | 34,35         |
| Furgoneta (<3,5 t)                  | 55,01         | 20,24        | 3,76         | 79,010        |
| Tren                                | 47,83         | 17,60        | 2,61         | 68,05         |
| <b>BASURA (incinerador público)</b> |               |              |              | <b>KG</b>     |
| Polipropileno                       | 5,82          | 5,53         |              | 11,36         |
| PVC (Policloruro de vinilo)         | 0,09          | 0,09         |              | 0,19          |
| Goma                                | 0,82          | 0,00         |              | 0,82          |
| <b>EMISIONES A LA ATMÓSFERA</b>     |               |              |              | <b>MJ</b>     |
| Calor residual                      | 112,84        | 45,36        | 21,12        | 179,32        |

tKm\*. Esta unidad es el transporte de 1 tonelada de material en 1 Km. Para el cálculo del transporte, se ha considerado la fábrica en Sevilla.

Figura 80. Inventario de la bomba de calor. Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.4. Evaluación del Impacto Ambiental.

Con los datos anteriormente aportados, realizamos una evaluación de los impactos medioambientales que el sistema de bomba de calor provoca. Para ello utilizaremos el software SimaPro, en el que dentro de las distintas bases de datos disponibles, utilizaremos la EPS 2000

(Environmental Priority Strategies) [76]. Esta metodología evalúa los daños provocados en cuatro categorías de impacto, cuyas características describimos en la figura 81:

| CATEGORIA DE IMPACTO   | INDICADOR DE CATEGORIA | UNIDADES       |
|------------------------|------------------------|----------------|
| Calidad del ecosistema | FDP*                   | FDP x m2 x año |
| Salud humana           | DALY**                 | Persona x año  |
| Recursos naturales     | Daño a los recursos    | MJ/kg          |
| Recursos abióticos***  | Agotamiento            | kg             |

- \* Fracción de desaparición potencial del ecosistema por m<sup>2</sup> y año.  
 \*\* Disability-Adjusted life Years: Reducción de los años de vida por persona/año.  
 \*\*\* Recursos climáticos, geológicos y geográficos. (Biodiversidad)

Figura 81. Indicadores de los impactos.

### 5.2.5. Análisis de los resultados

Una vez introducidos los datos del inventario, el programa nos facilita los resultados que se muestran en la figura 82, donde podemos analizar los porcentajes de contribución que aportan las diferentes partes del sistema de bomba de calor a cada categoría de impacto.

Estos datos nos han sido facilitados por el programa, a partir del cálculo del consumo de energía anual que produce el sistema a lo largo de la vida útil estimada del sistema.

| Recursos no energéticos |           | Recursos energéticos     |          |
|-------------------------|-----------|--------------------------|----------|
| Barita (kg)             | 30,95     | Madera (kg)              | 17,56    |
| Bauxita (kg)            | 251,49    | Energía del agua (MJ)    | 88,36    |
| Calcita (kg)            | 17,38     | Lignita (kg)             | 3,32     |
| Cr (kg)                 | 5,74      | Gas Natural (MJ)         | 446,25   |
| Mn (g)                  | 6,19      | Petróleo (kg)            | 12,29    |
| Ni (g)                  | 8,27      | Uranio (kg)              | 8,6006   |
| Zinc (kg)               | 309,14    |                          |          |
| Sn (g)                  | 2,23      |                          |          |
| Emisiones al agua       |           | Emisiones a la atmósfera |          |
| Sulfatos (kg)           | 122,91    | CO <sub>2</sub> (kg)     | 106,93   |
| NH <sub>3</sub> (kg)    | 13,17     | SO <sub>x</sub> (kg)     | 10,09    |
| Grasas y aceites (kg)   | 0,3003    | CH <sub>4</sub> (kg)     | 10,75    |
| Al (g)                  | 83,62     | CFC (g)                  | 5,011    |
| Ba (g)                  | 193,33    | Partículas (kg)          | 391,65   |
| Pb (g)                  | 714,11    | Cd (kg)                  | 1,44     |
| Ca (g)                  | 5,058     | Pb (kg)                  | 189,40   |
| Cr(III) (kg)            | 1,070     | Otros metales (kg)       | 44,54    |
| K (mg)                  | 593,91    | Calor residual (MJ)      | 2.344,04 |
| Na (kg)                 | 19,64     |                          |          |
| Calor residual (MJ)     | 56.468,59 |                          |          |

Figura 82. Análisis de ciclo de vida de la bomba de calor usando TJ como unidad de referencia. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos del software.

De las gráficas obtenidas, podemos analizar los impactos que producen cada parte del sistema de bomba de calor, que vienen recogidos en la Figura 83 siguiente:

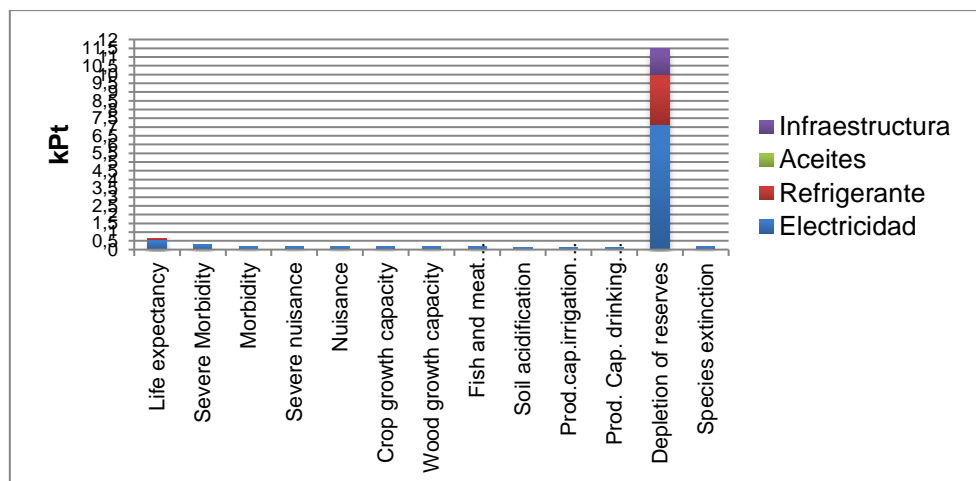


Figura 83. Indicadores de impacto de la bomba de calor según EPS 2000. Fuente: SimaPro.

En esta gráfica podemos observar como el impacto más importante se produce sobre el agotamiento de los recursos, motivado por la generación de la electricidad necesaria para la fabricación y uso del sistema. Seguidos a estos impactos se encuentran el impacto del refrigerante y de la infraestructura, sobre el agotamiento de los recursos.

Haciendo un estudio en función de las categorías, la metodología EPS 2000 nos marca que durante la fabricación y uso de la bomba de calor, el agotamiento de recursos es el 65% del total de la contribución. Así mismo, es también importante el impacto sobre la expectativa de vida (Salud humana), que viene a ser el 28%, generada principalmente por las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la etapa de generación de electricidad, mientras que el porcentaje restante 7% corresponde con el impacto sobre los ecosistemas.

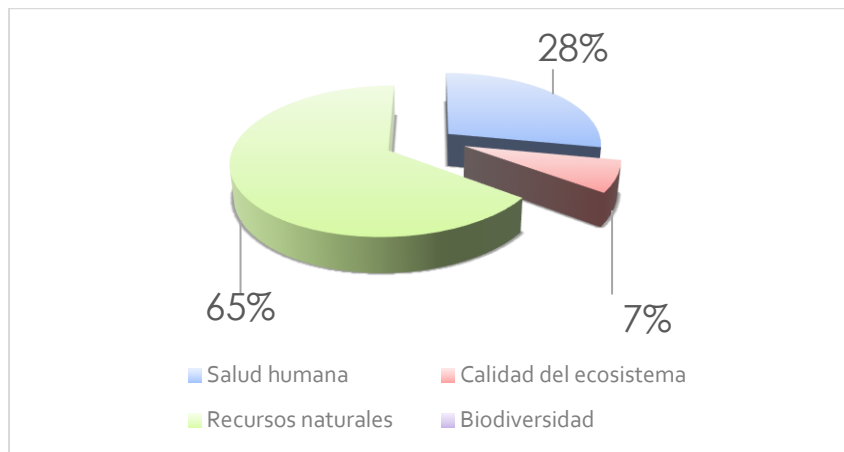


Figura 84. Importancia del daño según la categoría de impacto. Fuente: elaboración propia a partir de los datos obtenidos.

### 5.3. ACV de un sistema de caldera de Pellets como contribución a una energía renovable.

#### 5.3.1. Objetivo y Alcance.

De acuerdo a este criterio, nuestro principal objetivo es la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida a un Sistema de Caldera de Pellets situado en un edificio terciario, usando para ello la metodología EPS 2000.

#### 5.3.2. Análisis de Ciclo de Vida.

Para entender de una manera sencilla el ciclo de vida de la caldera de Biomasa, hemos realizado el siguiente diagrama representativo, tal y como se observa en la Figura 85. En él se pueden observar los flujos de materiales y energía que habitualmente se necesitan para este tipo de sistemas. Los datos para la realización del inventario fueron obtenidos de los catálogos correspondientes de la empresa fabricante, y adaptados a las unidades y características de la base de datos utilizada. Así mismo, para el cálculo de distancias para el transporte de los aparatos ya fabricados, el fabricante indica en sus datos técnicos que la fábrica se encuentra en Errezil (Guipúzcoa) España, y que han sido transportados mediante camión por carretera hasta el almacén del instalador, con una carga del 100 % de su capacidad y que para su montaje en el edificio, la distribución se ha realizado mediante furgoneta, con una carga del 80 % de la capacidad del vehículo. [77-79].

Como se puede ver en la figura 85, se han descrito aquellos ciclos de materiales, energía y transporte, más significativos de la caldera, despreciando los de menor tamaño e importancia, por no aportar información significativa al estudio. De la misma forma en la figura 86 se describen los ciclos más significativos del ciclo de vida del pellets.

Al introducir los datos en el programa informático, se han considerado los elementos y procesos que nos aportan más información medioambiental. Otro punto a considerar es, que al final de la vida útil del sistema, se produce un desmontaje manual y reutilización de algunos elementos, siendo esta fase, opcional según diversos factores. El resto de los residuos son depositados en vertederos autorizados.

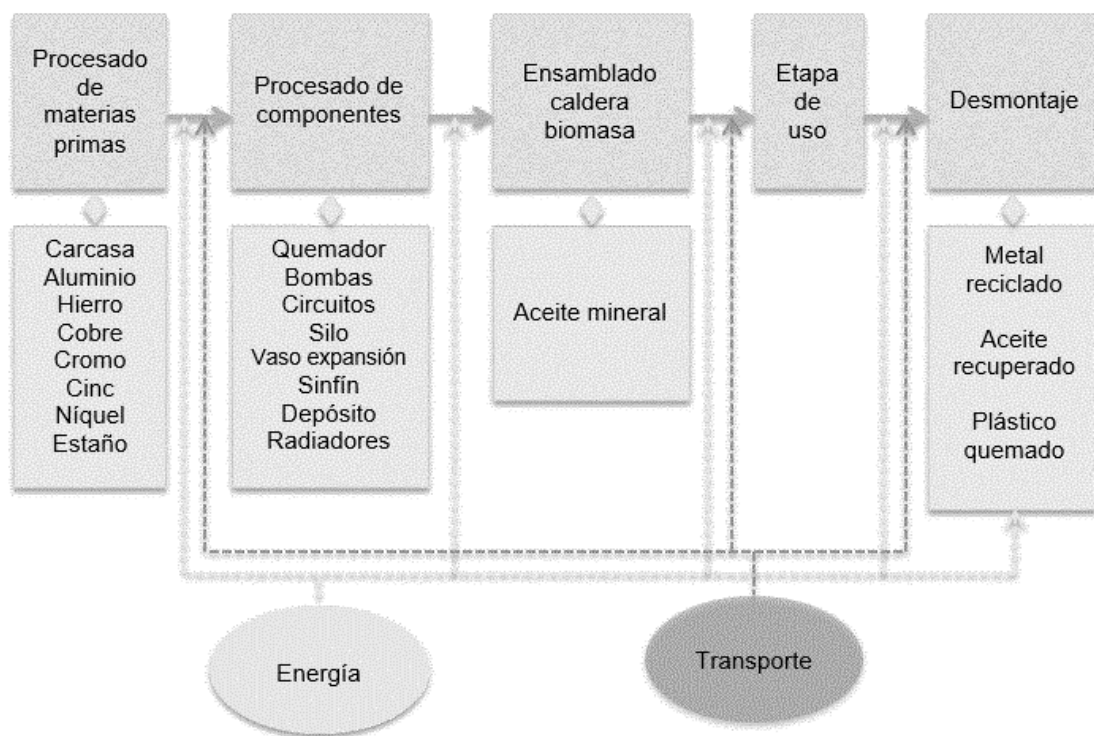


Figura 85. Ciclo de vida de la caldera. Fuente: elaboración propia.

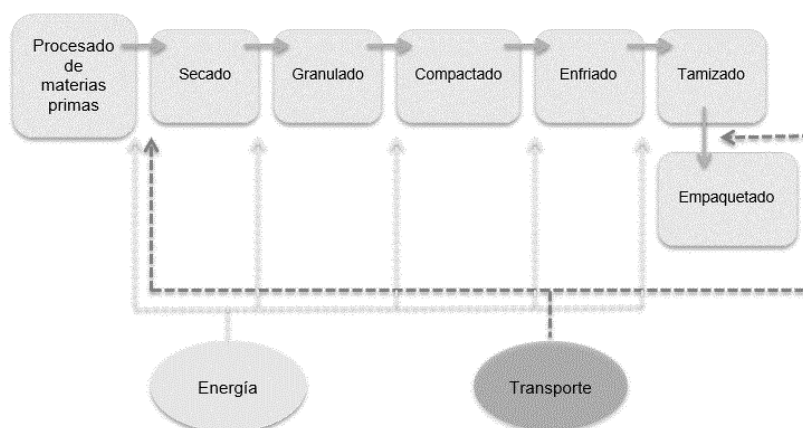


Figura 86. Ciclo de vida del Pellets. Esquema adaptado. Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos podemos definir la unidad funcional, que nos servirá de base para el estudio posterior de ACV del sistema:

“Sistema de caldera de biomasa marca DOMUSA modelo BioClass HM, alimentada por pellets, compuesta por un cuerpo principal, donde se encuentra el quemador, el vaso de expansión, la bomba de recirculación, un acumulador para el agua caliente y un silo de almacenaje del combustible, de acuerdo con los requerimientos térmicos demandados para cubrir la demanda de calor de cuatro aulas de 93,90 m<sup>2</sup> de superficie total y situadas en un edificio terciario de la Universidad de Jaén”.

### 5.3.3. Inventario de los equipos.

Las especificaciones técnicas de estas componentes son las que se muestran en la Tabla 87.

| Modelo                          | BioClass HM |
|---------------------------------|-------------|
| Potencia útil                   | Kw 91,4     |
| Potencia nominal                | Kw 25,3     |
| Rendimiento                     | % 95        |
| Potencia carga parcial          | Kw 6,9      |
| Potencia eléctrica              | W 485       |
| Temperatura retorno mínima      | °C 25       |
| Tiro mínimo de chimenea         | Pa 10       |
| Tiro máximo de chimenea         | Pa 20       |
| Volumen de cámara de agua       | L 73        |
| Combustible al 100%             | Kg 5        |
| Capacidad de combustible pellet | Kg 180      |
| Peso                            | Kg 300      |

Figura 87. Especificaciones técnicas de la caldera de biomasa. Fuente: Catálogo del fabricante.

A continuación describimos las partes y los materiales más significativos de las que se compone el sistema estudiado, expresando las cantidades de cada elemento y la totalidad del conjunto, como podemos observar en la Tabla 88.

| INVENTARIO                       |                     |                  |          |
|----------------------------------|---------------------|------------------|----------|
| CONCEPTO                         | CALDERA+ ACUMULADOR | SILLO            | TOTAL    |
| MATERIAS PRIMAS (kg)             | BIOCLASS NG 25      | Tipo S           |          |
| Dimensiones                      | 670 x 670 x 1310    | 405 x 685 x 1525 |          |
| Hierro                           | 147,40              | 66,93            | 214,28   |
| Aluminio                         | 72,88               | 5,39             | 78,28    |
| Cobre                            | 30,8                | 16,12            | 46,93    |
| Níquel                           | 17,88               |                  | 17,88    |
| Cromo                            | 10,24               |                  | 10,24    |
| Polietileno                      | 8,43                | 2,1              | 10,53    |
| Cinc                             | 5,65                |                  | 5,65     |
| Estaño                           | 3,44                | 3,68             | 7,12     |
| Plomo                            | 1,47                |                  | 1,47     |
| PVC                              | 0,99                |                  | 0,99     |
| Goma                             | 0,87                | 0,43             | 1,30     |
| Total                            | 300                 | 94,67            | 394,67   |
| ENERGIA                          |                     |                  | MJ       |
| Petróleo (Caldera, 1 MW)         | 2.145,35            | 830,52           | 2.975,87 |
| Gas natural industrial (>100 kW) | 1.850,07            | 875,55           | 2.725,62 |
| Electricidad de Medio Voltaje    | 242,20              | 55,98            | 298,18   |
| TRANSPORTE                       |                     |                  | tKm*     |
| Camión (40 t)                    | 25,90               | 2,35             | 28,25    |
| Furgoneta (<3,5 t)               | 32,75               | 3,10             | 35,85    |
| Tren                             |                     |                  |          |
| BASURA (incinerador público)     |                     |                  | KG       |
| Polipropileno                    | 7,64                | 1,92             | 9,56     |
| PVC (Policloruro de vinilo)      | 0,12                |                  | 0,12     |
| Goma                             | 0,65                | 0,21             | 0,86     |
| EMISIONES A LA ATMÓSFERA         |                     |                  | MJ       |
| Calor residual                   | 224,15              | 87,90            | 312,05   |

tKm\*. Esta unidad es el transporte de 1 tonelada de material en 1 Km  
Para el cálculo del transporte, se ha considerado la fábrica en Guipúzcoa. España

Figura 88: Inventario de la caldera de Pellets. Fuente: elaboración propia a partir de los datos obtenidos.

Estos datos han sido obtenidos de la información aportada por el fabricante, mediante la estimación del consumo durante su ciclo de vida y de las bases de datos del programa informático SimaPro. De ésta forma obtenemos todos los datos necesarios que nos harán falta para la posterior introducción en el software de cálculo.

### 5.3.4. Evaluación del Impacto Ambiental

Con los datos anteriormente aportados, realizamos una evaluación de los impactos medioambientales que el sistema de bomba de calor provoca. Para ello utilizaremos el software SimaPro, en el que dentro de las distintas bases de datos disponibles, utilizaremos la EPS 2000 (Environmental Priority Strategies) (Steen B. 1999a, 1999b). Esta metodología evalúa los daños provocados en cuatro categorías de impacto, cuyas características describimos en la tabla 89.

| CATEGORIA DE IMPACTO   | INDICADOR DE CATEGORIA | UNIDADES       |
|------------------------|------------------------|----------------|
| Calidad del ecosistema | FDP*                   | FDP x m2 x año |
| Salud humana           | DALY**                 | Persona x año  |
| Recursos naturales     | Daño a los recursos    | MJ/kg          |
| Recursos abióticos***  | Agotamiento            | kg             |

- \* Fracción de desaparición potencial del ecosistema por m<sup>2</sup> y año.  
 \*\* Disability-Adjusted life Years: Reducción de los años de vida por persona/año.  
 \*\*\* Recursos climáticos, geológicos y geográficos. (Biodiversidad)

Figura 89. Indicadores de los impactos. Fuente: ISO 14040.

### 5.3.5. Análisis de los resultados

Una vez introducidos los datos del inventario, el programa nos facilita los resultados que se muestran en la tabla 90, donde podemos analizar los porcentajes de contribución que aportan las diferentes partes del sistema de caldera de pellets a cada categoría de impacto. Estos datos nos han sido facilitados por el programa, a partir del cálculo del consumo de energía anual que produce el sistema a lo largo de la vida útil estimada del sistema.

| Recursos no energéticos |          | Recursos energéticos     |          |
|-------------------------|----------|--------------------------|----------|
| Barita (g)              | 32,6     | Madera (g)               | 3,90     |
| Bauxita (kg)            | 109,0    | Energía del agua (MJ)    | 1,19     |
| Calcita (g)             | 0,94     | Lignita (kg)             | 12,7     |
| Cr (g)                  | 166      | Gas Natural (MJ)         | 45,10    |
| Mn (g)                  | 0,78     | Petróleo (kg)            | 33,50    |
| Ni (kg)                 | 1,78     | Uranio (g)               | 0,0925   |
| Zinc (g)                | 0,68     |                          |          |
| Sn (mg)                 | 7,32     |                          |          |
| Emisiones al agua       |          | Emisiones a la atmósfera |          |
| Sulfatos (mg)           | 625      | CO <sub>2</sub> (kg)     | 67,93    |
| NH <sub>3</sub> (kg)    | 27,01    | SO <sub>x</sub> (kg)     | 23,40    |
| Grasas y aceites (kg)   | 0,0405   | CH <sub>4</sub> (kg)     | 9,44     |
| Al (g)                  | 5,25     | CFC (g)                  | 3,90     |
| Ba (mg)                 | 360      | Partículas (kg)          | 544,13   |
| Pb (mg)                 | 16,3     | Cd (kg)                  | 1,54     |
| Ca (g)                  | 0,000703 | Pb (kg)                  | 290      |
| Cr(VI) (kg)             | 2,28     | Otros metales (kg)       | 12,80    |
| K (mg)                  | 1,31     | Calor residual (MJ)      | 1.220,06 |
| Na (kg)                 | 3,72     |                          |          |
| Calor residual (MJ)     | 2.360,76 |                          |          |

Figura 90. Análisis de ciclo de vida de la caldera usando TJ como unidad de referencia. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados obtenidos.

De las gráficas obtenidas, podemos analizar los impactos que producen cada parte del sistema de caldera de pellets, que vienen recogidos en la Figura 91 siguiente:

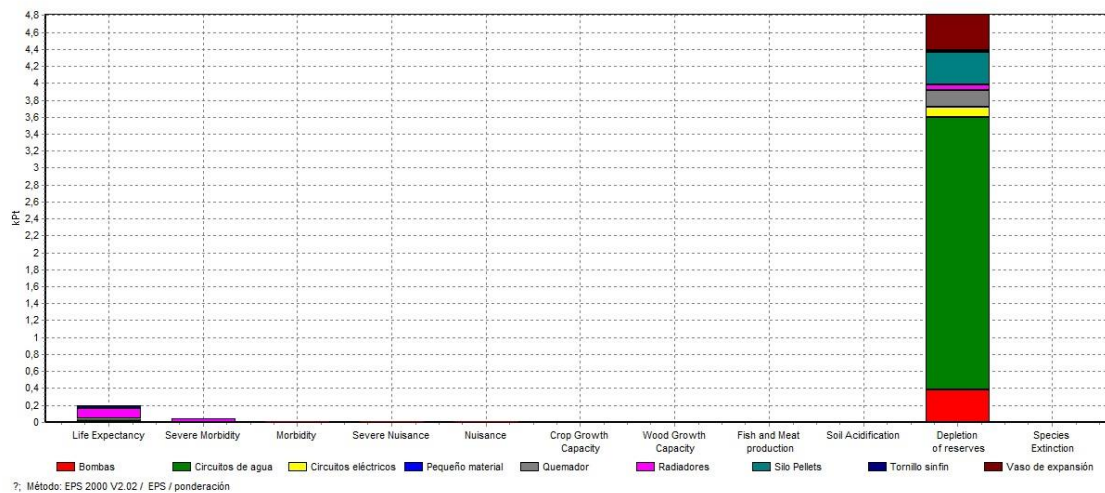


Figura 91. Indicadores de impacto de la caldera de Pellets según EPS 2000. Fuente: SimaPro.

En esta gráfica podemos observar como el impacto más importante se produce sobre el agotamiento de los recursos, motivado por la fabricación de los elementos de cobre que conforman el sistema de la caldera, tanto en los elementos emisores como en los elementos que conforman el circuito de distribución. Del mismo modo otros elementos del sistema también influyen en menor medida en el agotamiento de los recursos.

Haciendo un estudio en función de las categorías, la metodología EPS 2000 nos marca que durante la fabricación de la caldera de pellets, el agotamiento de recursos es el 94% del total de la contribución. Así mismo, es también significativo el impacto sobre la expectativa de vida (Salud humana), que vienen a ser el 4% generadas principalmente por las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la etapa de generación de electricidad para la fabricación, mientras que el porcentaje restante 2% corresponde con el impacto sobre los ecosistemas.

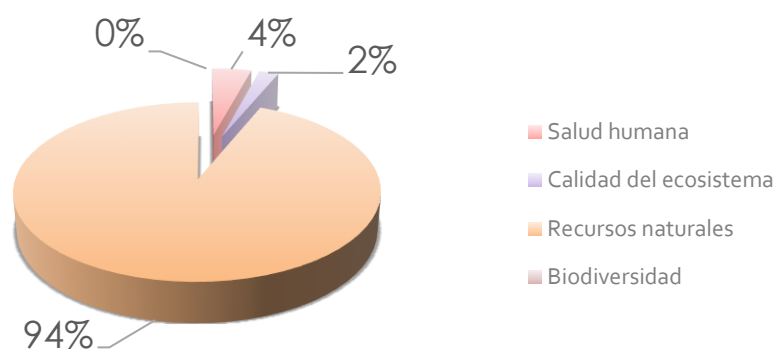


Figura 92. Importancia del daño según la categoría de impacto. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4. ACV Comparativo de una bomba de calor aire/aire y una caldera de Pellets aplicada a un edificio terciario.

### 5.4.1 Objetivo y alcance

Como continuación a los dos estudios anteriores, el presente apartado trata sobre el estudio comparativo de los impactos ambientales provocados por una bomba de calor aire-aire y una caldera de biomasa, ambas considerados sistemas de energía renovable.

El sistema de bomba de calor se encuentra instalado en un edificio terciario de la Universidad de Jaén y la caldera de biomasa ha sido simulada en las mismas condiciones que el anterior sistema. Para ello se ha utilizado el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como metodología que estudia los impactos ambientales que provocan los productos, procesos o sistemas. Para completar la comparativa, se han usado dos metodologías, la Eco-Indicador99, que se enfoca en determinar los impactos a la salud humana y la EPS 2000, que se enfoca principalmente en los impactos debidos a la energía y la disminución de los recursos no energéticos. También han sido consideradas en el estudio las emisiones producidas por los procesos durante la extracción de los materiales, la fabricación, el funcionamiento y la fase de fin de vida de los dos sistemas.

De forma general podemos indicar que los principales impactos de los sistemas analizados, son debidos al agotamiento de los recursos y a los provocados por el refrigerante, que han sido aportados por la metodología EPS2000, y en la esperanza de vida, los problemas respiratorios debido a los efectos de las sustancias inorgánicas, la carcinogénesis, y el cambio climático, aportados por la metodología Eco-Indicador99.

Por consiguiente, los resultados que se muestran en las figuras 91 y 92 revelan mejores resultados para la bomba de calor, en comparación a la caldera de pellets, en algunos aspectos, mientras que ocurre lo contrario en otros aspectos. Otros factores como la rentabilidad económica de los sistemas, la facilidad de instalación y/o el mantenimiento de los sistemas pueden añadir otros datos al presente estudio, sobre todo para la toma de decisiones en la elección de un sistema u otro.

De acuerdo con la norma ISO 14040, el ACV se define como la recopilación y evaluación de las entradas y salidas para determinar los posibles impactos ambientales de un producto, proceso o sistema durante su ciclo de vida. Así, la ACV es una herramienta para el análisis de la carga ambiental de los productos en todas las fases de su ciclo de vida, desde la extracción de recursos, la producción de materiales, piezas, y el producto en sí mismo, hasta la utilización de dicho producto y la gestión de los residuos después de que se haya descartado, ya sea mediante la reutilización, reciclado o disposición final.

La intensa actividad industrial y los procesos de fabricación requieren un alto consumo de energía e influyen de manera significativa en las emisiones de gases

de efecto invernadero (GHG), lo cual tiene efectos negativos en la preservación de los recursos y el medio ambiente, debido a su contribución al calentamiento global. Estos impactos incluyen las emisiones de gases de efecto invernadero, como son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el principal gas contaminante generado en el mundo, y otros gases como el metano, el óxido nitroso y los clorofluorocarbonos que puede ser medidos en unidades de  $\text{CO}_2$  equivalente ( $\text{CO}_2\text{-eq}$ ).

Según lo anterior, el primer objetivo de este trabajo fue determinar los impactos de los dos sistemas mediante la metodología de ACV y para ello fueron utilizadas dos metodologías, la Eco-indicador99 y la EPS2000, que nos aportaría información sobre la cantidad e importancia de las emisiones de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera de los sistemas estudiados. Del análisis de los resultados, realizados en los puntos 5.2.5 y 5.3.5 podemos determinar que los impactos ambientales que fueron más determinantes, se produjeron durante la fabricación y el funcionamiento de los sistemas. De tal modo que la información que nos facilita el ACV y determinar en qué fase del proceso productivo, ayuda a las empresas a centrar sus políticas de inversión y a reducir los impactos al medio ambiente.

#### **5.4.2. Metodología ACV aplicada a los sistemas.**

Uno de los puntos principales de la metodología ACV consiste en un inventario de los principales insumos y productos. (Ver puntos 5.2.2. y 5.3.2.). Para lograr este objetivo, se han utilizado distintas fuentes entre las que se encuentran el catálogo del fabricante, información consultada en la bibliografía y las bases de datos ambientales del programa SimaPro. Además se han consultado las siguientes bases de datos ELCD, EU & DK Input Output Database, Industry data 2.0 y Methods. Estas bases de datos ofrecen una cantidad significativa de datos relativos al consumo de recursos y emisiones durante la fabricación. Se han considerado las materias primas más importantes que están involucradas en los procesos del ciclo de vida.

Análisis de inventario de la bomba de calor. La distancia entre el centro de procesamiento de las piezas de la bomba de calor y el lugar donde la bomba de calor va a trabajar también es importante, en nuestro caso la central de distribución se encuentra en Sevilla. Se consideran que todos los metales presentes en la nueva bomba de calor pueden ser totalmente reciclados, y los plásticos podrían incinerarse.

Análisis de inventario de la caldera de biomasa. Estos datos han sido obtenidos de la información aportada por el fabricante, mediante la estimación del

consumo durante su ciclo de vida y de las bases de datos del programa informático SimaPro. De ésta forma obtenemos todos los datos necesarios que nos harán falta para la posterior introducción en el software de cálculo. El centro de fabricación y distribución de la caldera se ha considerado en Ezerril (Guipúzcoa, España).

Análisis de impacto ambiental. El objetivo de esta sección es determinar todos los posibles impactos ambientales relacionados con los parámetros obtenidos en la sección anterior. Este estudio se llevará a cabo de acuerdo con las estrategias prioritarias de las dos metodologías siguientes, la Eco-indicador99 y a la EPS 2000 y a la siguiente secuencia de tareas: clasificación, caracterización (los indicadores son seleccionados de acuerdo a cada categoría del impacto), normalización y valorización.

**Metodología Eco-Indicador99.** *Clasificación y caracterización.* (Figura 93). Los daños a la salud humana se expresan en DALY, utilizando las estimaciones del número de años de vida perdidos. Los daños a la calidad del ecosistema se expresan en relación a las especies que han desaparecido en una determinada zona y período, principalmente plantas vasculares y organismos simples. En los daños al ecosistema se introducen las siguientes categorías de impacto: la Ecotoxicidad, la acidificación y la eutrofización y la ocupación de la tierra.

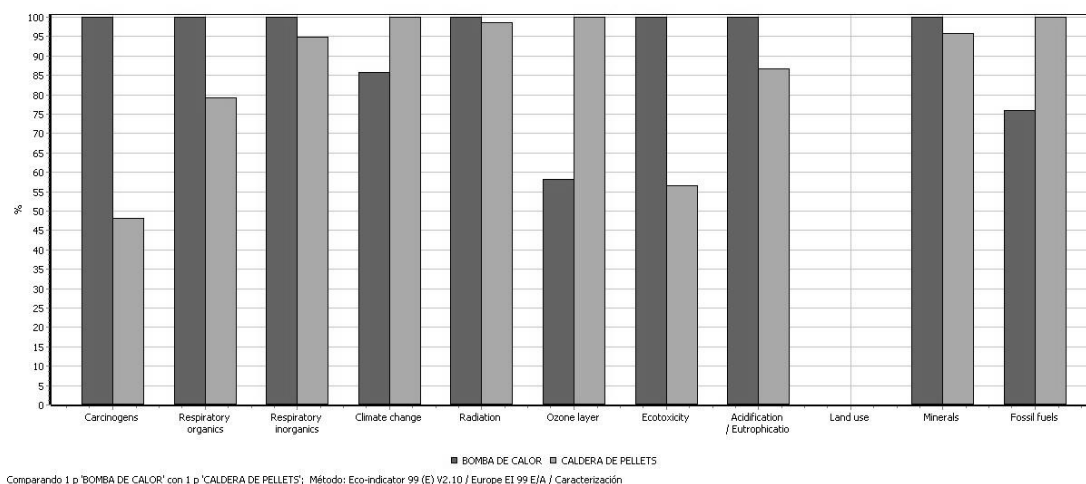


Figura 93. Comparativo de Indicadores de impacto según la metodología Eco-indicador99. Fuente: SimaPro.

De los valores obtenidos, y que se resumen en la figura 94, podemos observar que los mayores impactos sobre el cambio climático, la reducción de la capa de ozono y sobre los recursos fósiles se producen en el sistema de caldera, mientras que los impactos relativos a la salud humana y sobre los ecosistemas son mayores en el sistema de bomba de calor.

*Ponderación con Eco-Indicador99.* Las tres categorías, salud humana, calidad de los ecosistemas y agotamiento de los recursos de daños tienen diferentes

unidades. El cálculo de los valores de normalización se basa en los datos de las emisiones medidas en varios países europeos, y luego hacer una extrapolación a escala europea para estimar el total de emisiones europeas por año y habitante. Figura 94.

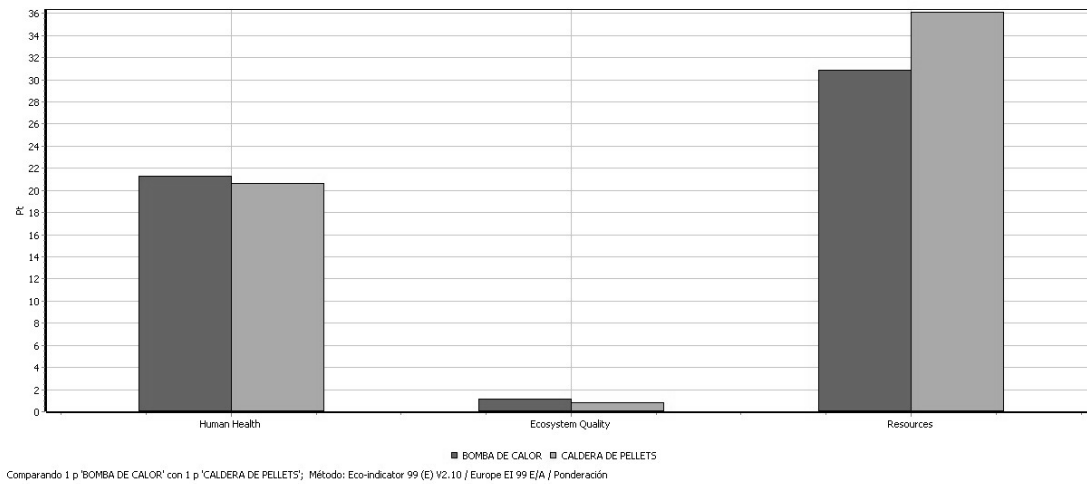


Figura 94. Ponderación comparativa entre los dos sistemas (Eco-indicador99). Fuente: SimaPro.

*Puntuación única con Eco-Indicador99.* En este paso, se determina la importancia relativa de cada categoría de impacto. Utilizamos la unidad llamada Eco-punto indicador (Pt). Cabe destacar que el valor absoluto no es muy relevante, ya que el objetivo principal es comparar las diferencias relativas entre los productos o componentes. Figura 95.

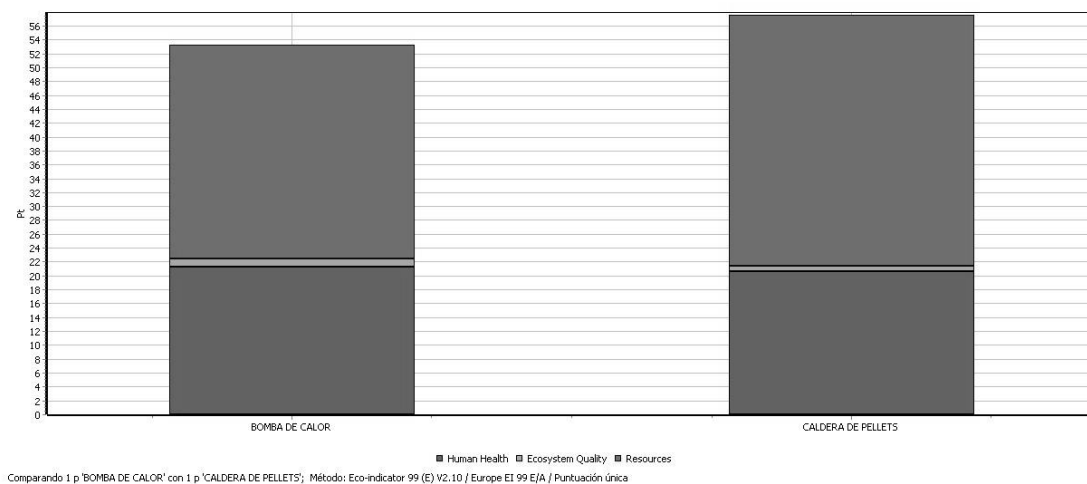


Figura 95. Comparativa utilizando el Eco-punto indicador (Pt). Fuente: SimaPro.

La figura 96 resume los valores obtenidos para los sistemas y el % de los productos que mayor impacto ambiental provocan, obtenidos a través de la puntuación única.

| Categoría del daño                             | Medidas (Pt) Bomba | Medidas (Pt) Caldera | % de los mayores impactos ambientales   |
|--|--------------------|----------------------|---|
| Sustancias Inorgánicas (efectos respiratorios) | 60,91              | 63,94                | Emisiones al aire<br>NO <sub>x</sub> (45,23%), SO <sub>x</sub> (42,56%), Partículas <10um (12,21%)                        |
| Combustibles                                   | 66,93              | 50,76                | Minería<br>Petróleo (60,55%), Gas natural (23,54%), Carbón (15,91%)   |
| Carcinogénesis                                 | 30,99              | 64,42                | Emisiones al agua<br>As (12,78%), Ni (3,45%), Fenol (2,34%)<br>Emisiones al aire<br>As (44,55%), Ni (26,65%), Cd (10,23%) |
| Cambio climático                               | 27,05              | 23,20                | Emisiones al aire<br>CO <sub>2</sub> (78.56%), CH <sub>4</sub> (12.55%), HCFC-22 (8.89 %)                                 |

Figura 96. Valores más significativos de impacto (Eco-indicador99). Fuente: elaboración propia.

**Metodología EPS 2000.** Esta metodología tiene como estrategias ambientales prioritarias para el diseño de productos y fue desarrollada en 1989 por el Instituto de Investigación Ambiental de Suecia en cooperación con Volvo y la Federación de industrias suecas. Desde entonces, ha sido modificada varias veces, ofreciendo una metodología más eficaz y extensa. La última versión del método EPS evalúa el impacto sobre el medio ambiente a través de sus efectos sobre uno o varios temas de salud humana. Se identifican las categorías de impacto a partir de los siguientes temas: la capacidad de producción del ecosistema (incluyendo información relativa al cultivo, el pescado o la carne, y la reducción del rendimiento de la madera), la protección de la salud humana (incluyendo enfermedades humanas), los recursos naturales y el stock de recursos abióticos, con el costo ambiental, los recursos y la biodiversidad (incluida la extinción de especies).

En la figura 97, podemos observar como obtenemos unos resultados de impactos ambientales muy similares entre los dos sistemas, y nos aparecen unos valores negativos por la naturaleza renovable de los sistemas y el combustible utilizado como generación de calor. Obtenemos por lo tanto información relativa a trece indicadores ambientales.

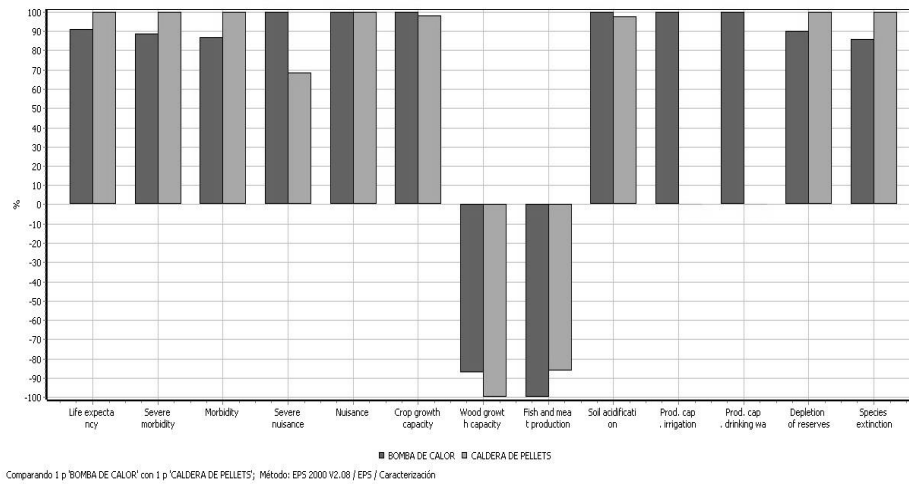


Figura 97. Contribución comparativa con la metodología EPS2000. Fuente: SimaPro.

*Ponderación con EPS 2000.* Para las cuatro categorías que considera esta metodología, calidad el ecosistema, salud humana, recursos naturales y agotamiento de los recursos podemos obtener la información necesaria en la figura 98. En este método, la ponderación se realiza a través de la valoración. La referencia ambiental es el estado actual del medio ambiente, siendo la unidad indicadora el ELU (unidad de carga ambiental). Esta metodología nos permite el estudio anticipado de los sistemas para obtener un mejor diseño y una información adicional ante la elección de los sistemas.

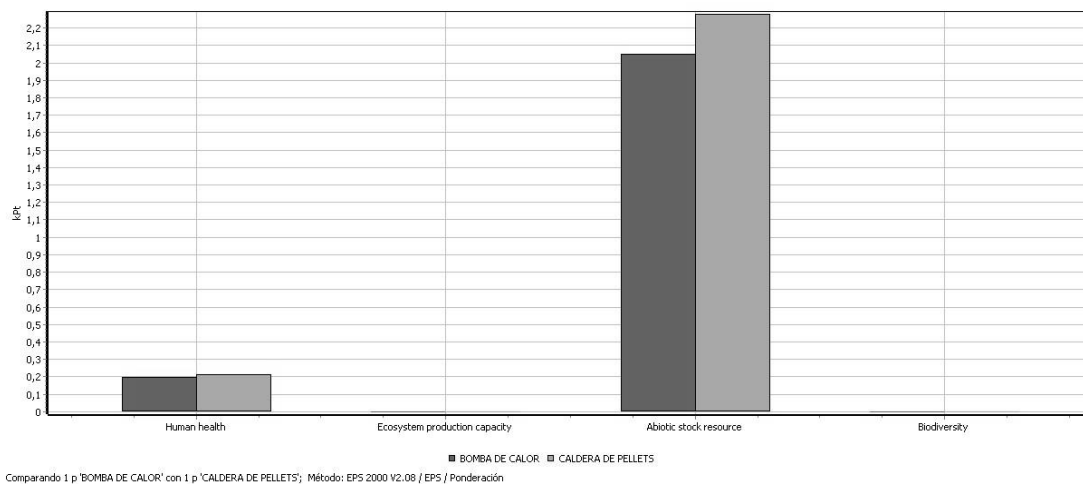


Figura 98. Ponderación con la metodología EPS2000. Fuente: SimaPro.

La figura 99 nos indica que el mayor impacto se produce en la reducción de los recursos abióticos y corresponde al sistema de caldera de biomasa. La otra categoría de impacto importante sería la de la salud humana, siendo prácticamente despreciables los impactos en la calidad de los ecosistemas y en la biodiversidad.

*Puntuación única con EPS 2000.* En este paso, se determina la importancia relativa de cada categoría de impacto. Utilizamos la unidad llamada Eco-punto indicador (kPt). (Ver figura 99). Cabe destacar que el valor absoluto de los puntos no es muy relevante, ya que el objetivo principal es comparar las diferencias relativas entre los productos o componentes.

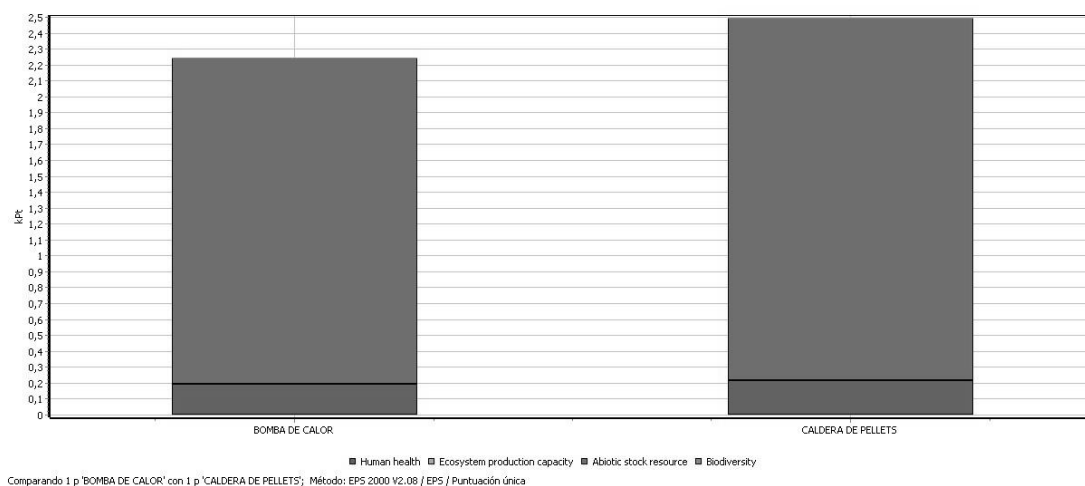


Figura 99. Puntuación con la metodología EPS2000. Fuente: SimaPro.

La tabla 100 muestra los valores mayores para la metodología, así como los productos que producen dichos impactos.

| Categoría del daño          | Medidas (kPt) Bomba | Medidas (kPt) Caldera | % de los mayores impactos ambientales  |
|-----------------------------|---------------------|-----------------------|--|
| Salud humana                | 0,195               | 0,215                 | Emisiones al aire<br>CO <sub>2</sub> (60,15 %), PAH Polycyclic aromatic hydrocarbons (66,5%) |
| Agotamiento de los recursos | 2,05                | 2,28                  | Minería<br>Petróleo (62,55%), Carbón (22,98%), Gas natural (14,47%)                          |

Figura 100. Valores más significativos de impactos ambientales (EPS2000). Fuente: Elaboración propia.

### 5.4.3 Resultados y Discusión

Una vez obtenidos los resultados sobre el impacto ambiental de dos sistemas de producción de calor y realizando el estudio mediante dos metodologías, podemos analizar y determinar las conclusiones más significativas. Para simplificar los resultados, las contribuciones a los indicadores de impacto ambiental, los valores han sido agrupados en cuatro grupos. El análisis realizado incluyó las distintas etapas de la vida de cada uno de los constituyentes de la bomba de calor y de la caldera, pero hay que tener en cuenta que la variación

de las condiciones de uso de los mismos, así como la duración de la vida útil puede cambiar los resultados.

Como punto en común a los resultados obtenidos mediante las dos metodologías, podemos determinar que, de acuerdo con la Figura 89, se puede constatar que el consumo energético en forma de electricidad es el factor más relevante para la ACV de la bomba de calor, siendo menor el impacto en la caldera de biomasa, debido al uso de pellets como material de combustión. Por otro lado, las emisiones al aire que se producen por parte del sistema de caldera son bastante más significativas que las de la bomba de calor.

El Eco-indicador<sup>99</sup> indica que el consumo de recursos fósiles son el 41,92 % para la caldera de biomasa y un 34,34 para la bomba de calor, y son el principal factor de impacto, que se incrementa hasta un 58,3% con el consumo de minerales, los efectos respiratorios provocados por las emisiones al aire de sustancias inorgánicas como el SO<sub>x</sub> y los NO<sub>x</sub>, junto con el cambio climático debido a las emisiones de CO<sub>2</sub>, que presenta unos valores mayores para el sistema de caldera de biomasa con un valor del 23,6%. Y por último con valores menores la carcinogénesis, con un 5,10%, debido a las emisiones de metales pesados en el aire y el agua. La calidad de los ecosistemas es afectado principalmente por la Ecotoxicidad (4%), la acidificación y la eutrofización (1,8%) y la ocupación del suelo (0,2%). Los daños provocados por la Ecotoxicidad son debidos principalmente a las emisiones de metales pesados en el aire y el agua, mientras que los daños por acidificación y eutrofización son causados principalmente por las emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>.

Otro factor negativo del sistema de bomba de calor son los minerales de cobre (presentes principalmente en las baterías y conducciones) y que representa el elemento con mayor peso, así como el impacto sobre la reducción de la capa de ozono, que se ha reducido con respecto a otros estudios, con un 22% de las contribuciones, debido al uso del refrigerante R410A.

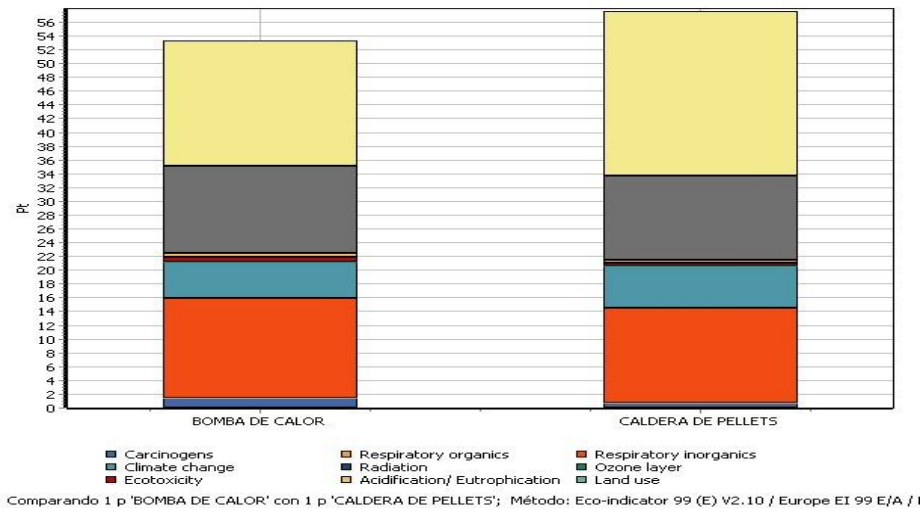


Figura 101. Importancia relativa de los sistemas con la Eco-indicator99. Fuente: SimaPro

EPS2000. Atendiendo a las figura 101, se puede constatar que los resultados son bastantes similares para los dos sistemas. Destacando el consumo energético, el uso del refrigerante, la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y el uso de recursos abióticos para la fabricación de los mismos, como aspectos de mayor impacto.

Según esta metodología, y unificando los valores similares para los dos sistemas, el daño principal se produce con el agotamiento de los recursos durante la fabricación y el funcionamiento de los mismos, alcanzando el 72% de la contribución total. La esperanza de vida supone el 6,22%, principalmente afectado por las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la generación de electricidad, mientras que la morbilidad severa representa sólo el 3% del total.

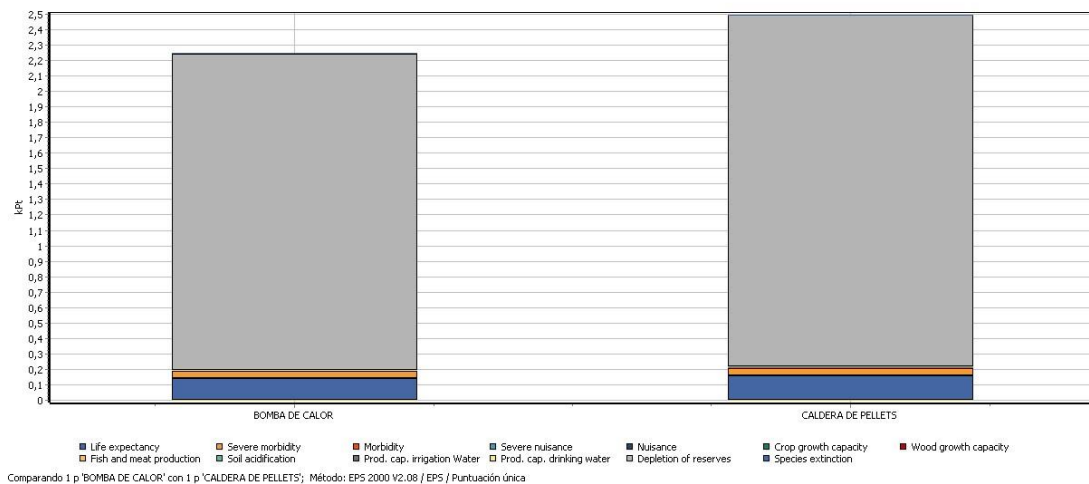


Figura 102. Importancia relativa de los sistemas con la EPS2000. Fuente: SimaPro.

De forma general podemos indicar que los dos sistemas tienen parecidos impactos ambientales, y son significativamente distintos en aspectos puntuales como el uso de material, producto o combustible, como por ejemplo, el

refrigerante, los aceites o el pellets. Atendiendo a los porcentajes de mayor valor, podemos afirmar que la caldera de pellets provoca mayor impacto durante la fabricación, debido a las grandes cantidades de materiales y de energía para la fabricación de sus componentes, así como para la extracción de los recursos necesarios.

## CONCLUSIONES GENERALES

### 6.1. Conclusiones generales

#### 6.2. Conclusiones parciales

Conclusiones parciales tras el ACV de un sistema de bomba de calor

Conclusiones parciales tras el ACV de un sistema de caldera de biomasa.

Conclusiones parciales tras el ACV comparativo entre un sistema de bomba de calor y un sistema de caldera de biomasa.

La presente tesis desarrolla el estudio de un edificio terciario de la Universidad de Jaén, que se ha dividido en dos partes fundamentales. La primera que desarrolla el estudio energético a través de varios programas existentes reconocidos, y la segunda que desarrolla el aspecto ambiental (sostenibilidad), mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida.

La realización de la segunda parte, de una forma detallada, ha supuesto una tarea laboriosa, debido a que no existen bases de datos específicas de los sistemas estudiados, por lo que se ha tenido que realizar una aproximación justificada en algunos puntos.

El presente trabajo termina con unas conclusiones sobre todo lo escrito anteriormente, en referencia a los estudios desarrollados en materia de sostenibilidad aplicando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, y sobre la valoración energética del edificio objeto, con las propuestas de mejora. Además propongo una reflexión a la llamada *SOSTENIBILIDAD*.

### **6.1. Conclusiones generales.**

Hay que indicar que se han usado, para la certificación energética, los programas reconocidos para edificios de nueva construcción, con los límites y consideraciones que puede ocasionar al estudiar un edificio terciario existente. El edificio se encuentra en buenas condiciones de conservación, por lo que los resultados son aceptados.

El edificio cumple al compararlo con el edificio de referencia, pero esto no quiere decir, que no se puedan hacer mejoras técnicas viables que permitan un mejor resultado de la certificación energética.

Las mejoras que se proponen son:

1. Incremento del aislamiento en las envolventes y cubierta del edificio.
2. Sustitución de las ventanas y acristalamiento de las mismas.

Con referencia a la segunda parte de la tesis, nos encontramos con la realización del estudio de varios sistemas de producción de energía y que nos marcan los impactos ambientales que provocan estos sistemas a lo largo de su vida útil.

Tenemos que tener en cuenta que los resultados obtenidos variarán si se realiza el mismo estudio al mismo sistema instalado en otro edificio. Esto es debido a que los elementos, transportes, materiales necesarios para su instalación, duración de su vida útil y mantenimiento, así como su régimen de instalación varían en sus condiciones. Esto provoca que sea necesario la realización de estudio ACV para cada uno de los sistemas que se propongan.

Aunque el mayor peso de la preocupación ambiental recae sobre la energía, no debe olvidarse que los límites del planeta en cuestión de materiales son mucho más estrictos que los energéticos. En el futuro, la escasez de recursos para todos los procesos liderados por la termodinámica puede aflorar con más fuerza que la que han manifestado hasta ahora los límites energéticos. Realmente, estamos en "stock" limitados, hablando de recursos materiales en la tierra frente al flujo continuo cargado de energía que proviene diariamente del sol.

El edificio se encuentra en un espacio amplio, con posibilidad de aprovechar el recurso solar y ventilación. Las fachadas no deben ser iguales en todas las orientaciones, sino adecuarse a cada orientación para optimizar la captación solar y permitir corrientes y ventilaciones. Además, es importante incluir parasoles que frenen la radiación solar en verano y la permitan en invierno, calculándolo con la trayectoria solar.

Se trata de diseñar construcciones que utilicen materiales menos impactantes, que se fabriquen mediante producción limpia, que incorporen mejoras ambientales en la distribución y que reduzcan los impactos que producen durante el uso y al final de su vida útil. Siguiendo esta línea, algunos autores han desarrollado conjuntos de estrategias que definen las características que deben tener las edificaciones para el logro de una mayor sostenibilidad y Ecoeficiencia [83]. Poner las referencias del tema.

Estas estrategias están enfocadas a crear un desarrollo sostenible:

- a) Reducción del consumo de recursos. (Reducir el consumo de materiales por m<sup>2</sup> de construcción).
- Recursos no renovables
  - Recursos renovable (Racionalizar y Reciclar)
- b) Reducción del consumo energético. Eficiencia y racionalidad energética.
- Sistemas pasivos
  - Energías alternativas
  - Buenas prácticas de diseño y construcción
- c) Reducción de la contaminación y peligros para la salud.
- Reducir emisiones en el ciclo de vida de los materiales
  - Evitar materiales tóxicos (como asbesto, plomo, etc.)
- d) Construir bien desde el inicio.
- Diseñar y construir para una larga vida útil (Calidad, durabilidad, mantenimiento, desarrollo progresivo)
  - Mejorar las prácticas constructivas (del sector formal y del sector informal)
- e) "Cero Desperdicio" Reducción y gestión de residuos de construcción y demolición (RCD).
- Reducción de residuos
    - Prevención (Desde el proyecto, y en las obras)
    - Valorización (Reutilización y reciclaje)
    - Eliminación (Vertido e incineración)
  - Gestión de Residuos
    - Caracterización (identificación, cuantificación, origen)
    - Acciones operativas en la construcción (clasificación, reciclaje, reutilización, deconstrucción)
    - Seguimiento de normativa
    - Programa de formación y educación ambiental
- f) Investigación y desarrollo

g) Producción local y flexible

- Plantas de pequeña escala
- Manufactura flexible
- Recursos y demanda locales

La eficiencia y racionalidad energética es una estrategia de ahorro energético que se debe incluir en cada proceso de desarrollo.

Reemplazar los procesos ineficientes, evaluando la posibilidad de sustituir unos combustibles por otros menos “perjudiciales” o más “limpios”, incluso el uso de residuos y desechos de materiales. El reciclaje de materiales, o reducir la masa o volumen de materiales por área construida, incrementando los de bajo consumo, son procesos que reducen el consumo de energía. La producción local a pequeña escala y el uso de los recursos locales, son factores clave sobre el consumo energético de las construcciones.

Existen en la actualidad un borrador de la Estrategia española de economía circular, que marcan la dirección a seguir y que recogen muchos de los aspectos vistos anteriormente. Se encuentra en fase de revisión y aprobación, y en este sentido es importante comentar que es necesaria la incorporación de acciones que complementen y mejoren este borrador.

El trabajo debe venir por el concepto de transversalidad, y referirse a las diferentes escalas que conforman la arquitectura: edificio, ciudad y territorio. Es necesaria una transformación urbana hacia modelos que marcan la economía circular. La renovación y regeneración urbana de la ciudad existente es hacia donde debería destinarse los esfuerzos del sector de la construcción.

Se demuestra la importancia que tiene la **etapa de diseño** del proyecto para el análisis y determinación de los niveles de sostenibilidad del edificio, basándonos en la metodología del ACV, que es una metodología con mayor alcance respecto a otras metodologías de impacto ambiental.

Clara la importancia fundamental que tiene el diseño bioclimático en el edificio para el ahorro energético, y de ahí la importancia de cualquier técnica constructiva que facilite ese diseño. El uso de la madera como material sostenible ofrece una mejora en la eficiencia energética sin aumento del coste de fabricación, no como el uso de “materiales verdes” que requieren altas energías de fabricación y lo que más ofrecen es aumentos en la eficiencia, pero considero que eso no es camino hacia la

disminución de impacto en el medio ambiente. Además, la mejora en la eficiencia de los sistemas energéticos, obtenida sin el menor esfuerzo en el diseño geométrico no ayuda a que estandarice el diseño bioclimático.

## **6.1. Conclusiones parciales**

Capítulo 01. (Introducción y justificación). La tendencia al alza del consumo de energía en el sector industrial, residencial y terciario en España, es una tendencia de los países más desarrollados. Esto nos marca la búsqueda de unos objetivos que se van a ir ratificando con los resultados obtenidos en los capítulos siguientes de esta tesis. La reconversión del sistema productivo hacia modelos cíclicos y el uso de las energías renovables.

Capítulo 02. (Estado del arte y de la investigación). Los edificios públicos son los que tienen una mayor demanda energética. La eficiencia energética, el reciclado de los materiales, el uso de nuevos materiales y la realización de estudios de Análisis de Ciclo de Vida, son acciones a desarrollar para la sostenibilidad.

Capítulo 03. (Planteamiento del problema). Para reducir el gasto energético y de los impactos ambientales en los edificios públicos, la realización de ACV de los sistemas de producción de energía instalados son esenciales.

Capítulo 04. (Metodología general de análisis de ciclo de vida). Los Análisis de Ciclo de Vida son la herramienta más idónea para la reducción de los impactos ambientales, ya que determinan de forma cuantitativa y cualitativa dichos impactos en los sistemas analizados. Esto permite la planificación de acciones a favor de la sostenibilidad.

Capítulo 05. (Desarrollo de la investigación).

### **Conclusiones parciales tras el ACV de un sistema de bomba de calor.**

De forma específica, del análisis de los resultados obtenidos, podemos determinar varios resultados importantes. Uno de ellos, es que el principal impacto de un sistema de bomba de calor, situado en un edificio terciario, se produce durante su etapa de fabricación y uso, y que afecta al agotamiento de los recursos.

Estos resultados son coincidentes con otros estudios de ACV en sistemas de energía renovables aplicados a edificios nZEB, y nos marcan claramente que en la etapa de operación o uso es donde se producen los impactos ambientales más importantes.

Estos resultados, coinciden en un tanto por ciento muy elevado con los obtenidos en otros trabajos similares [84-89]. Esto nos indica, que la elección de los materiales con los que se fabrican los componentes y la eficiencia energética del edificio, son imprescindibles si pretendemos reducir el impacto que producen estos sobre el medioambiente. Así mismo, en el presente estudio, decisiones como la elección de la expectativa de vida de la bomba de calor y la elección del refrigerante del sistema son extremadamente importantes.

Además hay que enfatizar que con el nuevo criterio medioambiental que nos aporta el ACV en general, y específicamente el presente estudio en este tipo de sistemas ubicados edificios terciarios, nos suponen una innovación importante, y que progresivamente, con nuevas investigaciones, nos aportarán datos que nos permitan fundamentar y justificar la elección de un sistema de producción de energía térmica u otro, con mayor criterio.

Es por ello recomendable, que para completar y aumentar el aporte científico que hemos obtenido con estos resultados, el realizar estudios similares sobre otros sistemas. Supondrían alternativas directas a la bomba de calor analizada, además de realizar estudios comparativos con otras metodologías existentes, en este tipo de edificios terciarios.

### **Conclusiones parciales tras el ACV de un sistema de caldera de biomasa.**

De forma general, podemos estar de acuerdo, en que el uso del ACV como metodología para determinar los impactos producidos durante el ciclo de vida de los productos, procesos o sistemas analizados, es satisfactoria y nos aporta una información necesaria para la toma de decisiones. Sobre en la fase de elección de los sistemas de producción de energía.

De forma específica, el análisis de los resultados obtenidos, nos indica, que el principal impacto de un sistema de caldera de pellets situado en un edificio terciario, se produce durante su etapa de fabricación, y que afecta al agotamiento de los recursos. Este punto es coincidente con el análisis de los resultados obtenidos en la bomba de calor, con la diferencia que la caldera de biomasa es menos eficiente.

Esto nos indica, que la elección de los materiales con los que se fabrican los componentes y la eficiencia energética del edificio, son imprescindibles si pretendemos reducir el impacto que producen estos sobre el

medioambiente. Así mismo, la decisión de elección sobre la expectativa de vida del sistema es extremadamente importante.

Para completar el análisis de los resultados se procederá a realizar un comparativo entre dos sistemas de producción de calor, que nos permitirá detectar los puntos divergentes entre un sistema y otro.

### **Conclusiones parciales tras el ACV comparativo entre un sistema de bomba de calor y un sistema de caldea de biomasa.**

La bomba de calor es considerada como energía renovable, usada en modo frío, en cambio, este mismo aspecto ocurre con la caldera de calor, realizando su función de aportar calor. Es por ello, que es interesante la realización de este comparativo que nos permite tener otro aspecto más a tener en cuenta, como es de la sostenibilidad, a la hora de decidir por un sistema u otro.

Mediante el uso de dos metodologías, se ha realizado un ACV a un sistema de bomba de calor y a un sistema de caldera de biomasa. A pesar del enfoque distinto de las metodologías usadas, el resultado nos ha confirmado que se producen similares impactos en los sistemas, apareciendo diferencias en componentes concretos. Según esto, puede verse que el daño principal de los dos sistemas se produce durante la fabricación y el funcionamiento de la caldera de pellets, en la categoría de agotamiento de los recursos, así como la emisión de CO<sub>2</sub>, que agrava el cambio climático.

Mientras que otros impactos menores son, sobre la esperanza de vida y el uso de refrigerante en la bomba de calor. Además obtenemos impactos sobre la salud humana, los efectos respiratorios provocados por la emisión al aire de sustancias inorgánicas como el SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub> y la carcinogénesis que prácticamente son similares en los dos sistemas.

### **Sostenibilidad, arquitectura e industria.**

La arquitectura entendida como un conjunto de procesos industriales hace que sea uno de los sectores que provoca mayores impactos ambientales. El agotamiento de los recursos materiales, que son finitos, frente a consumo de la energía, es el problema más importante con el que nos encontramos en la actualidad. En esta tesis, nos hemos centrado en determinar cuantitativamente y cualitativamente los impactos ambientales que se producen en dos sistemas de producción de

energía, instalados en un edificio terciario, que nos ha llevado a una conclusión común: el mayor impacto se produce en el agotamiento de los recursos.

Es por ello importante, que si se parte de un uso cada vez mayor de las energías renovables, hay que centrar los esfuerzos en un cambio de modelo estructural, que se centre en convertir los ciclos lineales actuales de la industria en ciclos cíclicos. Para ello es clave la gestión de los recursos a lo largo todo el ciclo de vida.

Los sistemas de generación de energía pueden considerarse como sistemas prefabricados, modulares, ligeros o desmontables frente a los sistemas constructivos convencionales, por lo que, en este sentido son más aptos para conseguir superar esta conversión a procesos cíclicos. Tal y como se ha podido ratificar con los resultados obtenidos en esta tesis.

La eficiencia energética y la sostenibilidad presente y del futuro se basan en dos conceptos, reciclar y hacerlo con energía renovable. Para ello, debe haber un punto de encuentro común entre la arquitectura y la industria.

## RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES

- 7.1. Artículos publicados relacionados con la tesis.
  - 7.1.1. Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de una bomba de calor aire/aire aplicada a un edificio terciario como contribución a una energía renovable.
  - 7.1.2. Análisis de Ciclo de Vida (ACV) comparativo de una bomba de calor aire/aire y una caldera de Pellets aplicada a un edificio terciario.
  
- 7.2. Artículos publicados relacionados con la sostenibilidad en la edificación y la industria.
  - 7.2.1. Multi-objective optimization and life cycle Assessment of eco-friendly cryogenic N<sub>2</sub> assisted turning of Ti-6Al-4V.
  - 7.2.2. Comparative study of the environmental impact of the manufacture of traditional bricks and bricks of porous cooked clay with biological basics through Life Cycle Analysis (LCA).
  - 7.2.3. LCA case study to LED outdoor lighting luminaries as circular economy solution to local scale.
  - 7.2.4. Environmental criteria for a assessing the competitiveness of public tenders with the replacement of large-scale LEDs in the outdoor lighting of cities as a key element for sustainable development: case study applied with Promethee methodology.
  
- 7.3. Artículos en trámite de publicación.
  - 7.3.1. Aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) a un sistema de caldera de Pellets en un edificio terciario.

### **7.1. Artículos publicados relacionados con la tesis.**

**7.1.1. Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de una bomba de calor aire/aire aplicada a un edificio terciario como contribución a una energía renovable.** <https://dx.doi.org/10.6036/8465>.

# Análisis de ciclo de vida (ACV) de una bomba de calor aire/aire aplicada a un edificio terciario como contribución a una energía renovable

*Life cycle assessment (LCA) methodology of air/air heat pump applied to a tertiary building to renewable energy contribution*

■■■■  
José Adolfo Lozano Miralles<sup>1</sup>, José Manuel Palomar Camicero<sup>2</sup>, Rafael López García<sup>2</sup>, F. Javier Rey Martínez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Univ. Sevilla, Madrid y Jaén, <sup>2</sup> Universidad de Jaén y <sup>3</sup> Universidad de Valladolid

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8465>

## INTRODUCCIÓN

La mayor parte de nuestras vidas la desarrollamos en un entorno construido. La industria y la edificación consumen grandes cantidades de recursos del planeta, lo que provoca importantes impactos medioambientales. La creciente explotación de recursos naturales y el aumento de la demanda energética, hacen que nuestro estilo de vida sea insostenible.

Como podemos ver en la Figura 1, el consumo de electricidad y de materias primas, encabezan la lista de estos impactos.

Según la Unión Europea CE, y verificado por la UNEP y el OCDE, la construcción urbana y la industria supone altos % de consumo, emisiones y residuos frente al resto de los sectores.

En la fase de diseño de un proyecto constructivo, es donde se toman gran cantidad de soluciones que afectan al resultado final. Buena parte de los procesos asociados al diseño y desarrollo de la actividad industrial o edificatoria no están concebidos para ser sostenibles y por tanto necesitan ser "re-diseñados". Se estima que más del 80% de los impactos ambientales que tiene cualquier edificio durante todo su ciclo

de vida, están prefijados desde su etapa de diseño. El diseñador es el que toma las primeras decisiones para mejorar los resultados medioambientales, es el creador del eje vertebrador para el posterior desarrollo del edificio, controlando la elección de materiales y soluciones constructivas empleadas en el proyecto [2].

El crecimiento de las nuevas tecnologías y la constante innovación de las mismas, producen un aumento del confort, pero paradójicamente, también, un aumento de los daños medioambientales. Para reducir estos efectos dañinos, hay que identificar los impactos y los daños en cada etapa o proceso. Uno de estos métodos es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), el cuál de una forma sistemática y objetiva, constituye la herramienta medioambiental más apropiada.

Aunque es cierto que por la energía hay una preocupación ambiental, no debe olvidarse que los límites materiales del mundo son mucho más estrictos que los energéticos, y por tanto el futuro preocupa más por la escasez de recursos, debido al hecho de resultar más fácil convertir materiales en energía que energía en materiales [3].

Es casi imposible cuantificar el impacto negativo sobre el ambiente de las técnicas industriales y constructivas y su coste energético. Se considera que este coste es proporcional al impacto sobre el territorio debido a movimientos de materiales, aunque es bastante ambiguo, ya que para cada material se puede contabilizar su coste a través de una serie de operaciones, escondidas e implícitas en el agregado final de energía. Es decir, el impacto ambiental de un solo material, ya no

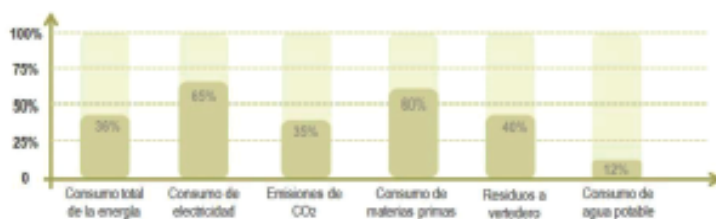


Figura 1: Consumos y emisiones del sector edificatorio e industrial. [1]

| Standard        | Descripción                                 | Primera Edición    |
|-----------------|---|--------------------|
| ISO 14040:1998  | Principios y marco de referencia            | 1998               |
| ISO 14041:1999  | Objetivo, alcance y análisis del inventario | 1999               |
| ISO 14042:2001  | Evaluación del impacto                      | 2001               |
| ISO 14043:2001  | Interpretación de resultados                | 2001               |
| Modificaciones: |   |                    |
| ISO 14040:2006  | Principios y marco de referencia            | anula a 14040:1998 |
|                 |   | 14041:1999         |
|                 |   | 14042:2001         |
|                 |   | 14043:2001         |
| ISO 14044:2006  | Requisitos y directrices                    | 2006               |

Figura 2: Serie ISO 14040 Standard [7]

sólo un sistema constructivo, depende del proceso constructivo, eficiencia, distancia de la producción y transporte, residuos de dicho material. [4]

Existen diversas herramientas que evalúan las emisiones de CO<sub>2</sub> de los edificios. Herramientas internacionales de certificación sostenible, que van enfocadas a fases avanzadas de diseño, o cuando el proyecto está finalizado. Coexisten en España otras herramientas, actualmente muy utilizadas, las herramientas de certificación energética, que son herramientas que evalúan el impacto ambiental dependiendo del consumo energético del edificio en la etapa de uso. Ninguna de estas herramientas cuantifica y prevén los impactos producidos por el edificio en todo su ciclo de vida. Las herramientas de Análisis de Ciclo de Vida son clave en la etapa de diseño, para desarrollar un proceso sostenible, para así mejorar los resultados medioambientales. Herramientas que evalúan un edificio "desde la cuna a la tumba", pasando por todas las etapas de vida del edificio y sus materiales.

Para estudios de ACV de cualquier producto o material, la Comisión Europea, Methodology Study Eco-design of Energy-Using Products (MEEUP) clasifica los estudios de ACV según las herramientas infor-

máticas, metodologías y bases de datos. Existen bases de datos de productos químicos, de envases, otras para el ecodiseño de productos, para productos industriales, incluso algunas permiten asociar costes y realizar análisis económicos. Hay herramientas para realizar estudios de ACV prácticamente de todos los productos y sectores específicos.

La metodología estandarizada de ACV se define en la serie de normativas ISO 14040-14050 de aplicación medioambiental. Esta norma es la que marca los límites para la aplicación y desarrollo de un ACV, dividiéndose en otras en función del tema a desarrollar. Se han producido numerosas modificaciones y actualizaciones a lo largo de los años con respecto a esta norma, pero la base se puede resumir en las siguientes:

## 2. ACV DE UNA BOMBA DE CALOR AIRE/AIRE EN UN EDIFICIO TERCIARIO

### 2.1. OBJETIVOS

De acuerdo a estas normas, nuestro principal objetivo es la aplicación de un Análisis de Ciclo de Vida a un Sistema de

Bomba de Calor situado en un edificio terciario, usando para ello la metodología EPS 2000. Esto nos permitirá, en un futuro, tener conocimiento de los impactos que producen otras alternativas, y disponer de otro criterio más a la hora de la elección de un determinado sistema de producción de energía.

### 2.2. METODOLOGÍA

#### 2.2.1. EQUIPOS

La bomba de calor seleccionada tiene las siguientes características, de acuerdo a los requerimientos térmicos de calefacción demandados por cuatro aulas de 93,90 m<sup>2</sup> localizados en un edificio de la Universidad de Jaén. El análisis se realizó a una bomba de calor compuesta por una máquina exterior de la marca MITSUBISHI ELECTRIC, modelo FDCA224HKXE4, y cuatro máquinas interiores de la misma marca y modelo FDT36KX. Las especificaciones técnicas de estas máquinas han sido obtenidas del catálogo técnico [8].

#### 2.2.2. CICLO DE VIDA

Para entender de una manera sencilla el ciclo de vida de la bomba de calor, hemos realizado el siguiente diagrama representativo, tal y como se observa en la

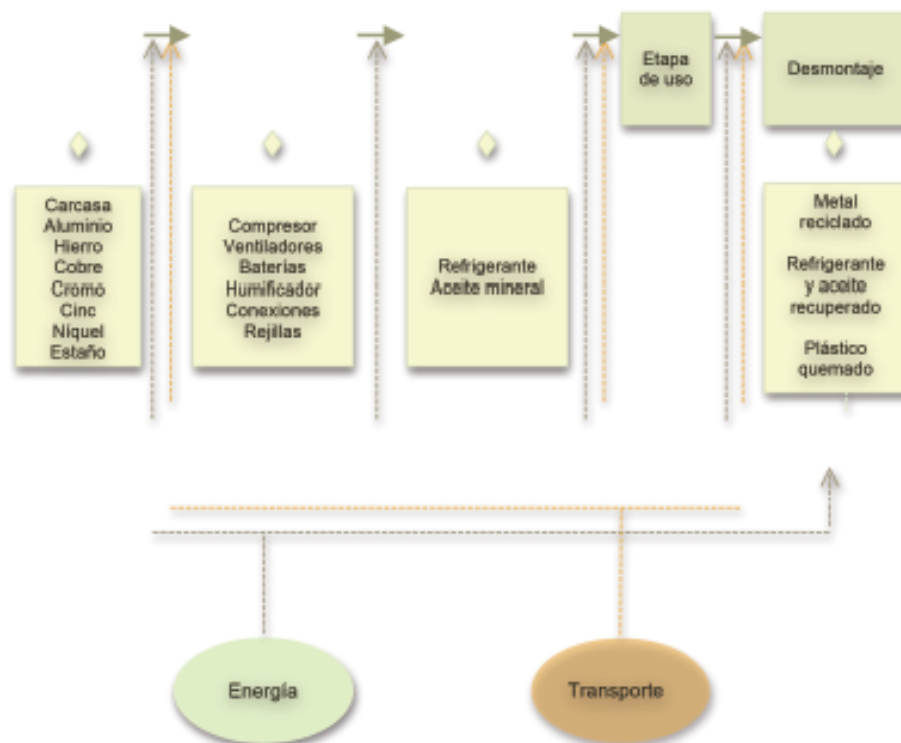


Figura 3: Ciclo de vida de la bomba de calor. (Elaboración propia)

Figura 3. En él se desglosan los flujos de materiales y la energía que habitualmente se necesitan para este tipo de sistemas. Los datos para la realización del inventario fueron obtenidos de los catálogos correspondientes a cada máquina, y adaptados a las unidades y características de la base de datos utilizada. Así mismo, para el cálculo de distancias para el transporte de los aparatos ya fabricados, se ha considerado que la fábrica se encuentra en Sevilla, y que para su montaje en el edificio, se ha utilizado un camión completo hasta el almacén de la empresa instaladora. Posteriormente, la distribución se ha realizado mediante furgoneta hasta el edificio donde se realiza la instalación.

De la misma forma, al introducir los datos en el programa informático, se han

considerado los elementos y procesos que nos aportan más información medioambiental. Otro punto a considerar es, que al final de la vida útil del sistema, se produce un desmontaje y reutilización de algunos elementos, siendo esta fase, opcional según diversos factores. Se ha considerado la recogida y recuperación del refrigerante y el aceite mineral, proceso obligatorio por la normativa española.

### 2.2.3. INVENTARIO

A continuación describimos las partes y los materiales más significativos de las que se compone el sistema estudiado, expresando las cantidades de cada elemento y la totalidad del conjunto, como podemos observar en la Figura 4. De esta forma obtenemos todos los datos necesarios que

nos harán falta para la posterior introducción en el software de cálculo.

### 2.2.4. CONSUMO ANUAL DE ENERGÍA

Para el cálculo del consumo anual de energía se han considerado los siguientes límites: la temperatura de funcionamiento seleccionada para el interior de los edificios terciarios es de 22°C invierno y de 24°C en verano, considerando la normativa española sobre diseño de máquinas térmicas [9]. El horario de trabajo (aulas de docencia), es de 09.00 h a 20.00 h. El cálculo de los días lectivos viene desarrollado de la siguiente manera: 2 cuatrimestres de 22 días/mes, obtenemos un uso de 176 días. Por lo que el total de horas de trabajo del sistema es de 3.036 horas/año.

| INVENTARIO   |              |          |            |                 |
|--|--------------|----------|------------|-----------------|
| CONCEPTO   | EXTERIOR     | INTERIOR | CONEXIONES | TOTAL           |
| MATERIAS PRIMAS (kg)   | FDCA224HIXE4 | FDT36IX  | 4 ud       | 1 ext. + 4 int. |
| Carcasa (plástico)   | 86,89        |          |            | 86,89           |
| Hierro   | 78,07        | 35       |            | 112,93          |
| Aluminio   | 40,17        | 38       |            | 77,95           |
| Cobre  | 17,11        | 9        | 16,35      | 42,79           |
| Níquel   | 3,48         |          |            | 3,48            |
| Plomo  | 3,48         |          |            | 3,48            |
| Cromo  | 2,89         |          |            | 2,89            |
| Polietileno  | 5,82         | 6        |            | 11,36           |
| Cinc   | 1,11         |          |            | 1,46            |
| Estaño   | 0,02         |          |            | 0,04            |
| PVC  | 0,09         |          |            | 0,19            |
| Goma   | 0,82         |          |            | 0,82            |
| Total  | 240,00       | 88,00    | 16,35      | 344,36          |
| ENERGIA  |              |          |            | MJ              |
| Petróleo (Caldera, 1 MW)   | 1.538,81     | 618,57   | 154,64     | 2.312,03        |
| Gas natural industrial (>100 kW)   | 1.538,81     | 618,57   | 154,64     | 2.312,03        |
| Electricidad de Medio Voltaje  | 112,83       | 45,36    | 11,34      | 169,54          |
| TRANSPORTE   |              |          |            | tKm*            |
| Camión (40 t)  | 23,91        | 8,80     | 1,63       | 34,35           |
| Furgoneta (<3,5 t)   | 55,01        | 20,24    | 3,76       | 79,01           |
| Tren   | 47,83        | 17,60    | 2,61       | 68,05           |
| BASURA (incinerador público)   |              |          |            | kg              |
| Polipropileno  | 5,82         | 5,53     |            | 11,36           |
| PVC (Policloruro de vinilo)  | 0,09         | 0,09     |            | 0,19            |
| Goma   | 0,82         | 0,00     |            | 0,82            |
| EMISIONES A LA ATMÓSFERA   |              |          |            | MJ              |
| Calor residual   | 112,84       | 45,36    | 21,12      | 179,32          |
| tKm*. Esta unidad es el transporte de 1 tonelada de material en 1 km     |              |          |            |                 |
| Para el cálculo del transporte, se ha considerado la fábrica en Sevilla. |              |          |            |                 |

Figura 4: Inventario de la bomba de calor. (Elaboración propia)

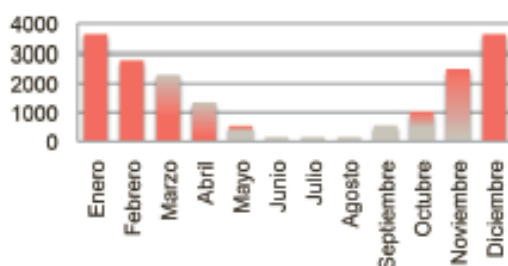


Figura 5: Consumo de energía. (Elaboración propia)

Considerando una expectativa de vida de la bomba de calor de 10 años, obtenemos un total de 19.360 horas. Por lo tanto el consumo de energía en este periodo, sería de 115.772,80 kW, o lo que es lo mismo 0,4167 TJ. En la figura 5, podemos analizar la estacionalidad significativa en el consumo, debido a la actividad a la que está destinado el edificio, edificio terciario con uso docente.

### 2.2.5 ANÁLISIS DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

Con los datos anteriormente aportados, realizamos una evaluación de los impactos medioambientales que el sistema de bomba de calor provoca. Para ello utilizaremos un software, llamado Simapro, en el que dentro de las distintas bases de datos disponibles, utilizaremos la EPS 2000 (Environmental Priority Strategies)

| CATEGORÍA DE IMPACTO   | INDICADOR DE CATEGORÍA | UNIDADES                   |
|------------------------|------------------------|----------------------------|
| Calidad del ecosistema | FDP*                   | FDP x m <sup>2</sup> x año |
| Salud humana           | DALY**                 | Persona x año              |
| Recursos naturales     | Daño a los recursos    | MJ/kg                      |
| Recursos abióticos***  | Agotamiento            | kg                         |

\* Fracción de desaparición potencial del ecosistema por m<sup>2</sup> y año.  
 \*\* Disability-adjusted life year: Reducción de los años de vida por persona/año.  
 \*\*\* Recursos climáticos, geológicos y geográficos. (Biodiversidad)

Figura 6: Indicadores de los impactos

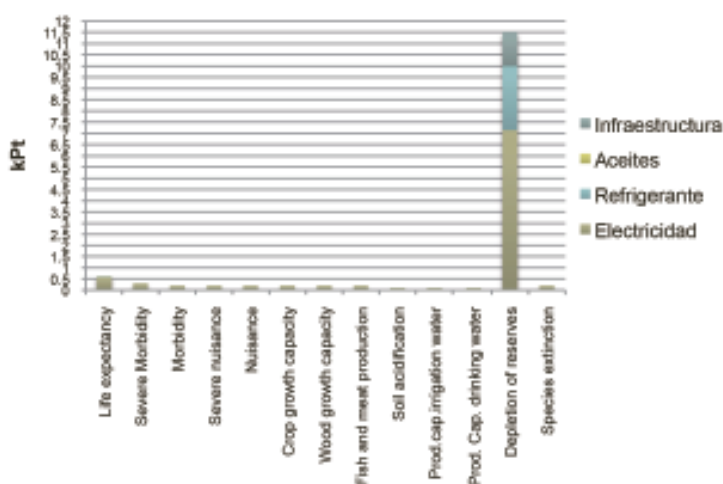


Figura 7: Indicadores de impacto de la bomba de calor según EPS 2000

[10]. Esta metodología evalúa los daños provocados en cuatro categorías de impacto, cuyas características describimos en la tabla 6.

### 3. RESULTADOS

Una vez introducidos los datos del inventario, el programa nos facilita los resultados con los recursos utilizados y las emisiones generadas al medioambiente (ver apartado material complementario) y, donde podemos analizar los porcentajes de contribución que aportan las diferentes partes del sistema de bomba de calor a cada categoría de impacto. Estos datos nos han sido facilitados por el programa, a partir del cálculo del consumo de energía anual que produce el sistema a lo largo de la vida útil estimada del sistema.

De las gráficas obtenidas, podemos analizar los impactos que producen cada parte del sistema de bomba de calor, que vienen recogidos en la Figura 7 siguiente:

En esta gráfica podemos observar como el impacto más importante se produce sobre el agotamiento de los recursos, motivado por la generación de la electricidad necesaria para la fabricación y uso del sistema. Seguidos a estos impactos se encuentran el impacto del refrigerante y de la infraestructura, sobre el agotamiento de los recursos.

Haciendo un estudio en función de las categorías, la metodología EPS 2000 nos marca que durante la fabricación y uso de la bomba de calor, el agotamiento de recursos es el 65% del total de la contribución. Así mismo, es también importante el impacto sobre la expectativa de vida (Salud humana), que viene a ser el 28%, generadas principalmente por las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la etapa de generación de electricidad, mientras que el porcentaje restante 7% corresponde con el impacto sobre los ecosistemas.

#### 3.1. CONTRIBUCIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE DE UNA BOMBA DE CALOR AIRE/AIRE

De acuerdo la decisión de la Comisión de 1 de marzo de 2013, de cara al cumplimiento de la Directiva 2009/28/CE de 23 de abril de 2009, y aplicando los criterios marcados en el anexo VII, consideramos que las bombas de calor utilizan una parte de su consumo total de energía como energía renovable. Para ello hacemos el cálculo de cuánto supone la parte de energía renovable consumida por nuestra bomba de calor.

Para que una bomba de calor pueda ser considerada de origen renovable de-

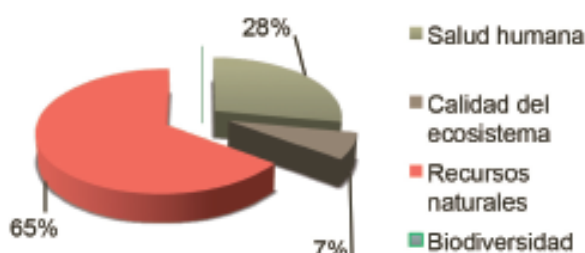


Figura 8: Importancia del dato según la categoría de impacto. Resultados del software Simapro

ben cumplir dos requisitos que podemos resumirlo en: que la bomba de calor sea utilizada como sistema calefacción y que adicionalmente su SPF (factor de rendimiento medio estacional) sea superior a 2,5. Para el análisis de la contribución de nuestra sistema en energía renovable vemos que el primer criterio se cumple, pues hemos considerado que el sistema sólo funciona aportando calor, para poder realizar un comparativo con otros sistemas en el futuro, tal y como se describe en el punto 2.2.1 del presente estudio. Con respecto al segundo punto estimamos que se cumple al no afectar al desarrollo de nuestro estudio.

$$E_{RES} = Q_{USABLE} (1-1/SPF)$$

Cálculo del SPF:  
 $SPF = COP \cdot FP \cdot FC$

COP = 5,45 obtenido del catálogo del fabricante,  
 FP = 0,62 tabla 4.1 [11]  
 FC = 1 tabla 4.2, obteniendo:

$$SPF = 3,378$$

$$E_{RES} = Q_{USABLE} (1-1/SPF)$$

Del punto 2.2.4 del presente estudio obtenemos el cálculo del consumo es de 115.772,80 kW, por lo que:

$$E_{RES} = 115.772,80 (1-1/3,378) = 81.500,21 \text{ kW como energía renovable}$$

#### 4. CONCLUSIONES

Podemos concluir, que el uso del ACV como metodología para determinar los impactos producidos durante el ciclo de vida de los productos, procesos o sistemas analizados, es satisfactoria y nos aporta una información necesaria para la toma

de decisiones. De los resultados obtenidos del cálculo de la energía renovable que consume nuestra bomba de calor, podemos destacar la gran eficiencia de la bomba de calor estudiada.

De forma específica, del análisis de los resultados obtenidos, podemos determinar varios resultados importantes. Uno de ellos, es que el principal impacto de un sistema de bomba de calor, situado en un edificio terciario, se produce durante su etapa de fabricación y uso, y que afecta al agotamiento de los recursos. Estos resultados, coinciden en un tanto por ciento muy elevado con los obtenidos en otros trabajos similares [12] [13]. Esto nos indica, que la elección de los materiales con los que se fabrican los componentes y la eficiencia energética del edificio, son imprescindibles si pretendemos reducir el impacto que producen estos sobre el medioambiente. Así mismo, en el presente estudio, la decisión sobre la elección sobre la expectativa de vida de la bomba de calor y la elección del refrigerante del sistema son extremadamente importantes.

Además hay que enfatizar que con el nuevo criterio medioambiental que nos aporta el ACV en general, y específicamente el presente estudio con este tipo de sistemas ubicados edificios terciarios, nos suponen una innovación importante, y que progresivamente, con nuevas investigaciones, nos aportarán datos que nos permitan fundamentar y justificar la elección de un sistema de producción de energía u otro, con mayor criterio.

Es por ello recomendable, que para completar y aumentar el aporte científico que hemos obtenido con estos resultados, el realizar estudios similares sobre otros sistemas que puedan ser alternativas directas a la bomba de calor analizada, así como el realizar un comparativo con otras metodologías existentes, en este tipo de edificios terciarios.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] IDAE. Instituto para la diversificación y Ahorro de la Energía. Estudios, informes y estadísticas. Balances de energía final (1990-2015)
- [2] Alavedra, P., Domínguez, J., Gonzalo, E., & Serra, I. (1997). La construcción sostenible: el estado de la cuestión. *Informes de la Construcción*, 49(451), 41- 47
- [3] Huedo, P., & López-Mesa, B. (2013). Revisión de herramientas de asistencia en la selección de soluciones constructivas sostenibles de edificación. *Informes de la Construcción*, 65(529), 77-88.
- [4] Vázquez Espi, M. (2001). Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales. *Informes de la Construcción*, 52(471), 29-43.
- [5] Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42(10), 1592-1600.
- [6] Manual Técnico de la empresa Mitsubishi Heavy industries, Ltd. Lumelco. Pág 14. Coeficiente COP para calefacción 5,45 minorizado.
- [7] AENOR. Agencia para la Normalización. www.aenor.es. Madrid: AENOR, 1996.
- [8] Manual Técnico de la empresa Mitsubishi Heavy industries, Ltd. Lumelco.
- [9] RITE, 1989. Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios.
- [10] Categorías de impacto de la metodología EPS 2000 (Environmental Priority Strategies).
- [11] Prestaciones medias estacionales de equipos y sistemas de producción de frío y calor en edificios de viviendas. Documento reconocido de la Calificación energética. IDAE. Instituto para la diversificación y Ahorro de la Energía. Estudios, informes y estadísticas. Balances de energía final (1990-2015).
- [12] Rey F.J., Martín-Gil J., Velasco E., Pérez D., Varela F., Palomar J.M., & Dorado, M.P. (2004). Life Cycle Assessment Environmental Cost Analysis of Heat Pumps. Volumen 21, Number 5. [12]
- [13] (Steen B. 1999a,1999b). Steen, B. (1999a). A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000. General system characteristics. Gothenburg. Chalmers University of Technology, p. 67. Disponible en [http://pre.nl/simapro/impact\\_assessment\\_methods.htm](http://pre.nl/simapro/impact_assessment_methods.htm)

## MATERIAL SUPLEMENTARIO

Características técnicas del sistema en estudio:

| Funcionamiento en modo refrigeración o calefacción |       |               |                          |                 |
|--|-------|---------------|--------------------------|-----------------|
| Modelo   |       | FDCA224H IXE4 |                          | FDT36IX         |
| Capacidad  | Frio  | kW            | 22,4                     | 3,6             |
|  |       | kcal/h        | 22.400                   | 3.150           |
|  | Calor | kW            | 25                       | 4               |
|  |       | kcal/h        | 25.000                   | 3.500           |
| Consumo eléctrico                                  | Frio  | kW            | 5,7                      |                 |
|  | Calor | kW            | 5,98                     |                 |
| Nivel sonoro                                       |       | dB (A)        | 57                       | 31              |
| Dimensiones externas                               |       | mm            | 1.690 x 1.350 x 720      | 246 x 840 x 840 |
| Peso   |       | kg            | 240                      | 22              |
| Caudal de aire (estándar)                          |       | m³/min        | 220                      | 18              |
| Tipo de compresor                                  |       |               | GT-CS 150ND71 x 1        |                 |
| Motor del compresor                                |       | kW/ud         | 5,6 x 1                  |                 |
| Motor del ventilador                               |       | W x ud        | 120 x 2                  | 50 x 1          |
| Aceite refrigerante                                |       | L             | 1,75 (M-MA32R)           |                 |
| Refrigerante                                       |       |               | R410A                    |                 |
| Cantidad de refrigerante                           |       | kg            | 11,5                     |                 |
| Tipo de ventilador y cantidad                      |       |               | Ventiladores axiales x 2 |                 |
| Unidades conectadas                                |       | Ud            | 1                        | 4               |

Figura 8: Especificaciones técnicas de la bomba de calor

Datos obtenidos del programa Simapro:

| Recursos no energéticos |           | Recursos energéticos     |          |
|-------------------------|-----------|--------------------------|----------|
| Barita (kg)             | 30,95     | Madera (kg)              | 17,56    |
| Bauxita (kg)            | 251,49    | Energía del agua (MJ)    | 88,36    |
| Calcita (kg)            | 17,38     | Lignita (kg)             | 3,32     |
| Cr (kg)                 | 5,74      | Gas Natural (MJ)         | 446,25   |
| Mn (g)                  | 6,19      | Petróleo (kg)            | 12,29    |
| Ni (g)                  | 8,27      | Uranio (kg)              | 8,6006   |
| Zinc (kg)               | 309,14    |                          |          |
| Sn (g)                  | 2,23      |                          |          |
| Emisiones al agua       |           | Emisiones a la atmósfera |          |
| Sulfatos (kg)           | 122,91    | CO <sub>2</sub> (kg)     | 106,93   |
| NH <sub>3</sub> (kg)    | 13,17     | SO <sub>2</sub> (kg)     | 10,09    |
| Grasas y aceites (kg)   | 0,3003    | CH <sub>4</sub> (kg)     | 10,75    |
| Al (g)                  | 83,62     | CFC (g)                  | 5,011    |
| Ba (g)                  | 193,33    | Partículas (kg)          | 391,65   |
| Pb (g)                  | 714,11    | Cd (kg)                  | 1,44     |
| Ca (g)                  | 5,058     | Pb (kg)                  | 189,40   |
| Cr(III) (kg)            | 1,070     | Otros metales (kg)       | 44,54    |
| K (mg)                  | 593,91    | Calor residual (MJ)      | 2.344,04 |
| Na (kg)                 | 19,64     |                          |          |
| Calor residual (MJ)     | 56.468,59 |                          |          |

Figura 10: Listado de los recursos y emisiones más importantes producidos por el sistema

### 7.1.2. Análisis de Ciclo de Vida (ACV) comparativo de una bomba de calor aire/aire y una caldera de Pellets aplicada a un edificio terciario. Comparative study of heat pump system and biomass boiler system to a tertiary building using the life Cycle Assessement (LCA). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.148>

Article

#### Comparative study of heat pump system and biomass boiler system to a tertiary building using the Life Cycle Assessment (LCA).

**Abstract:** The high emissions of substances harmful to the environment associated with the activity of people, has become a point of extreme importance, since it depends on the subsistence of life on the planet [1]. Manufacturing processes and the application of new technologies improve substantially the life, but some processes contribute more to the damage to the environment. These manufacturing processes require a high consumption of energy and resources, which entail environmental impacts, some of them not quantified. For this reason, the reduction of emissions has become the battlefield in the fight for the preservation of planet.

To determine and quantify the impacts that occur in a product, process or system, it is necessary to perform an analysis of the flows of energy and resources that occur throughout its life cycle. That is why the LCA has become a very important tool in the process of transition to a low-emission production economy. [2] There are systems that, although considered renewable, also produce impacts on the environment. That is why, the present work, and through the LCA, determines the impacts produced by two heat generation systems, to later be able to compare them with each other.

**Key words:** LCA, environmental impact, sustainability, resources, heat pump, boiler.

---

#### 1. Introduction

At present, the importance for the subsistence of life on the planet is professionally, theoretically and even people in the street in the public eye, to cope with high emissions of substances harmful to the environment associated with the action of people. For this reason, the reduction of emissions has become the battleground in the fight for the preservation of the environment. [3]

Industry is in constant innovation, production and application of new technologies that contribute to one's comfort, but paradoxically, this increases the damage to the environment. To cut back on risks and environmental damages, there are effective methods, which identify the weaker factors of each process, and that must be developed. One of these methods is LCA which due to the systematic, objective and global nature constitutes a more appropriate methodology for environment order [4] [5]. The intense industrial activity and manufacturing processes require a high consumption of energy and have a significant influence on greenhouse gases (GHG) emissions, which has a negative impact on the preservation of resources and the environment, due to its contribution to global warming. These impacts include of GHG emissions, such as carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), the main worldwide polluting gas, and other gases like methane, nitrous oxide and chlorofluorocarbons which can be measured in units of CO<sub>2</sub> equivalent to (CO<sub>2</sub>-eq) [6] [7].

LCA has become a highly important tool for providing in-depth analyses of this kind, for instance in studies concerned with the replacement of fossil fuels by renewables in electricity production, and a significant option in the process of transition towards a low-emission production economy. It has used the Life Cycle Assessment used as a methodology which assesses environmental impacts caused by products, processes or systems.

According to ISO 14040 standards, LCA is defined as the collection and evaluation of the inputs and outputs for determining possible environmental impacts of a product, process or system during its life cycle. Thus, LCA is a tool for the analysis of the environmental burden of products in all phases of its life

cycle, from the extraction of resources, production of materials, pieces, and the product itself, until the use of the mentioned product and residue management after being discarded, whether re-purposing, recycling or final disposal. [8]

The main parts of the LCA are the following:

- a) Discuss the purpose and definition of the scope of application of this approach;
- b) Make an inventory of the inputs and outputs of the system;
- c) Assess all types of impacts on the environment; and
- d) Interpret the results and evaluate the impacts.

There are LCA studies and works include environmental issues about energy production systems, but few comparative between different systems that cover the same demands and are considered renewable. One of them is LCA comparative of wood pellets and wood split logs for residential heating which provides information on the impacts generated by the combustion of the wood and its by-products in three types of places, a pellet boiler, a waterproof stove and a traditional fireplace [9], other study is LCA Comparative of electric generation by different wind turbine types which shows us that most environmental impacts are associated with the manufacture of fundament, tower and nacelle [10] and last example is LCA comparative of fixed and single axis tracking systems for photovoltaics to understand the environmental differences between both systems [11]. These studies have used different software and different methods of analysis, which gives us information to contrast with the results of this studies.

The present work deals with the comparative study of the environmental impacts caused by an air-to-air heat pump and a biomass boiler, both considered renewable energy systems. The heat pump system was installed in a tertiary building of the University of Jaén and the biomass boiler has been simulated in the same conditions as the previous system. Emissions produced by the processes during the extract of materials, manufacture, operation and end-of-life stage of both systems have been considered. To complete the comparative, a sensitivity study was carried out based on the comparison between two evaluation methods, Eco-Indicator99, which focuses in determining the impacts to human health and the EPS 2000, which mainly approaches impacts due to energy and non-energy resources.

According to the previous approach, the first objective of this work will be to determine the impacts produced by two energy production systems (heat pump and pellet boiler) through two methods, the Eco-indicator99 and the EPS2000, which it would give us information about the amount and importance of CO<sub>2</sub> Emissions to the atmosphere. So that the information provided by the LCA, allow us to determine investment policies and reduce the impacts on the environment.

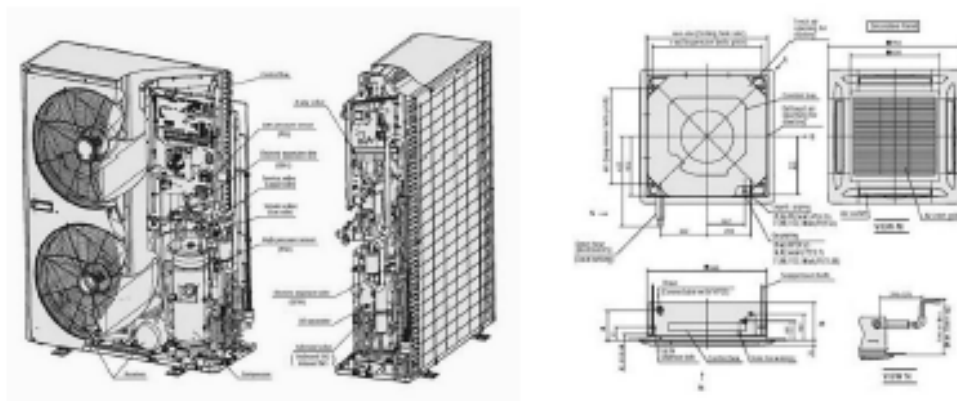
Eco-Indicator99 was performed for eleven impact categories- carcinogens, respiratory organics, respiratory inorganics, climate change, radiation, ozone layer, Ecotoxicity, acidification/eutrophication, land use, minerals and fossil fuels and EPS 2000 was performed for thirteen impact categories- life expectancy, severe morbidity, morbidity, severe nuisance, nuisance, crop growth capacity, wood growth capacity, soil acidification, production capacity irrigation, production capacity drinking, depletion of reserve and species extinction.

There are several reasons why these methods have been selected. The impact categories provided by both methods allow us to check whether the results are consistent. Eco-indicator99 is an evaluation method based on scientific and pragmatic knowledge for eco-design and is central to the final damage, using a two-level weighting system. The first within each protection area (resources, ecosystem and human health) and the second one of the panel type. The ultimate goal is to obtain the total environmental burden of a product or system through a single score [12] [13]. Another reason is that both methods give us a similar level of aggregation of the results. Important data for the compression of the results.

## 2. Materials and Equipment.

**2.1. Heat Pump (System 1).** The selected heat pump has the following features according to the requirements of thermal heating required for four classrooms 93.90 m<sup>2</sup> lecture rooms situated in a building of the University of Jaén. The heat pump MITSUBISHI ELECTRIC, model FDCA224HKXE4 is composed of the compressor (outdoor unit), the interconnection pipes, two fans, heat exchanger, air flow chamber, mechanical chamber, the housings, refrigerant R410a, oil, electronic expansion valves and small materials. The four evaporators ceiling cassette (indoor machines) model FDT36KX, whose components are plastic housing, air unlet grille, air outlet, suspensions bolts, liquid connection piping, electronic materials, control box and small materials. The technical diagrams of the system are represented in figure 1. [14]

Figure 1. Technical scheme of the compact compressor and evaporators.



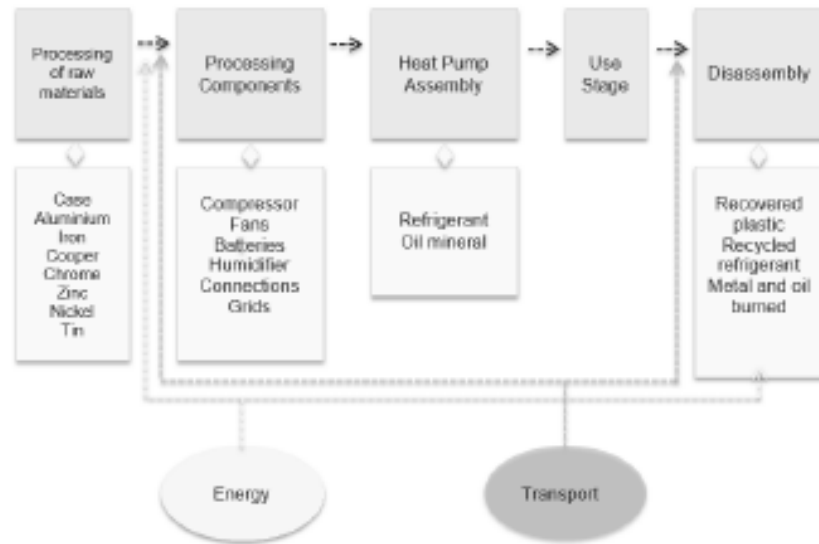
**2.1.1. Technical Specifications.** It have been obtained the quantities, powers and characteristics necessary for study. The data on elements, raw materials and consumptions form a basic part of the inventory of the systems to be studied. Technical specifications system 1 are shown in table 2.

Table 2. Technical specifications of the heat pump. [15]

| Operating in cooling or heating mode |      |                     |                     |                 |
|--------------------------------------|------|---------------------|---------------------|-----------------|
| Model                                |      |                     | FDCA224HKXE4        | FDT36KX         |
| Capacity                             | Cold | Kw                  | 22,4                | 3,6             |
|                                      |      | Kcal/h              | 22.400              | 3.150           |
|                                      | Heat | Kw                  | 25                  | 4               |
|                                      |      | Kcal/h              | 25,000              | 3,500           |
| Electricity Consumption              | Cold | Kw                  | 5,7                 |                 |
|                                      | Heat | Kw                  | 5,98                |                 |
| Sound Level                          |      | dB (A)              | 57                  | 31              |
| External Dimensions                  |      | mm                  | 1,690 x 1,350 x 720 | 246 x 840 x 840 |
| Weight                               |      | kg                  | 240                 | 22              |
| Air flow (standard)                  |      | m <sup>3</sup> /min | 220                 | 18              |
| Type of compressor                   |      |                     | GT-C5150ND71 x 1    |                 |
| The Compressor Motor                 |      | Kw/ud               | 5,6 x 1             |                 |
| Fan Motor                            |      | W x ud              | 120 x 2      50 x 1 |                 |
| Refrigerant Oil                      |      | L                   | 1,75 (M-MA32R)      |                 |
| Coolant                              |      |                     | R410A               |                 |
| Quantity of Refrigerant              |      | kg                  | 11,5                |                 |
| Fan type and amount                  |      |                     | 2 x axial fans      |                 |
| Drives Connected                     |      | Ud                  | 1                   | 4               |

**2.1.2. Flow Diagram.** To acquire knowledge about the system, a flow diagram of each process related to the heat pump is shown in Figure 2. The figure shows a diagram of the life cycle of a heat pump, from the extraction of materials to its end of life. In some cases it consists of disambiguation of some elements, and in others, the transfer to landfill. The inputs and outputs of both materials and energy, occurs throughout the cycle, being essential in the study a rigorous collection of these quantities.

Figure 2. Process flows of the heat pump. [16]



One of the main points of the LCA methodology consists of an inventory of the major inputs and outputs. To achieve this objective, it has been used various sources among which are the manufacturer's catalogues, information in the literature and databases of environmental data of the SimaPro. In addition, the following databases from ELCD, EU & DK Input Output Database, Industry data 2.0 and Methods have been consulted. These databases offer a significant amount of data relating to resource consumption and emissions during manufacturing. The most important raw materials which are involved in the processes of the cycle of life have been considered. [17] [18]

**2.1.3. Inventory Analysis.** The distance between the process of the parts of the heat pump and the place where the heat pump is going to operate is also important, in this case the central distribution is in Seville. It is considered that all the metals present in the new heat pump can be entirely recycled, and plastics incinerated. Table 4 shows the most representative values of the heat pump.

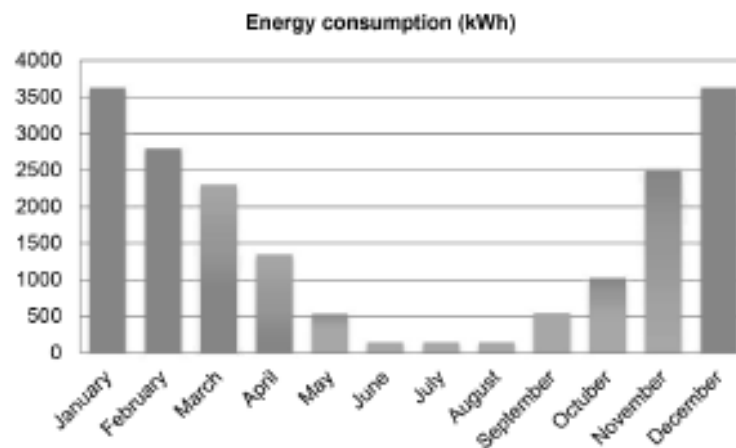
**Table 3.** Inventory of materials of the heat pump system. (Own compilation)

| Inventory                           |               |              |              |               |
|-------------------------------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| Concept                             | Outside       | Inside       | Connctions   | Total         |
| Raw Materials (kg)                  | FDCA224HKXE4  | FDT36KX      | 4 ud         | 1 out + 4 ins |
| Housing (Plastic)                   | 86,897        | 0            | 0            | 86,897        |
| Iron                                | 78,074        | 35           | 0            | 112,933       |
| Aluminium                           | 40,171        | 38           | 0            | 77,959        |
| Copper                              | 17,114        | 9            | 16,350       | 42,795        |
| Nickel                              | 3,481         | 0            | 0            | 3,485         |
| Lead                                | 3,486         | 0            | 0            | 3,496         |
| Chrome                              | 2,897         | 0            | 0            | 2,897         |
| Polyethylene                        | 5,826         | 6            | 0            | 11,365        |
| Zinc                                | 1,112         | 0            | 0            | 1,467         |
| Tin                                 | 0,022         | 0            | 0            | 0,042         |
| Pvc                                 | 0,099         | 0            | 0            | 0,195         |
| Rubber                              | 0,828         | 0            | 0            | 0,828         |
| <b>Total</b>                        | <b>240,00</b> | <b>88,00</b> | <b>16,35</b> | <b>344,36</b> |
| <b>Energy</b>                       |               |              |              | <b>MJ</b>     |
| Oil (Boiler, 1 MW)                  | 1.538,814     | 618,578      | 154,644      | 2.312,036     |
| Industrial natural gas (>100 kW)    | 1.538,814     | 618,578      | 154,644      | 2.312,036     |
| Medium Voltage Electricity          | 112,833       | 45,367       | 11,342       | 169,541       |
| <b>Transport</b>                    |               |              |              | <b>tKm*</b>   |
| Truck (40 t)                        | 23,917        | 8,800        | 1,635        | 34,352        |
| Van (<3,5 t)                        | 55,010        | 20,240       | 3,761        | 79,010        |
| Train                               | 47,834        | 17,600       | 2,616        | 68,050        |
| <b>BASURA (incinerador público)</b> |               |              |              | <b>Kg</b>     |
| Polypropilene                       | 5,826         | 5,535        | 0            | 11,361        |
| PVC (Polyvinyl Chloride)            | 0,099         | 0,095        | 0            | 0,195         |
| Rubber                              | 0,828         | 0,000        | 0            | 0,828         |
| <b>Atmosphere emissions</b>         |               |              |              | <b>MJ</b>     |
| Residual heat                       | 112,841       | 45,363       | 21,120       | 179,323       |

tKm\*. This unit is the transport of 1 ton of material per 1 Km. For the calculation of transport, the factory in Seville has been considered.

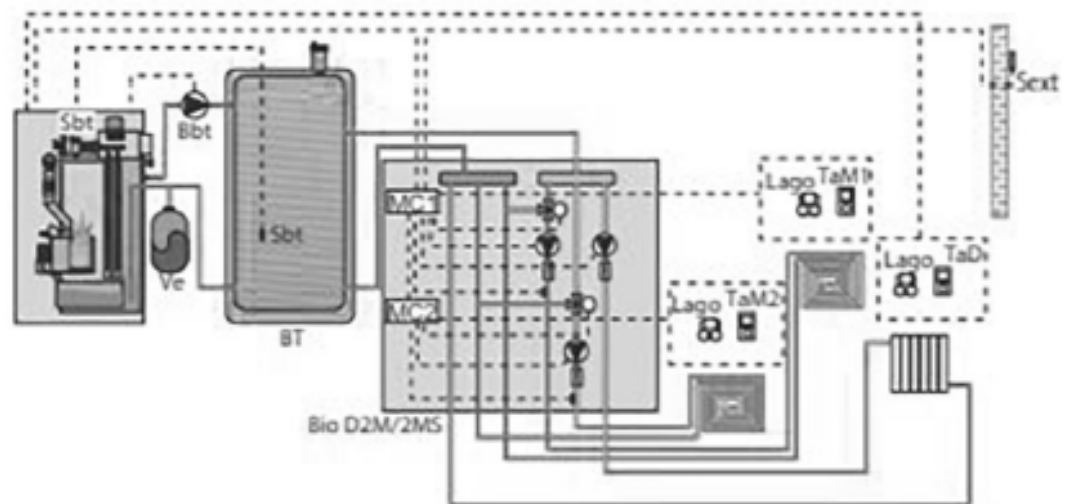
**2.1.4. Energy consumption.** The calculation of the annual energy consumption have been considered within the following limits: the operating temperature selected for inside buildings is 22°C in winter and 24°C in summer, considering the Spanish legislation on design of thermal machines [19]. The work schedule (teaching rooms), is from 09.00 h to 20.00 h. The calculation of the school days is developed as follows: 2 semesters of 22 days / month, have been obtained a use of 176 days. So the total working hours of the system is 3,036 hours / year. Considering a life expectancy of the Pellets Caldera for 10 years, have been obtained a total of 19,360 hours. Therefore, the energy consumption in this period would be 115,772.80 kW, or what is the same, 0.4167 TJ.

Figure 3: Seasonality of consumption (Own preparation).



2.2. *Biomass boiler (System 2).* The selected biomass boiler is the make DOMUSA, model BioClass HM. This model is available in a power range from 10 kW to 43 kW and it can be used with pellets hoppers consumption. There is the possibility of using several types of biomass granules, depending on the model, you can use pine pellets, leafy pellets, olive stone or hazelnut peel [20].

Figure 4. Technical scheme of the biomass boiler. (System 2)



2.2.1. *Technical Specifications.* The technical specifications of these components are shown in table 3. The boiler is composed of a main housing body, control unit, where the burner, buffer tank, electric heating element, the expansion vessel, heating expansion vessel, the recirculation pump, electric heating element an accumulator for hot water, fuel silo and heat radiators are located and are represented in figure 3. [20] [21]

**Table 4.** Technical specifications of the biomass boiler. (System 2)

| Model                      | BioClass HM |      |
|----------------------------|-------------|------|
| Useful power               | Kw          | 91,4 |
| Nominal power              | Kw          | 25,3 |
| Performance                | %           | 95   |
| Power partial load         | Kw          | 6,9  |
| Electric power             | W           | 485  |
| Minimum return temperature | °C          | 25   |
| Minimum chimney shot       | Pa          | 10   |
| Minimum chimney shot       | Pa          | 20   |
| Water chamber volume       | L           | 73   |
| Fuel 100%                  | Kg          | 5    |
| Pellet fuel capacity       | Kg          | 180  |
| Weight                     | Kg          | 300  |

**2.2.2. Flow Diagram.** The basic installation to cover the same energy demand conditions as the heat pump, is described in figure 2 and 3, where the most significant components are shown. To acquire knowledge about the different processes that occur in the biomass boiler are shown in figure 5 and 6.

**Figure 5.** Process flows of the biomass boiler.

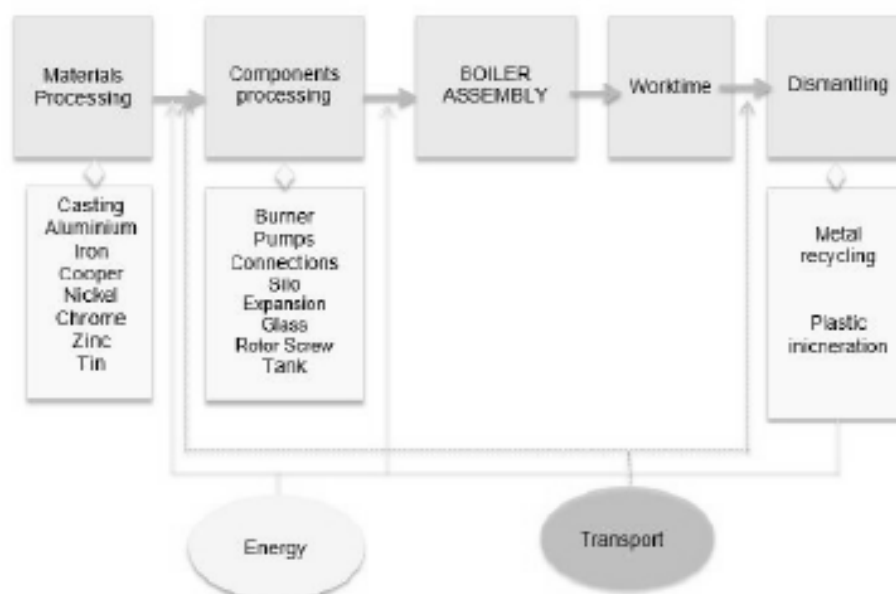
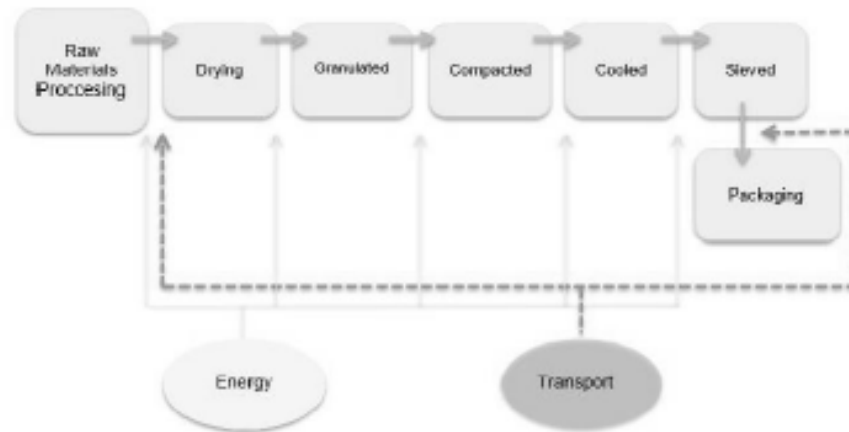


Figure 6. Process flows of the pellets [22] [23]



2.2.3. *Inventory Analysis.* Next, it has been described the most significant parts and materials which the studied system is composed, expressing the quantities of each element and the entire set, as it can be observed in Table 5. These data have been obtained from the manufacturer by means of estimating the consumption during their life cycle and of the databases from SimaPro software. This way, all the necessary data is obtained which is needed for the subsequent introduction in the calculation software. The manufacturing and distribution site of the boiler in Ezerril (Guipúzcoa, Spain) has been considered.

Table 5. Inventory during the life cycle of the biomass boiler.

| Inventory                    |                      |                  |               |
|------------------------------|----------------------|------------------|---------------|
| Concept                      | Boiler + Accumulator | Silo             | TOTAL         |
| RAW MATERIALS (kg)           | BIOCLASS NG 25       | Tipe 5           |               |
| Dimensions                   | 670 x 670 x 1310     | 405 x 685 x 1525 |               |
| Iron                         | 147,4                | 66,93            | 214,28        |
| Aluminium                    | 72,88                | 5,39             | 78,28         |
| Cooper                       | 30,8                 | 16,12            | 46,93         |
| Niquel                       | 17,88                |                  | 17,88         |
| Crome                        | 10,24                |                  | 10,24         |
| Polyethilene                 | 8,43                 | 2,1              | 10,53         |
| Zinc                         | 5,65                 |                  | 5,65          |
| Tin                          | 3,44                 | 3,68             | 7,12          |
| Lead                         | 1,47                 |                  | 1,47          |
| PVC                          | 0,99                 |                  | 0,99          |
| Rubber                       | 0,87                 | 0,43             | 1,3           |
| <b>Total</b>                 | <b>300</b>           | <b>94,67</b>     | <b>394,67</b> |
| Energy                       |                      |                  | MJ            |
| Oil (Boiler, 1 MW)           | 2.145,35             | 830,52           | 2.975,87      |
| Industrial Natural gas (>10) | 1.850,07             | 875,55           | 2.725,62      |
| Medium Voltage Electricity   | 242,2                | 55,98            | 298,18        |
| Transport                    |                      |                  | tKm*          |
| Truck (40 t)                 | 25,9                 | 2,35             | 28,25         |
| Van (<3,5 t)                 | 32,75                | 3,1              | 35,85         |
| Train                        |                      |                  |               |
| Waste (public incinerator)   |                      |                  | KG            |
| Polypropylene                | 7,64                 | 1,92             | 9,56          |
| PVC (Polyvylchloride)        | 0,12                 |                  | 0,12          |
| Rubber                       | 0,65                 | 0,21             | 0,86          |
| Atmosphere emissions         |                      |                  | MJ            |
| Residual Heat                | 224,15               | 87,9             | 312,05        |

tKm\*. This unit is the transport of 1 ton of material per 1 Km.  
For the calculation of transport, the factory in Guipúzcoa, Spain has been considered.

**2.2.4. Energy consumption.** To make a correct comparative study, it is necessary that the energy demand of the two systems is the same. Thus, it has been calculated the amount of biomass consumed by the boiler from the data obtained in the section "annual energy consumption of system 1".

### 3. Methods

In this section it has been analysed and quantified the results of the inventory. This process will allow to obtain environmental indicators from the list of emissions and consumed resources caused by two systems during their life cycle. In this way it will find it easier to understand. For this transformation it has been used two methods of impact evaluation, which will change the way in which results are classified and presented.

Table 6. Presentation of different methods (according to reference [24])

| Methods                  | Information  |
|--------------------------|--|
| CED                      | Non-renewable and renewable impact categories                  |
| Greenhouses gas protocol | GHG Emissions  |
| IPCC 2013                | GWP (global warming Potential)                                 |
| USEtox                   | Human and eco-toxicological impacts                            |
| Ecological footprint     | Nuclear energy use, CO <sub>2</sub> emissions, Land occupation |
| CML-IA                   | Midpoint approach  |
| IMPACT 2002+             | Combination midpoint/Damage approach                           |
| ReCiPe                   | Combination midpoint/damage oriented (endpoint) approach       |
| EPS 2000                 | Damage-oriented product declaration                            |
| EI99                     | Damage-oriented approach                                       |

**Analysis of environmental impact.** The aim of this section is to determine all the possible environmental impacts related to the parameters obtained in the previous section. This study will be carried out in accordance with priority strategies of the two methods, the Eco-indicator99 and the EPS 2000 [25] [26], and to the following sequence of tasks: classification, characterization (indicators are selected according to each category of impact), standardization and valuation. The choice of these methods is due to several reasons. 1) Perform a sensitivity analysis. 2) Compare similar impact categories, and 3) Obtain a final impact value.

#### 3.1 LCA methods applied to the systems

**3.1.1. Eco-Indicador99 Method.** Classification and hazard characterization. For human health by means of Disability-adjusted life years (DALY), using estimates of the number of years lost. Damages to the quality of the ecosystem are expressed in relation to species which have disappeared in a defined area and time, principally vascular plants and simple organisms. The following categories of impact are added in damages to the ecosystem: Ecotoxicity, acidification, eutrophication and the occupation of the land. From the obtained values, and which are summarized in Figure 5, it can be seen the greatest impacts on climate change, depletion of the ozone layer and fossil resources in the boiler system, while human health relative impacts and to ecosystems are higher in the heat pump boiler. [27] [26]

**3.1.2. EPS 2000 method.** This methodology has as priority environmental strategies for the design of products and was developed in 1989 by the Environmental Research Institute of Sweden in cooperation

with Volvo and the Swedish Federation of Industries. Since then, it has been modified several times, offering a more effective and extensive. The latest version of the EPS method evaluates the impact on the environment through its effects in one or several human health themes. The categories of impact are identified from the following issues: production capacity of the ecosystem (including information relating to agriculture, fish or meat, and the decrease in timber field), protection of human health (including human diseases), natural resources and abiotic resource in stock, with the environmental cost, resources and biodiversity (including the extinction of species). [29] [30]

Table 7. EPS 2000 method

|                               | Factor categories | Units                 |
|-------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Ecosystem Production Capacity | FDP*              | PDFm <sup>3</sup> /yr |
| Human Health                  | DALY**            | Person/yr             |
| Resources                     | Resources Damage  | MJ/Kg                 |
| Biodiversity***               | Agotamiento       | PDFm <sup>3</sup> /yr |

\* Potentially Disappered Fraction per area and year

\*\*Disability-adjusted life year.

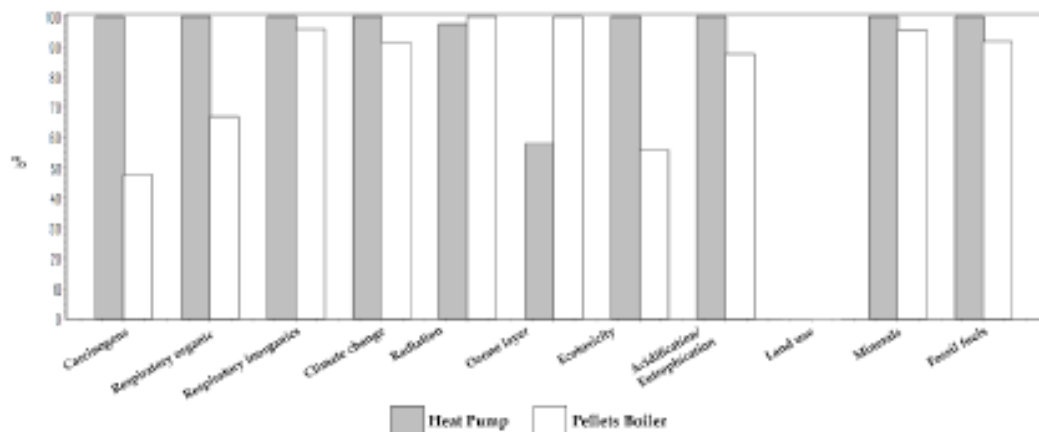
\*\*\*Climatic resources, geological and geographical features. (Biodiversity)

#### 4. Results

**4.1.1. Eco-Indicador99 Method results.** It have been obtained global results and proceed to compare the different impact categories.

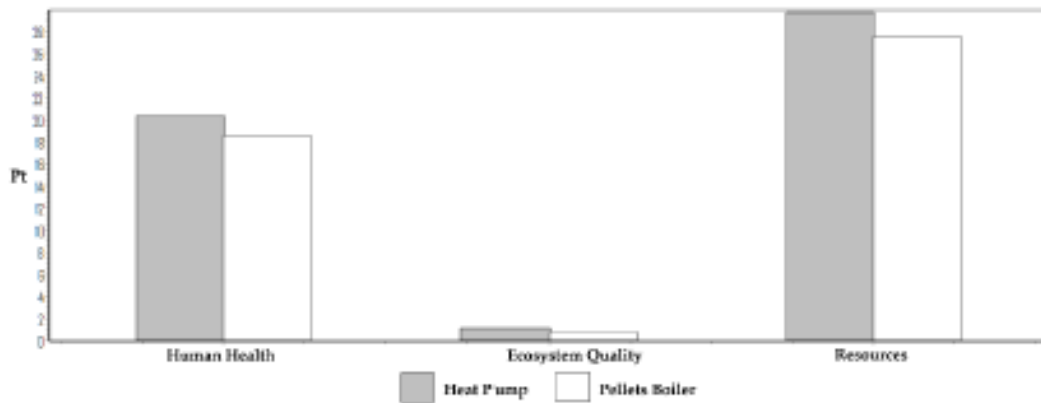
**Characterisation.** In this method eleven damage categories can be study and they are measured in different units. The figure 7 shows the comparative diagram and it can be performed a first analysis of the results. System 1 (heat pump) has greater impacts on 8 indicators, while the system 2 (pellets boiler) exceeds it by 2 (radiation and ozone layer).

Figure 7. Comparative analysis of impact indicators according to the Eco-indicator99 (E) V2.10/Europe EI 99 E/A /Characterisation



**Weighting.** The three categories, human health, ecosystem quality and depletion of damaging resources have different units [31] [32]. The calculation of values of normalization is based on emissions data measured in various European countries, and then carry out an extrapolation at European level to estimate the total European emissions per year/inhabitant. Figure 8.

Figure 8. Comparative between the two systems to Eco-indicator99 (E) V2.10/Europe EI 99 E/A / Weighting



Single score. In this step, the relative importance of each category of impact is determinate. The unit called the Eco-point indicator (Pt) is used. It should be noted that the absolute value is not very relevant, because the main objective is to compare the relative differences between the products or components.

Figure 9. Comparative using the Eco-indicator (E) V2.10 / Europe EI 99 E/A Single Score

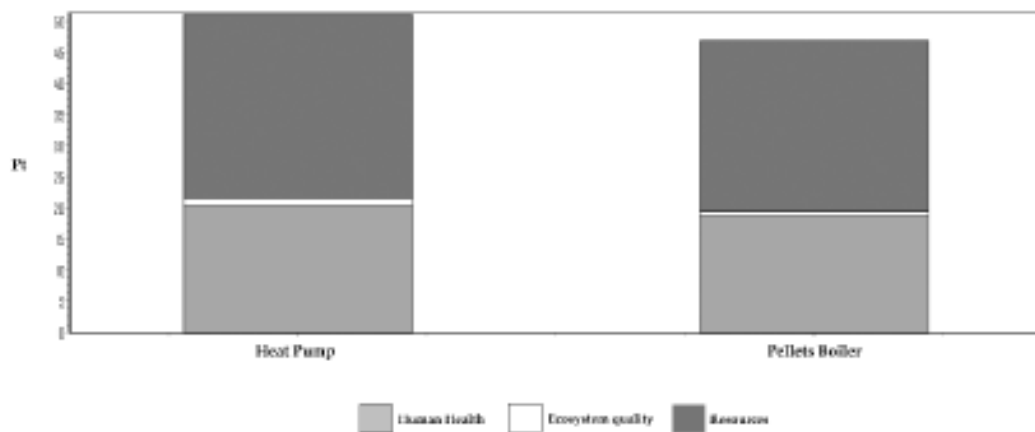


Table 8 summarizes the obtained values for the systems and the % of products that cause the greatest environmental impact, obtained through the single score.

Table 8. More affected categories and the more weighed factors related to the Energetic consumption (Eco-indicator99)

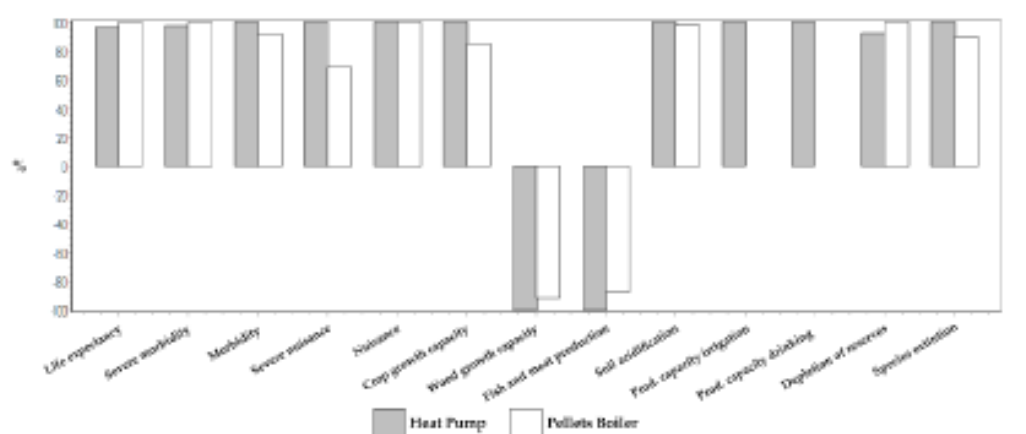
| Damage Category                            | Units (Pt) Bomb | Units (Pt) Boiler | % of the greater environmental impacts   |
|--|-----------------|-------------------|--|
| Inorganic substances (respiratory effects) | 60,91           | 63,94             | Emissions to the air<br>NO <sub>x</sub> (45,23%), SO <sub>x</sub> (42,56%), Particulate <10um (12,21%) |
| Combustibles                               | 66,93           | 50,76             | Mining   |

|                 |       |       |  |
|-----------------|-------|-------|--|
|                 |       |       | Petroleum (60,55%), Natural gas (23,54%), Coal (15,91%)  |
| Carcinogenesis  | 30,99 | 64,42 | Emissions al water<br>As (12,78%), Ni (3,45%), Phenol (2,34%)<br>Emissiones al aire<br>As (44,55%), Ni (26,65%), Cd (10,23%) |
| Climatic Change | 27,05 | 23,20 | Emissiones al air<br>CO <sub>2</sub> (78,56%), CH <sub>4</sub> (12,55%), HCFC-22 (8,89 %)                                    |

#### 4.1.2. EPS2000 Method results.

In Figure 10 it can observe how it have been obtained very similar results of environment impact between two systems, and show two negative values due to the renewable nature of the systems and the fuel used as heat generation. The graphic shows process units with negative characterization factors (%). They are wood growth capacity and fish and meat production Information related to thirteen environmental indicators are obtained too.

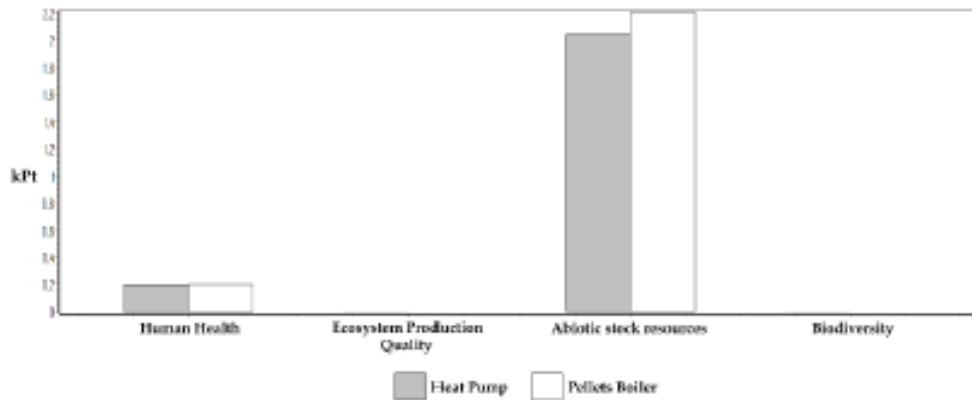
Figure 10. Comparative contribution with the methodology EPS2000 V2.08/ EPS /Characterisation



**Weighting.** For the four categories, which this methodology considers, ecosystem quality, human health, natural resources and depletion of the resources, it have been obtained obtain the necessary information in figure 9. In this method, the weighting is performed through valuation. Environmental reference is the current state of the environment, being ELU (environmental loading unit) the indicating unit. This methodology allows an anticipated study of the systems to the obtaining of a better design and additional information with regard to the choice of the systems.

Figure 10 indicates the greatest impact takes place in the reduction of abiotic resources and corresponds to the biomass boiler system. The other category of important impact would be human health, being the impacts practically negligible in the quality of ecosystems and biodiversity.

Figure 11. Consideration with EPS2000 Method V2.08 /EPS/ Weighting



**Single score.** In this step, the relative importance of each category of impact is determinate. A unit called Eco-point indicator (kPt) is used. It should be taken into account that the absolute value of the points is quite irrelevant, as the main aim is to compare relative differences between the products or components. Figure 12.

Figure 12. Single puntuation with Method EPS2000 V2.08 /EPS/ Single Score

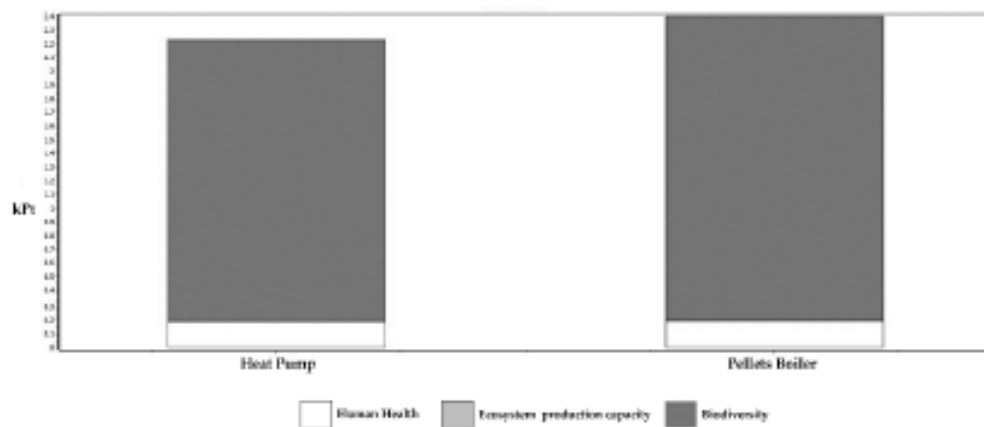


Table 8 shows the values for the methodology, as well as the products they produce these impacts.

Table 9. Most significant values of environmental impacts (EPS2000)

| Damaged Categories      | Units (kPt)<br>Bomb | Unit (kPt)<br>Boiler | % of the greater environmental impacts  |
|-------------------------|---------------------|----------------------|---|
| Human health            | 0,195               | 0,215                | Emissions to air<br>CO <sub>2</sub> (60,15 %), PAH Polycyclic aromatic hydrocarbons (66,5%) |
| Exhaustion of Resources | 2,05                | 2,28                 | Mining<br>Petroleum (62,55%), Coal (22,98%),<br>Natural gas (14,47%)                        |

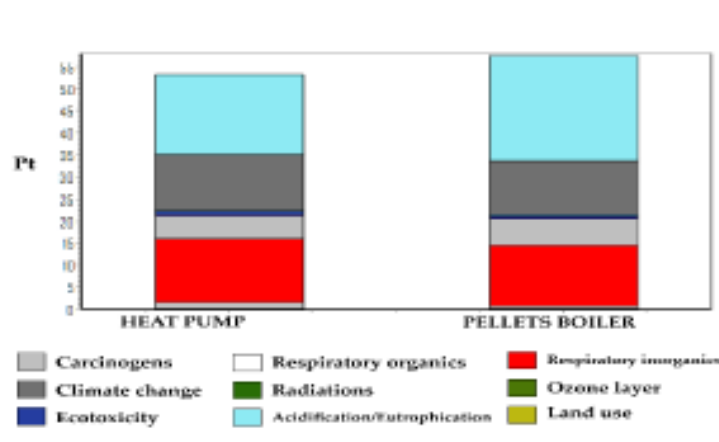
#### 4. Discussion

Once the results on environmental impacts of two systems of heat production are obtained and carrying out a study by using two methodologies, it can be analyze and determine the most significant conclusions. To simplify results, contributions to environmental impact indicators, the values have been sorted into four groups. The performed analysis included the different stages of life of each one of the constituents of the heat pump and boiler, but it must be borne in mind that the variation of conditions of their use as well as the length of operational lifetime may change the results.

As common point to the results obtained thought both methodologies, it can be determine, according Figure 12 that energetic consumption in the form of electricity is the most relevant factor for the LCA heat pump, being the impact in biomass boiler lower, due to the use of pellets combustion material. On the other hand, air emissions to the atmosphere produced by the boiler system are quite more significant than in a heat pump.

The Eco-indicator99 indicates that the consumption of fossil resources are the 41.92 % for biomass boiler and a 34.34% for heat pump, and are the main impact factor, which is increased to 58.3% with the consumption of minerals, respiratory effects caused by inorganic substances air emissions such as SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub>, together with climatic change due to CO<sub>2</sub> emissions, which show higher values for biomass boiler system with a value of 23.6%. Finally, with lower values, carcinogenic, with a 5.10%, due to heavy metals emissions in air and water. The quality of ecosystems is mainly affected by Ecotoxicity (4%), acidification and eutrophication (1.8%) and land occupation (0.2%). Damages caused by Ecotoxicity are chiefly because of heavy metals emissions in air and water, while the damages by acidification and eutrophication are principally owing to NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> emissions.

Figure 13. Relative importance system with the Eco-indicator99 (E) V2.10 /Europe EI99E/A /Single score

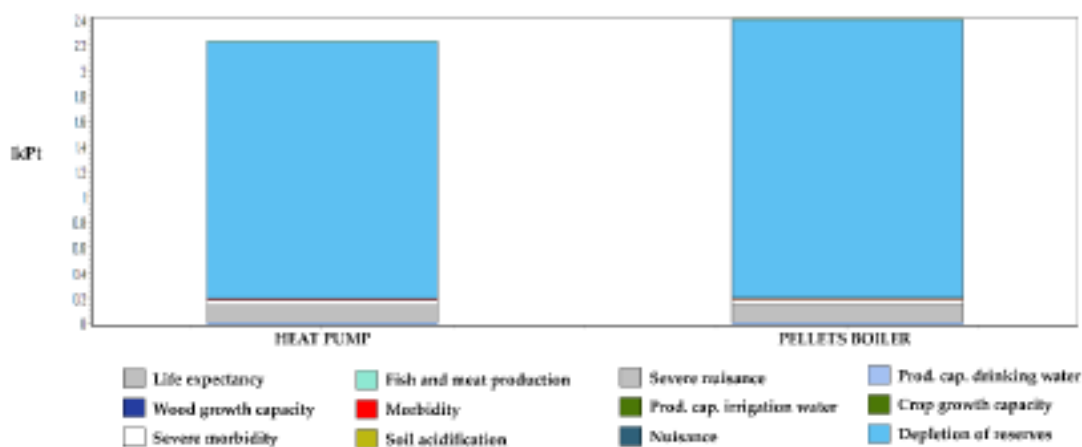


Another negative factor of the heat pump system are the copper minerals (mainly present in batteries and pipes) which represents the elements with greater weight, as well as the impact on the reduction of the ozone layer, which has been reduced with respect to other studies [33], with a 22% of the contributions because of the use of R410a coolant.

EPS2000, on the basis of figure 14, it can be taken into account that the results are quite similar for both systems. Highlighting the energy consumption, the use of the coolant, CO<sub>2</sub> emissions to the atmosphere and the use of resources for their manufacture, as aspects of greater impact. The variation in the climatic conditions is an important point to take into account, since it directly affects the consumptions of the heat pump system and therefore depletion of reserves impacts.

According to this methodology, and unifying the similar values for both systems, the main damage take place with the exhaustion of resources during the manufacturing and their operation, reaching 72% of the total contribution. Life expectancy implies of the 6.22%, principally affected by CO<sub>2</sub> emissions during the generation of electricity, while the severe morbidity represents only 3% of the total.

Figure 14. Relative importance system with method EPS2000 v2.08/EPS/Single Score



## 5. Conclusions

The building sector and specifically the tertiary buildings have one of the greatest influences in Climate change. For this reason, this comparative research LCA is carried out. The study, analysis and redesign of energy production systems in this sector could reduce their emissions and reduce their environmental impact. [34]. LCA methods with two methodologies has been used in the present work to determine the impacts of two systems of production of heat, a heat pump system and a biomass boiler system. Despite different methodologies used, the result has confirmed that:

1. Similar impacts occur in the systems, appearing differences in individual components. [35].
2. The main damage of the two systems take place during the manufacture and operation of the boiler pellet, in the category of resource depletion, as well as CO<sub>2</sub> emission, which causes climate change.
3. In addition it have been obtained impacts on human health, respiratory effects caused by the emission into the air of inorganic substances such as SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> and carcinogenesis that are practically are similar in the two systems.
4. There are significantly different in specific aspects like the use of material, product or fuel, as for instance, coolant, oils or pellets.
5. In response to % of mayor value, it can affirm that the pellet boiler cause higher impacts during its manufacture, because of great quantities of materials and energy for the manufacture of their components, as well as the necessary extraction of resources, rising CO<sub>2</sub> emissions. While other minor impacts are, on life expectancy and the use of coolant in the heat pump.

## References

- [1] IEA (International Energy Agency). Energy Efficiency Market Report 2015, OECD/IEA, 2015.
- [2] Edwards, B. *Rough guide to sustainability*. 3rd ed. RIBA Enterprises, London, 2010.
- [3] European Commission, Communication from the Commission. Europe. 2020-A Strategy for Smart, Sustainable and Inclusive Growth, Brussels, 3.3.2010 COM, 2010, 2020 final.

- [4] Chr. Lamnatou, D. Chemisana. Concentrating solar systems: Life Cycle Assessment (LCA) and environment issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.065>.
- [5] Análisis de diversas metodologías de evaluación del impacto del ciclo de vida. Vivanco Bono, JL.; Collado Ruiz, D.; Bastante Ceca, MJ.; Gómez Navarro, T.; Capuz Rizo, S. Departamento de Proyectos de Ingeniería. Universidad Politécnica de Valencia. [vvivanco@dpi.upv.es](mailto:vvivanco@dpi.upv.es).
- [6] Ferguson G. Subsurface energy footprints. *Environ Res Lett* 2013; 8(1). Art. No.014037. Cherubini F, Bright RM, Strömman AH. Global climate impacts of forest bioenergy: what, when and how to measure? *Environ Res Lett* 2013; 8(1) art.no.014049.
- [7] European Commission (EC), On Resource Efficiency Opportunities in the Building Sector, COM, Brussels, 2014, Available, <http://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/SustainableBuildingsCommunication.pdf>
- [8] ISO 14000. <https://www.aenor.com/certificacion/medio-ambiente/gestion-ambiental>.
- [9] F. Quinteiro, L. Tarelho, P. Marques, M. Martín-Gamboa, F. Freire, L. Arroja y A. Cláudia Dias. «Life cycle assessment of wood pellets and wood split logs for residential heating». *Science of the total environment*. Elsevier. 2019.
- [10] A. Schreiber, J. Marx y P. Zapp. «Comparative life cycle assessment of electricity generation by different wind turbine types». *Journal of cleaner production*. Elsevier. 2019.
- [11] J. Antonanzas, M. Arbeloa-Ibero y J.C. Quirán. «Comparative life cycle assessment of fixed and single axis tracking systems for photovoltaics». *Journal of Cleaner Production*. 2019.
- [12] P. Fullana y R. Puig. Análisis de Ciclo de Vida, Barcelona, España: Rubes, 1997, p. 144
- [13] I. P. o. C. Change, *Climate Change*, Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.
- [14] Catálogo técnico de la empresa Mitsubishi. <https://es.mitsubishielectric.com/es/>
- [15] IDAE. (2016). Ministry of Industry, tourism and commerce. Technological map: renewable heat and cold. Technology area: biomass and waste. <http://www.idae.es/>
- [16] F. J. Rey, J. Martín-Gil, E. Velasco, D. Pérez, F. Varela, J. M. Palomar y M. P. Dorado, «Life cycle Assessment and External Environmental Cost Analysis of Heat Pumps,» *ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE*, vol. 21, nº 5, 2004.
- [17] Study of the Technical Feasibility of Increasing the Amount of Recycled Concrete Waste Used in Ready-Mix Concrete Production. Fraile-García, E.; Ferreiro-Cabello, J.; López-Ochoa, L.M.; López-González, L.M. *Materials*. 2018.10, 7, 817, DOI: 10.3390/ma10070817.
- [18] Ruiz Amador, Diego; Zúñiga López, Ignacio. Análisis de ciclo de vida y huella. UNED. ISBN-13: 978-8436265637.
- [19] RITE, Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios y sus instrucciones complementarias., Decreto 1027/2007, 31 de julio. Directiva 1751/1998.
- [20] Technical documentation of manufacturer. <https://www.domusateknik.com/es/gestor/recursos/uploads/.../catalogos/.../bioclass.pdf>
- [21] Díaz-García, A.; Martínez-García, C.; Cotes-Palomino, T. Properties of Residue from Olive Oil Extraction as a Raw Material for Sustainable.
- [22] L. Paolotti, G. Martino, A. Marchini, A. Boggia. Economic and environmental assessment of agro-energy wood biomass supply chains. *Biomass and bioenergy*. 2017. 0961-9534 Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.020>.
- [23] M.C. McManus. Life cycle impacts of waste wood biomass heating systems: a case study of the three UK based systems. 2010. Elsevier. 0360-5442/\$. <http://10.1016/j.energy.2010.06.014>
- [24] Lamnatou, C.; Lecouvreux, B.; Chemisana, D.; Cristofari, C.; Canaletti, JL. Concentrating photovoltaic/thermal system with thermal and electricity storage: CO<sub>2</sub>e emissions and multiple environmental indicators. *Journal of Cleaner Production*. 2018. 192, 376-389. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.205.
- [25] Souliotis, Manolis; Arnaoutakis, Nektarios; Panaras, Giorgios; Kavga, Angeliki; Papaefthimiou, Spiros. Experimental study and Life Cycle Assessment (LCA) of hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) solar system for domestic applications. *Renewable Energy*. 2018. DOI: 0960-1481. [Hppsts://foi.org/10.1016/j.renene.2018.04.011](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.011).

- [26] Pieragostini, C.; Mussati, M.C.; Aguirre, P. On process optimization considering LCA methodology. *Journal of Environmental Management* 2012, 96, 43-54. DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.10.014.
- [27] Jolliet, O.; Margni, M.; Charles, R.; IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2003, 8, 324. DOI: 10.1007/BF02978505.
- [28] Steen, B. (1999b). A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000. General system characteristics. Gothenburg, Chalmers University of Technology, p.67. Disponible en [http://pre.nl/simapro/impact\\_assessment.methods.htm](http://pre.nl/simapro/impact_assessment.methods.htm).
- [29] M. Goedkoop y R. Spriensma, «Teh eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment: Methodology annex. 17 april.» p. 142, 2000<sup>2</sup>.
- [30] Laso, J.; García-Herrero, I.; Margallo, M.; Vázquez-Rowe, I.; Fullana, P.; Bala, A.; Gazulla, C.; Irabien, A.; Aldaco, R. Finding an economic and environmental balance in value chains based on circular economy thinking: An eco-efficiency methodology applied to the fish canning industry. *Resources Conservation and Recycling*. 2018, 133, 428-437. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.02.004.
- [31] Marique, Anne-Francoise; Rossi Barbara; Cradle-to-grave life-cycle assessment within the built environment: Comparison between the refurbishment and the complete reconstruction of an office building in Belgium. *Journal of Environmental Management*. 2018. DOI: 0301-4797. [Hpppt://doi.org/10.1016/j.envman.2018.02.055](https://doi.org/10.1016/j.envman.2018.02.055).
- [32] Bare JC, Hofstetter P, Pennington DW, de Haes HAU (2000) Midpoints versus endpoints: the sacrifices and benefits. *Int J Life Cycle Assess* 5(6):319-326.
- [33] Kumbhar, S.; Kulkarni, N.; Rao, A.B.; Rao, B. 4<sup>th</sup> International Conference on Advances in Energy Research (ICAER 2013). Indian Inst Technol Bombay, Dept. Energy Sci & Eng. 2014, Mumbai, INDIA. 54, 260-269. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.07.269.
- [34] D. Ruiz, G. San Miguel, B. Corona, F.R. López. LCA of a multifunctional bioenergy chain based on pellet production. 2017. 00167-2361. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.050>.
- [35] Construction Materials. Part I: Physical Properties. *Materials*. 2017, 10, 2. 100. DOI: 10.3390/ma10020100.

## 7.2. Artículos publicados relacionados con la sostenibilidad en la edificación y la industria.

### 7.2.1. Multi-objective optimization and life cycle Assessment of eco-friendly cryogenic N<sub>2</sub> assisted turning of Ti-6Al-4V.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.334>



### Multi-objective optimization and life cycle assessment of eco-friendly cryogenic N<sub>2</sub> assisted turning of Ti-6Al-4V

Mozammel Mia<sup>a</sup>, Munish Kumar Gupta<sup>b, c, \*</sup>, Jose Adolfo Lozano<sup>d</sup>, Diego Carou<sup>d</sup>, Danil Yu. Pimenov<sup>e</sup>, Grzegorz Królczyk<sup>f</sup>, Aqib Mashood Khan<sup>g</sup>, Nikhil Ranjan Dhar<sup>h</sup>

<sup>a</sup> Mechanical and Production Engineering, Al-Sunallah University of Science and Technology, Dhaka 1208, Bangladesh

<sup>b</sup> Mechanical Engineering Department, National Institute of Technology, Hamirpur, India

<sup>c</sup> Department of Mechanical Engineering, Chandigarh University, Gharuan, Mohali, Punjab, India

<sup>d</sup> Department of Mechanical and Mining Engineering, University of Jaén, EPS de Jaén, Campus Las Lagunillas, 23071, Jaén, Spain

<sup>e</sup> Department of Automated Mechanical Engineering, South Ural State University, Lenin Prosop. 76, Chelyabinsk, 454080 Russia

<sup>f</sup> Opole University of Technology, 76 Proszkowska St., 45-758 Opole, Poland

<sup>g</sup> College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

<sup>h</sup> Industrial and Production Engineering, Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka 1000, Bangladesh

#### ARTICLE INFO

**Article history:**  
Received 19 July 2018  
Received in revised form 2 October 2018  
Accepted 30 October 2018  
Available online 2 November 2018

**Keywords:**  
Eco-friendly machining  
Clean production  
Cryogenic cooling  
Multi-response optimization  
Life cycle assessment  
Ti-6Al-4V

#### ABSTRACT

Modern manufacturing industries thrive for energy efficient, clean and sustainable machining processes. However, achieving these objectives becomes difficult especially in machining Ti-6Al-4V as it retains its properties at high temperature. Cryogenic liquid nitrogen (LN<sub>2</sub>) is a clean machining environment that has potential to improve the machinability performance for Ti-6Al-4V. LN<sub>2</sub> promotes sustainability and facilitates low carbon emission. Orientation and number of employed LN<sub>2</sub> jets influence the cutting energy, quality and productivity. Moreover, a balance between energy consumption and quality-productivity is required for sustainable production. In this respect, this research work studies the cutting force, specific energy, temperature, surface quality (i.e. surface roughness), and material removal rate under the impingement of LN<sub>2</sub> as mono-jet and dual-jets. This study has three parts: evaluation of the role of factors on the output parameters, optimization of parameters, and lastly the life cycle assessment (LCA) of cryogenic LN<sub>2</sub> assisted machining. Owing to irreconcilable nature of single-objective optimization, multi-response optimization was conducted using Grey-Taguchi integrated approach. It was found that LN<sub>2</sub> dual-jets were most effective in reducing the specific energy consumption and temperature, and improving surface quality. This can be attributed to the faster and effective heat removal by LN<sub>2</sub> from the critical interfaces. Other optimum parameters were cutting speed of 140 m/min and feed rate of 0.16 mm/rev. It was found that LCA showed that there is a clear relation between cooling strategy and environmental aspects such as resources, energy, human health, and biodiversity, etc. that directly affects the machining performance of Ti-6Al-4V alloy.

© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

#### 1. Introduction

In today's growing industrial scenario, the machining of titanium super alloys especially Ti-6Al-4V alloy is trending out as an emerging field (Gupta et al., 2016). Several important

characteristics such as high strength, but less weight, biocompatibility, etc. increase the application of titanium alloys in aerospace, automobile and medical sector (Al-Ghamdi et al., 2014; Gupta et al., 2016b). However, titanium alloys are generally considered as difficult-to-machine materials owing to their numerous intrinsic characteristics specifically the generation of high stresses at tool tip, high chemical affinity, built-up-edge formation, poor thermal conductivity, etc. in machining operations (Gupta et al., 2016; Mia and Dhar, 2018). Therefore, the improvement in machining characteristics of titanium alloys is an open area or hot topic of research for academicians, practitioners and researchers (Carou et al., 2017; Gupta et al., 2017; Gupta and Sood, 2017).

\* Corresponding author. Department of Mechanical Engineering, Chandigarh University, Gharuan, Punjab, India.

E-mail addresses: mozammelmiap@gmail.com (M. Mia), munishguptanit@gmail.com (M.K. Gupta), josefomi@hotmail.com, diecapor@gmail.com (J.A. Lozano), danil\_u@rambler.ru (D.Yu. Pimenov), g.krolczyk@p.o.opole.pl (G. Królczyk), aqib@nsaa.edu.cn (A.M. Khan), nrdhar@pebuet.ac.bd (N.R. Dhar).

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.334>  
0959-6526/© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Lately, the research scientists have shifted their focus towards clean, green and sustainable manufacturing (Mia et al., 2018a). Energy, quality and productivity are three uncompromising dimensions in today's sustainable manufacturing world (Yi et al., 2018). The national and international obligations on energy utilization compel the manufacturer to be energy efficient and, consequently, they are searching for alternative manufacturing methods in which less energy is consumed (Watson and Tamingir, 2018). Similarly, while instilling methods of production, from business perspective, the quality of the produced goods must be acceptable. Any product produced otherwise will be reworked or destroyed, causing an extra cost to manufacturer. Lastly, the productivity, generally defined as multiplication of efficiency, utilization, and quality (Laperrière and Reinhart, 2014), is used to measure the efficiency of a manufacturing system.

Approximately 20% of total consumed annual worldwide energy is utilized in manufacturing (Zhou et al., 2016); in addition, this sector is responsible for significant amount of global carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emission. In manufacturing, machining operation performed by machine tool consumes substantial amount of energy; besides this, the use of conventional cooling and lubrication (C/L) system induces environmental degradation and health problems of machine tools' operator. Further, the implementation of cutting fluids in machining operation increases the economic burden on machine tool manufacturer. In worldwide survey report, the total consumption of cutting fluids (neat cutting oils and water-based emulsions) during machining operations reaches beyond the two billion liters (Pervaiz et al., 2018). Similarly, from the economic point of view, the accessories such as pump, regulators, pipes, tank used for cutting fluids occupy the costly machine shop area and consume a good amount of energy. There is also a problem in the disposal of cutting fluids because their ingredients deteriorate with time. In addition, if the disposal treatments of cutting fluids are not properly accomplished, then the harmful constituents in terms of bacteria and fungi are grown in the cutting fluids and thereby lead to dermatological diseases among the workers. One another report survey stated that thousand liters of cutting fluid are wasted every year by large manufacturing units (Pervaiz et al., 2018). Hence, the researchers are searching for machining methods which are (1) energy efficient and (2) eco-friendly, and (3) sustainable.

Recently, various well known eco-benign cooling/lubrication strategies i.e., dry machining, minimum quantity lubrication (MQL) (Gupta and Sood, 2017), and cryogenic cooling (Mia, 2017), etc. have been implemented in different machining operations (such as drilling, turning, milling, and grinding). Dry machining is a basic type of machining process in which the cutting operation has been performed without implementing any type of cutting fluid. It is a very popular sustainable method that minimizes the negative or hazardous impact of harmful cutting fluids during machining operation (Kroczek et al., 2017). On same context, the MQL system is preferred because of the consumption of minute quantity of cutting fluid (up to 200 ml h<sup>-1</sup>) (Singh et al., 2018). Singh et al. (2018) implemented the MQL system in milling of Inconel-718 alloy. Gupta and Sood (2017) also compared the performance of MQL with dry and flood cooling during machining of Inconel-800 alloy. Similarly, Kadam and Pawade (2017) worked on the application of MQL strategy in machining of Inconel-718 alloy. Sarikaya and Güllü (Sarikaya and Güllü, 2015) used the MQL technique of cooling-lubrication to improve the machinability of superalloy i.e. Haynes 25 by performing an experimental investigation and optimization. They have reported an excellent machinability by the use of MQL under optimized parameters. As can be seen all have claimed that the results were very promising when the MQL was applied to the cutting zone. No doubts, MQL has outperformed dry machining and significantly enhanced the surface integrity and tool

life (Davim et al., 2015). However, the complete neatness is compromised with MQL assisted machining due to existence of liquid (i.e. residual oil) over the work specimen and, for biomedical components, these oil particles need to be completely removed and surface has to be completely clean and dry. Therefore, for obtaining clean workpieces and overcome the problems of cutting fluids, cryogenic liquid nitrogen (LN<sub>2</sub>) cooling emerges out as a suitable alternative (M.K. Gupta et al., 2016; Mia and Dhar, 2018). Cryogenic LN<sub>2</sub>, a cooling/lubrication (C/L) method significantly proved to be more eco-friendly than conventional liquid based flood C/L system. They have the potential to reduce the adverse thermal influences, associated heat removal, and energy consumption reduction, respectively. In cryogenic condition, employment modes of the C/L jet are likely to influence the above requirements; and, this is done in this work by exploiting the influence of C/L jet (s) on energy, quality and productivity (Bagherzadeh and Budak, 2018).

The research efforts on eco-friendly cooling/lubrication strategies have been already emphasized by many scientific groups around the world. From recent investigations, Bagherzadeh and Budak (2018) implemented the MQL and cryogenic cooling in machining of Ti-6Al-4V titanium alloy and Inconel-718 alloy. They suggested that both these cooling strategies are considered in the category of sustainable manufacturing, but the cryogenic cooling is more environment friendly and significantly reduces tool wear, surface roughness and tool-tip temperature. In another recent work, Ucak and Cicek (Ucak and Çiçek, 2018) performed drilling experiments on Inconel-718 alloy under dry, wet and cryogenic cooling conditions. The effect of constant cutting parameters on cutting forces, temperature, tool wear and hole quality have been discussed under the abovementioned cooling/lubrication conditions. The experimental results suggested that the cryogenic cooling performs better than dry and wet cooling conditions. One novel investigation of Lequien et al. (2018) analyzed the thermal phenomena at tool-chip interface during machining of titanium alloy under cryogenic cooling conditions. Various parameters of cryogenic cooling such as pressure of nitrogen jet, internal diameter of nozzle, angle of projection, and nozzle to workpiece distance are considered in the work. From another research work, Bordin et al. (2017), employed the dry and cryogenic condition in machining of Ti-alloy and compared the machinability performance. Tool wear, surface integrity and chip characteristics are discussed with the effect of constant cutting speed and feed rate. Their outcomes clearly suggest that cryogenic cooling seems to be more eco-friendly and enhances process performance as compared with dry and traditionally flood cooling method. Similarly, Behera et al. (2017) have pioneered their experimental work on machining of Inconel-718 super alloy under high pressure coolant, cryogenic, MQL and nano-fluids with MQL cooling conditions. The influence of cutting speed, feed rate and rake angle on tool wear, cutting forces and surface integrity are investigated in this work. The overall results suggested that cryogenic cooling enhances the machining performance and notably preferred as an environmental friendly cooling strategy. In another scientific work, Danish et al. (2017) also performed a thermal analysis in turning of AZ31 magnesium alloy. In this work, dry and cryogenic conditions were considered as a cooling conditions and the effect of machining parameters have been discussed. The outcomes suggested that cryogenic cooling reduces the cutting temperature upto 60% and surface roughness upto 56% as compared with dry machining. On same context, the research group of Jawahir et al. (2016) presented a very good review article on different cryogenic manufacturing process. Various performance aspects such as surface integrity, tribological and the thermo-mechanical (during machining, forming and grinding) specially related to the cryogenic cooling are well covered in this review article. Some other aspects from sustainability point of view such as

economic, safety and health are also discussed.

In literature summary, it has been observed that dry machining and cryogenic liquid nitrogen machining are considered as two sustainable strategies and gained much attention from the research community. Besides, the applications of these two methods are well reported in the literature, but still not much experimental as well as optimization work is found which completely provide a full understanding of Ti-6Al-4V titanium alloy process mechanisms under dry and cryogenic liquid nitrogen machining conditions. In addition, the literature notably suggested that most of the experimental work is performed under constant cutting conditions and proper sustainability assessments are missing in their works. Therefore, the motivation of the current experimental work is to provide a comprehensive experimental study that allows obtaining the best optimal parameters setting of specified alloy considering eco-friendly cooling/lubrication conditions. The turning tests were performed by following the well-known experimental design method i.e., Taguchi L27 Orthogonal array and cutting speed, feed rate and cutting conditions (dry, and LN<sub>2</sub> mono jet and dual jet) as input variables. Furthermore, the influence of these parameters on cutting force, machining temperature, surface roughness, specific cutting energy and material removal rate are investigated with contour plots. Afterward, the multi-response optimizations of process parameters are performed with Grey Relational Analysis (GRA). In a nutshell, the well efficient sustainability analysis i.e., Life cycle assessment (LCA) is implemented eventually in the context of cleaner production. The main motive of this analysis is to explore the machining process with respect from the environmental point of view and various aspects in terms of specific cutting energy (CE), human health, resources, biodiversity etc. are covered in this analysis (Fratila, 2010). The other researchers also implemented this analysis in various other sectors like automobile (Lopes Silva et al., 2018), integrated circuits (Alcaraz et al., 2018), plastic film wastes industries (Hou et al., 2018). The complete details of these implemented methodologies are described in the subsequent sections.

## 2. Working methodology

### 2.1. Experimental conditions

Ti-6Al-4V alloy of grade 5 was used in the machining operations performed in a center lathe (China, Power 75 kW). The composition of the material was: Al (6.34%), V (4.12%), Fe (0.04%), O (0.014%), C (0.014%), N (0.009%), H (0.0023%) and Ti (balance %), and the micro-structure is shown in Fig. 1 (Sales et al., 2017); whereas the cutting tool was multi-layered TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN coated WC insert. Note that the used tool had ISO designation SNMG 120408: the shape was square, the clearance and rake angles were 0°, both sides chip breaker, and nose radius was 0.8 mm. Based on the suggestions of Yigit et al. (2008) that the coated tools provide sufficient lubrication in the tool-work interface, this tool was used. In each experimental run, a new tool insert was used in order to eschew the influence of tool wear of previous run on the subsequent run.

Three cutting conditions were used during the turning process i.e. dry condition, mono-jet of cryogenic liquid nitrogen and dual-jet of cryogenic liquid nitrogen. In dry condition, no external cooling and lubrication is used, whereas in mono-jet condition the LN<sub>2</sub> jet was impinged at the rake surface of the cutting while in the dual-jets the jets were impinged concomitantly at the rake surface and flank surface. These three conditions have been granted as the inputs to the optimization so as to exploit the role of cryogenic cooling as well as to decide the best cutting environment through appropriate mathematical optimization. The initial temperature of the cryogenic fluid jet was -196 °C and the exit temperature was

ambient temperature. The mono-jet LN<sub>2</sub> was delivered to the rake surface by using a straight nozzle (Fig. 2(a)) of diameter 1.0 mm and the dual jets LN<sub>2</sub> were applied by using a newly designed and fabricated nozzle system in which two narrow orifices have diameter 0.5 mm (Fig. 2(b)); in both cases, the LN<sub>2</sub> was drawn from a pressurized Dewar (50 bars). In later system, a flexible pipe is connected between the Dewar to the inlet of the fabricated novel nozzle, inside which the single jet is split into two jets through the internal channel eventually reaching to machining interfaces.

The optimization is performed in terms of the cutting speed, feed rate and machining conditions. Furthermore, these input control factors are divided into three levels each, as it can be seen in Table 1. In the longitudinal turning runs, the cutting depth was kept constant at 1.0 mm. Though machining of Ti-6Al-4V with cutting speed above 100 m/min is difficult, due to the use of cryogenic LN<sub>2</sub>, the present study has been planned with cutting speed of 80–140 m/min. The optimizing quality characteristics were main cutting force ( $P_2$ ), chip-tool interface temperature ( $\theta$ ), average surface roughness ( $R_a$ ), specific cutting energy (SE) and material removal rate (MRR). The first three were measured and the latter two were computed from analytical relations. The choice of these outputs was based on the fact that the main cutting force appreciably influences the machining mechanics, chip-tool interface temperature represents the thermal condition of the cutting zone, surface roughness is a representative index of product quality in any machining process, specific energy determines the energy requirement in which the removal of material and is a key sustainability parameter and, lastly, the material removal rate indicates the productivity of an operation.

The main cutting force was measured during each machining run by using Kistler dynamometer (Model: 9257b); temperature at the chip-tool junction was measured by using a tool-work thermocouple and, finally, surface roughness was measured by using Talysurf (Surtronic 3<sup>+</sup>) roughness checker. All three responses were measured three times, that is, three readings were received per machining run and, subsequently, the mean is calculated and used in this paper. The setup of tool-work thermocouple is shown schematically in Fig. 3. The correlation coefficient of the emf and temperature reading was found to be 0.9995, justifying the acceptability of the tool-work thermocouple.

Owing to its wide acceptability (i.e., more than 50% usage) in industrial domain to evaluate the surface quality, the average surface roughness parameter ( $R_a$ ) is considered in this study over other

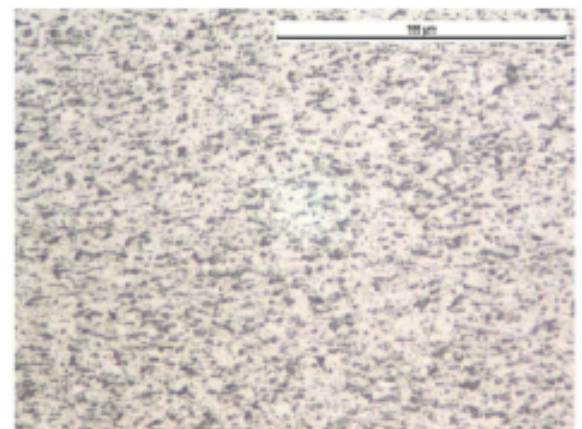


Fig. 1. Micro-structure of Ti-6Al-4V.

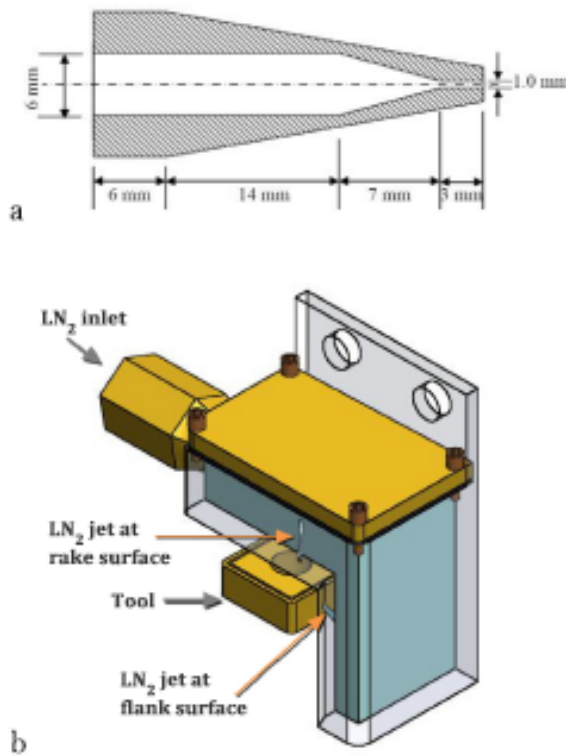


Fig. 2. Used nozzle systems (a) mono-jet nozzle (b) dual-jet nozzle system.

parameters of surface roughness (Sanz et al., 2013). It is defined by the average (arithmetic mean) of the variations present in a surface profile. This is counted as in absolute value and calculated with respect to center line. Mathematical definition of  $R_a$  is shown in Eq. (1).

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \quad (1)$$

The definition of specific cutting energy (SE) states that the SE is the amount of energy required to remove unit volume of material and it is therefore computed from cutting force and cutting parameters by using Eq. (2). Similarly, the material removal rate (MRR) in turning is computed from Eq. (3).

$$SE = \frac{P_2}{f \times a_p} \quad (N/mm^2) \quad (2)$$

$$MRR = v_t \times f \times a_p \quad (mm^3/min) \quad (3)$$

The number of experimental runs was determined by using the

Table 1  
Control factors in the optimization work.

| Factors                      | Level 1 | Level 2                  | Level 3                  |
|------------------------------|---------|--------------------------|--------------------------|
| Cutting speed, $v_c$ (m/min) | 80      | 110                      | 140                      |
| Feed rate, $f$ (mm/rev)      | 0.12    | 0.14                     | 0.16                     |
| Cutting conditions, CC       | Dry     | Mono-jet LN <sub>2</sub> | Dual-jet LN <sub>2</sub> |

Taguchi L27 orthogonal array design of experiment. In this case, three levels of cutting speed, feed rate and cutting conditions are interconnected amongst themselves to create  $3^3 = 27$  experimental runs. The design of experiment is listed in Table 2. The experimental and calculated values of the responses are listed in Table 3.

## 2.2. Grey-relational analysis

The Grey Relational Analysis (GRA) is used to simultaneously optimize more than one objective functions (Gupta, 2015; Mia et al., 2018b). Since, in the present study, there are five responses i.e. main cutting force, temperature, surface roughness, specific cutting energy and material removal rate, the GRA multi-objective optimization is employed. GRA works on three principles: minimize a function, maximize a function, concurrently maximize and minimize the function. Notable benefits of GRA are ease of employment, avoidance of complexity in inputs, can deal with complex as well as non-linear behaviour of responses. The GRA converts multiple responses into a single function, and then optimizes the system. This is done in four consecutive steps (Mia et al., 2018b):

**Preprocessing of data:** each response has its own scale which varies from other scale. Therefore, it is required to convert all responses into a single scale by normalization. However, the conversion of scale depends on the objective of the responses. For instance, if the response is to be minimized, then following Eq. (4) and, if the response is to be maximized, Eq. 5 is used to normalize the data in single scale (0–1).

$$y_i(k) = \frac{\max x_i(k) - x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \quad (4)$$

$$y_i(k) = \frac{x_i(k) - \min x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \quad (5)$$

here,  $x_i(k)$  indicates original experimental value of the response,  $y_i(k)$  shows the preprocessed data,  $\max x_i(k)$  and  $\min x_i(k)$  are the maximum and minimum values of the original experimental data, respectively.

**Grey relational coefficient:** the basic relation between the ideal data of response and the experimental data of response is defined by the Grey relational coefficient (Wojciechowski et al., 2018). This value is computed by Eq. (6).

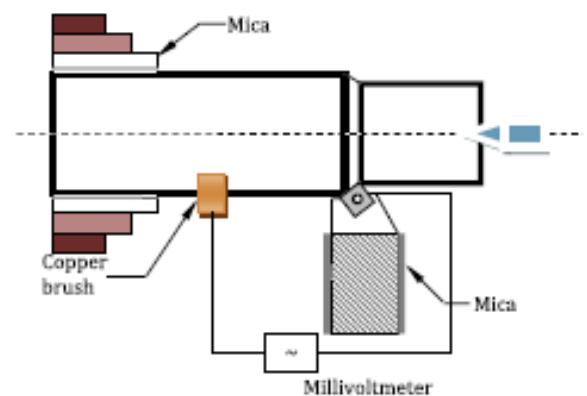


Fig. 3. Setup of tool-work thermocouple.

**Table 2**  
Taguchi L27 full factorial orthogonal array design.

| Sr. no. | Cutting speed, $v_c$ (m/min) | Feed rate, $f$ (mm/rev) | Cutting conditions, CC |
|---------|------------------------------|-------------------------|------------------------|
| 1       | 80                           | 0.12                    | Dry                    |
| 2       | 80                           | 0.12                    | Mono-jet               |
| 3       | 80                           | 0.12                    | Dual-jets              |
| 4       | 80                           | 0.14                    | Dry                    |
| 5       | 80                           | 0.14                    | Mono-jet               |
| 6       | 80                           | 0.14                    | Dual-jets              |
| 7       | 80                           | 0.16                    | Dry                    |
| 8       | 80                           | 0.16                    | Mono-jet               |
| 9       | 80                           | 0.16                    | Dual-jets              |
| 10      | 100                          | 0.12                    | Dry                    |
| 11      | 100                          | 0.12                    | Mono-jet               |
| 12      | 100                          | 0.12                    | Dual-jets              |
| 13      | 100                          | 0.14                    | Dry                    |
| 14      | 100                          | 0.14                    | Mono-jet               |
| 15      | 100                          | 0.14                    | Dual-jets              |
| 16      | 100                          | 0.16                    | Dry                    |
| 17      | 100                          | 0.16                    | Mono-jet               |
| 18      | 100                          | 0.16                    | Dual-jets              |
| 19      | 140                          | 0.12                    | Dry                    |
| 20      | 140                          | 0.12                    | Mono-jet               |
| 21      | 140                          | 0.12                    | Dual-jets              |
| 22      | 140                          | 0.14                    | Dry                    |
| 23      | 140                          | 0.14                    | Mono-jet               |
| 24      | 140                          | 0.14                    | Dual-jets              |
| 25      | 140                          | 0.16                    | Dry                    |
| 26      | 140                          | 0.16                    | Mono-jet               |
| 27      | 140                          | 0.16                    | Dual-jets              |

**Table 3**  
Experimental data.

| Exp. No. | Main cutting force, $F_t$ (N) | Chip-cool temperature, $\theta$ ( $^{\circ}$ C) | Surface roughness, $R_a$ ( $\mu$ m) | Specific cutting energy, $S_c$ (kN/mm <sup>2</sup> ) | Material removal rate, $M_{RR}$ (mm <sup>3</sup> /min) |
|----------|-------------------------------|---|-------------------------------------|--|--|
| 1        | 706.32                        | 790   | 1.35                                | 5.88   | 9.6  |
| 2        | 640.08                        | 710   | 1.28                                | 5.33   | 9.6  |
| 3        | 998.41                        | 650   | 1.12                                | 4.98   | 9.6  |
| 4        | 745.56                        | 848   | 1.48                                | 5.32   | 11.2   |
| 5        | 680.44                        | 804   | 1.4                                 | 4.86   | 11.2   |
| 6        | 647.45                        | 750   | 1.25                                | 4.62   | 11.2   |
| 7        | 774.99                        | 950   | 1.72                                | 4.84   | 12.8   |
| 8        | 709.84                        | 912   | 1.65                                | 4.48   | 12.8   |
| 9        | 686.70                        | 890   | 1.48                                | 4.29   | 12.8   |
| 10       | 657.27                        | 850   | 1.12                                | 5.47   | 13.2   |
| 11       | 605.58                        | 830   | 1.01                                | 5.04   | 13.2   |
| 12       | 968.98                        | 820   | 0.89                                | 4.74   | 13.2   |
| 13       | 696.50                        | 995   | 1.37                                | 4.97   | 15.4   |
| 14       | 644.90                        | 965   | 1.29                                | 4.61   | 15.4   |
| 15       | 998.41                        | 877   | 1.10                                | 4.27   | 15.4   |
| 16       | 745.56                        | 1050  | 1.52                                | 4.66   | 17.6   |
| 17       | 687.72                        | 804   | 1.40                                | 4.29   | 17.6   |
| 18       | 647.45                        | 950   | 1.32                                | 4.05   | 17.6   |
| 19       | 618.03                        | 1017  | 1.16                                | 5.15   | 16.8   |
| 20       | 588.93                        | 966   | 1.05                                | 4.91   | 16.8   |
| 21       | 539.55                        | 910   | 0.72                                | 4.40   | 16.8   |
| 22       | 647.45                        | 1100  | 1.23                                | 4.62   | 19.6   |
| 23       | 697.88                        | 1050  | 1.12                                | 4.27   | 19.6   |
| 24       | 968.97                        | 950   | 0.92                                | 4.06   | 19.6   |
| 25       | 706.32                        | 1150  | 1.43                                | 4.41   | 22.4   |
| 26       | 667.57                        | 1050  | 1.33                                | 4.17   | 22.4   |
| 27       | 608.22                        | 970   | 1.16                                | 3.80   | 22.4   |

$$\hat{\theta}_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \cdot \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \zeta \cdot \Delta_{\max}} \quad (6) \quad \Delta_{\min} = \min_i \min_k \Delta_{0i}(k) \quad (8)$$

Here,  $\Delta_{0i}(k)$  indicates the deviation sequence, and this can be presented as Eqs. (7)–(9):

$$\Delta_{0i}(k) = |y_0(k) - y_i(k)| \quad (7)$$

$$\Delta_{\max} = \max_i \max_k \Delta_{0i}(k) \quad (9)$$

In above equation, the  $\zeta$  is termed as distinguishing coefficient, and can have any value within 0–1. In this study,  $\zeta = 0.5$ . Its function is to rectify the difference among relation coefficient.

**Grey relational grade:** in this stage, a combined factor i.e. grey relational grade (GRG) is calculated by combining the grey relational coefficient with associated weight value. The weight value is defined by the manufacturer based on the customer requirement or by following prescribed policy. The GRG is computed using Eq. (10). Here, in the current study, all the responses are given equal weight.

$$\xi(y_0, y_i) = \sum_{k=1}^n \omega_k \theta_k \quad (10)$$

**Grey relational order:** this order is defined by following the descending order of GRG. The highest GRG is given rank 1 while the lowest GRG is ranked 27. The machining run respective to order 1 indicates the optimum run. That means the complete machining system is simultaneously optimized at that experiment.

### 2.3. Life cycle assessment

To bridge the gap between environmental aspects and manufacturing processes, the sustainability assessment has been implemented. The life cycle assessment (LCA) is a user friendly tool used to assess the impacts of products, processes, material removal rate on sustainability and environmental aspects (Fratila, 2010). It is almost applied in all engineering fields in which the environmental concerns of the products and processes have been evaluated over its life cycle. The LCA process is considered to be a systematic and efficient method which comprises of four phases, as shown in Fig. 4. The brief details of LCA processes are summarized below:

- Goal definition and boundary conditions:** the objective of current work is to evaluate the environmental performance of Ti-6Al-4V titanium alloy machining conditions i.e., under dry and cryogenic environment. With this regard, some system boundaries of implemented process i.e., process parameters of turning of Ti-6Al-4V titanium alloy are required to be identified. For instance, the turning experiments were performed by considering three levels of cutting speed, three levels of feed rate, and three different cutting conditions. The depth of cut and all other factors such as tool geometry, tool material, machine vibrations, noises, humidity, etc. are kept/assumed fixed throughout the experiments. The machining performance in terms of cutting force, cutting temperature, specific energy and surface roughness has been also considered as one part of boundary conditions. Moreover, the machine used for the turning experiments serves many years; hence its effect on LCA is about to be insignificant. In addition, the man power and the impact on environmental performance are considered as part goal of this system.
- Life cycle inventory:** in this process, the quantity of emissions, energy and material used has been inventoried and were further calculated by using Simapro 8.0 software. Assume that this data is used for each cut of turning experiment under dry and cryogenic environment. The assumptions are presented below:
  - Scrap: the scrap generated during titanium turning process has some contents of burnt chips, waste chips, recycled chips, reused chips, etc.
  - Flow rate: the flow rate of liquid nitrogen is 2 L per minute (LPM) for single nozzle and 3 L per minute (LPM) for dual nozzles.
  - Coolant composition: pure liquid nitrogen 99.9% is used for cooling media.
  - Tool details: the used tool insert had TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN layered coating over WC.

- Energy measurements: production of electric energy (electricity mix average kWh).
  - Environmental concerns, etc.
- Life cycle impact assessment:** in this phase, the assessment in terms of classifying and characterizing the ecological, environment and human health issues has been presented (with European Life Cycle Database\_v3.1) by using the available resources. The detail on resource depletion, harmful human and ecological effects has been discussed here. The connection between the utilized processes, products and their impending environmental impacts has been developed. The life cycle impact assessment comprises of (Fratila, 2010) -
    - Definition of Impact Categories
    - Characterization
    - Damage Assessment
    - Normalization
    - Weighting – element with highest potential of impact
    - Single score – cumulative damage
    - The indicator is expressed in points (Pt)
  - Life Cycle Interpretation:** it is the last step used to identify and estimate the results of life cycle inventory and life cycle impact assessment with respect to the ISO standards. The following objectives have been considered as per the ISO standards:
    - Analyzing: the given results have been implemented, explained, analyzed and discussed with some conclusive remarks of the previous LCA phases.
    - Reporting: the results have been clearly reported in transparent approach.
    - Presentation: the reported results are presented in very understandable manner, as per the given goals, objectives and aim of this work.

The overall methodology of this research work is graphically presented in Fig. 5.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Influence of machining parameters on responses

The cutting speed and feed rate influence the machining performance in different degrees. Hence, before performing the optimization and sustainability assessment the role of cutting speed and feed rate is investigated here. Fig. 6 shows the contour plots of the responses with respect to the cutting speed and feed rate. From Fig. 6(a) it is visible that the lower cutting speed and higher feed rate generate a higher value of cutting force. This outcome makes the machining system unacceptable as a higher cutting force is associated with higher energy consumption and increased loss of energy due to friction. Moreover, a lower cutting speed is counterproductive – compromise productivity. In this perspective, a lower cutting force is desirable. And, according to this figure, lower value of cutting force is attainable at a lower feed rate and higher cutting speed. Once this is practiced, the machining system becomes sustainable in two-fold ways (i) by increasing the productivity (ii) by reducing the force requirement i.e. reduced energy requirement.

The contour plot of Fig. 6(b) exhibits that a higher feed and higher speed are responsible for generating an elevated temperature at the chip-tool interface. The similar results are reported by Singh et al. (Singh and Sharma, 2017) in machining of titanium (grade 2) alloy. It is true that the increased speed and feed promote increased productivity but, at the same time, they cause temperature to rise. As such, the elevated temperature is highly responsible for the global warming. Fact is that the increased cutting speed, that



Fig. 4. LCA process as per ISO 14040 and ISO 14044 series standards.

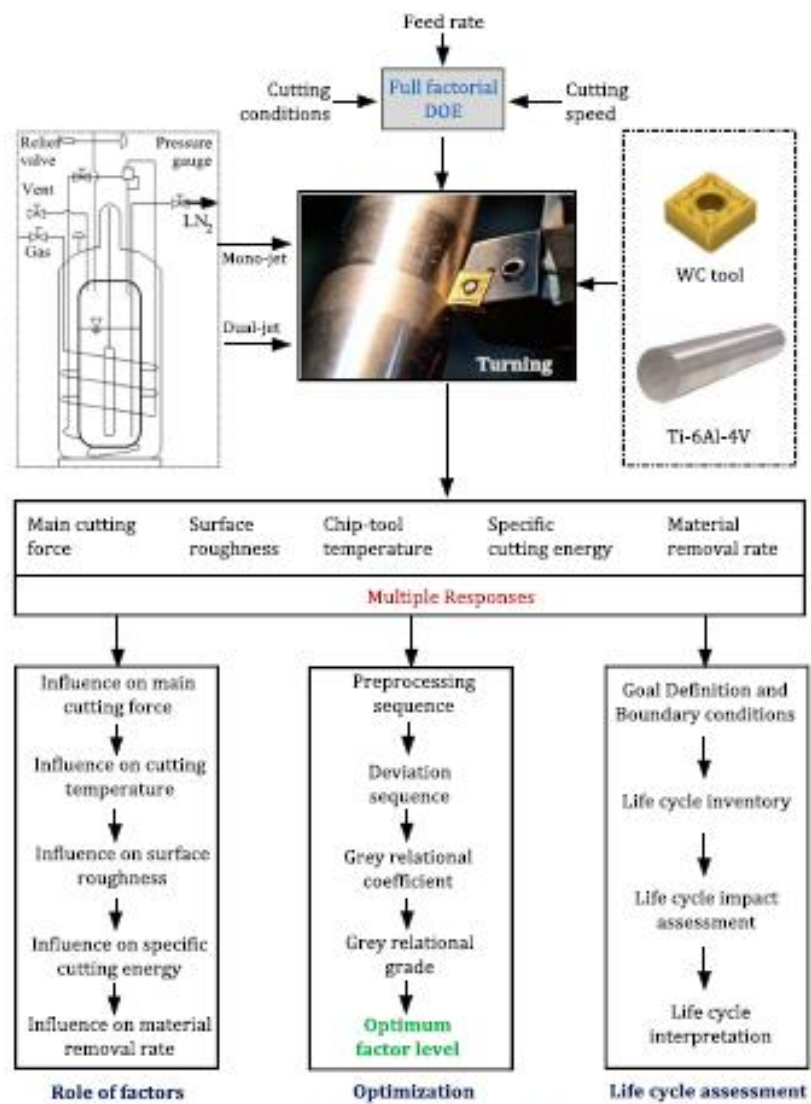


Fig. 5. Methodology of the research work.

is actually associated with increased kinetic energy, converts this kinetic energy into heat energy during the metal cutting. However, as a cautious engineer, it is imperative that we design the process parameters so as that reveals a lower cutting temperature – that is achievable at lower cutting speed and feed rate, shown in Fig. 6(b).

The specific cutting energy is plotted in Fig. 6(c). It is appreciable that the lower feed rate and cutting speed are resulting in a higher requirement of specific cutting energy. This condition is totally undesirable from the perspective of productivity (as lower cutting speed and feed rate cause lower productivity) as well as of sustainability (as energy requirement is high). Therefore, we had to search for machining parameters that revealed lower requirement on specific cutting energy – higher cutting speed and feed rate.

Finally, the machining outcome is directly judged by the machined surface quality – by the average surface roughness parameter. The surface roughness parameter is contour plotted in Fig. 6(d). It can be seen that higher feed rate and lower to moderate cutting speed produced a higher roughness value. Sarikaya and Gullu (Sarikaya and Güllü, 2015) also reported the similar trend in machining of Haynes 25 alloy. And, a product with this rough surface is unlikely to be accepted, especially in precision engineering applications. In broad picture, the production sustainability is compromised by producing the unacceptable quality products. This fact compels the researchers to seek for products with lower surface roughness value. In this current study that is achievable from extremely low feed rate and moderate to higher cutting speed.

The relative influence exerted by the control factors i.e. cutting

speed, feed rate and cooling conditions are displayed as in percentage contribution in Fig. 7. These percentage contributions are computed by statistical analysis of variance. It is visible that in generating the cutting force, the highest contribution is given by cooling condition followed by the feed rate and lastly by the cutting speed. However, in case of cutting temperature, most of the effect is exerted by the cutting speed, then by the feed rate and lastly by the cooling condition. The product quality parameter i.e. surface roughness is primarily influenced by the feed rate followed by the cutting speed and then by the cooling conditions. Lastly the specific cutting energy is largely influenced by the feed rate, followed by the cooling condition and finally by the cutting speed.

The role of cryogenic cooling under the dry condition on the specific cutting energy at different values of material removal rate is illustrated in Fig. 8. In sum, this figure shows the relation of productivity, machining energy and clean cooling strategy in turning Ti-6Al-4V. The x-axis of Fig. 8 is ordered according to increasing MRR. Though it cannot be absolutely claimed that the higher the MRR the lower the specific cutting energy requirement; in most cases, the higher MRR is associated with lower specific energy. Liu et al. (2018) reported similar correlation of MRR and specific energy for face milling of Inconel. On top of it, the application of cryogenic cooling jet(s) reduces the specific cutting energy requirement. In fact, this reduction is in two steps – first by the mono-jet compared to the dry condition and then by the dual jets compared to single jet.

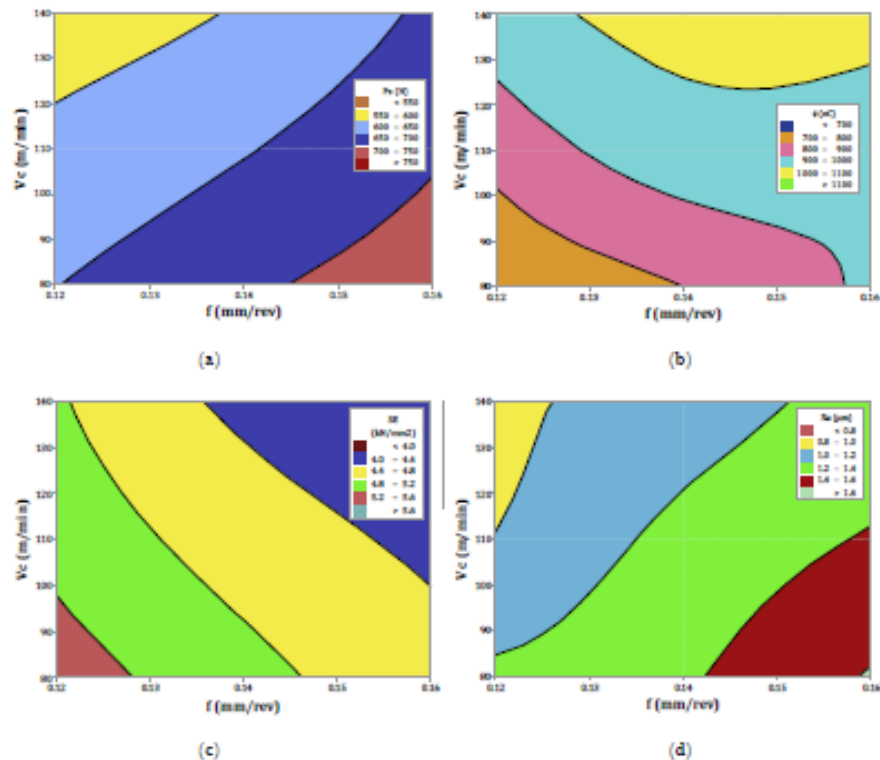


Fig. 6. Behaviour of machining responses with respect to cutting speed and feed rate. (a) cutting force (b) cutting temperature (c) specific cutting energy (d) average surface roughness.

### 3.2. Optimization of process parameters

There can be two approaches of optimizing the responses in this study. One way is to optimize them individually and another way is to optimize them simultaneously. However, as emphasized by Mia et al. (2017) individual-objective optimization fails to appropriately optimize the machining system. In fact, the optimum result of one response may not be the optimum result for another response. In this context, the multi-objective optimization is accomplished by using Grey-relational analysis (see section 2.2).

Following the step 'preprocessing of data' of GRA, the normalized values of the responses is shown in Table 4. The deviation sequence is listed in Table 5. Lastly, the computed grey-relational coefficient can be found in Table 6. In addition, the rank is provided there following the largest as rank 1 and smallest as rank 27. The rank 1 experiment indicates the optimum result. As we can see, experiment number 21 is the optimum run. Therefore, tracing back to Table 2, we get that the cutting speed of 140 m/min and feed rate of 0.12 mm/rev are the optimum control factor levels. And, the cryogenic dual-jets applied at both rake and flank surface are the optimum result. Similarly, from Table 3, we find the optimum results: main cutting force 539.55 N, chip-tool interface temperature 910 °C, average surface roughness parameter 0.72  $\mu\text{m}$ , specific cutting energy 4.49 kN/mm<sup>2</sup> and material removal rate 16.8 mm<sup>3</sup>/min.

These optimized results facilitate sustainable manufacturing in multiple scopes. The obtainment of minimum cutting force ensures the lowest upsetting of cutting zone interaction; hence, favorable chip formation is presumed. Then, the reduction of cutting temperature directly links it to environmental temperature rise. In fact, the use of cryogenic jets pacifies the cutting zones and this in turn guarantees minimum thermal dissipation to surround ambience. On the other context, the generation of surface roughness value less than 1.0  $\mu\text{m}$  is quite impressive, especially in regards to precision engineering (Mia et al., 2018c). This credit goes to thermal favorability ensured by cryogenic condition. Moreover, the cryogenic jets

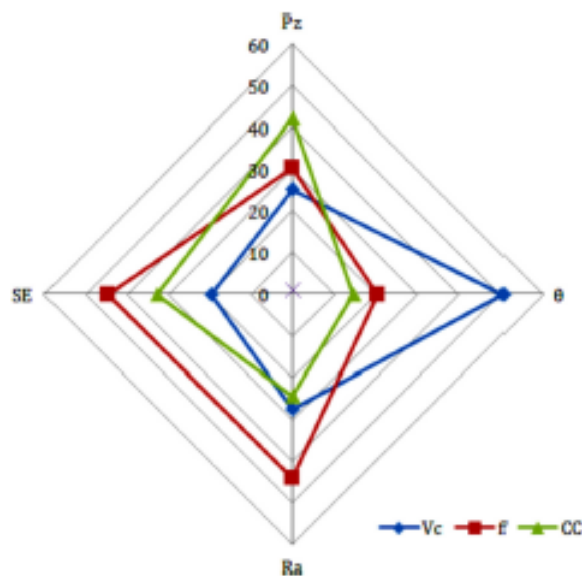


Fig. 7. Percentage effects of control factors on the responses. [Vc – cutting speed, f – feed rate, CC – cutting condition, SE – Specific cutting energy, Pz – Main cutting force, Ra – cutting temperature, Ra – Average surface roughness].

caused instant hardening effects on the other layer of the machine surface – an effect to minimize the sticky effect found mostly in low thermal conductivity material such as Ti-6Al-4V. Lastly, the lowest requirement on specific cutting energy and highest gain in material removal rate (i.e. higher productivity) promote two-fold benefits in life cycle assessment, which is discussed in the following section.

### 3.3. Life cycle assessment

Manufacturing processes should also be assessed in terms of environmental impact. In machining operations, cutting tool materials, cutting fluids and also the machining parameters have influence on the environment. In this study, the Life Cycle Assessment (LCA) of the process was carried out using Simapro 8.0 software with two different assessment methodologies: EPS 2000 and Impact 2002+. With these methodologies, the environmental impacts were determined and the results provide information on the level and importance of several environmental issues.

**EPS 2000 Methodology:** this methodology is focused mainly on the energy consumption and reduction of non-energetic resources. The influence of different cutting conditions in terms of chronological experimental runs on the human health, ecosystem production capacity, abiotic stock resource, and biodiversity is presented in Fig. 9. Presumably, the machining system either in dry condition or in cryogenic condition has negligible impact on the ecosystem production capacity and biodiversity – discernible in Fig. 9. On the other side, the impacts on the human health and abiotic stock resource are significant; impact on abiotic stock resource is greater than the impact on human health. This can be explained by the fact that the extraction of nitrogen and its reserving as in liquid form consumes significant amount of energy and involves many process steps. Therefore, though in machining the cryogenic cooling is used as a neat and clean cooling system, the background of its production is a worrying fact. On the other side, the handling and usage of cryogenic jet(s) involve the potential to cause accidents such as cold burn – an impact on human health. It is to be noted that the experimental numbers are presented as 'trio' where the first experimental run indicates dry, the second run presents the mono-jet cryogenic condition and the third column stands for dual-jet cryogenic condition. That said it is visible that the transition from dry to mono-jet to dual-jet condition exhibits lower impacts on the above-mentioned eco-indicators. This can be accredited to the better machinability characteristics of mono-jet and even the best machinability by the dual jets. Better machinability cause less rejection of product and improved economic performance, hence the impact points are reduced. In other words, the rework is reduced causing less impact on human health as well as on abiotic resource.

Moreover, from the obtained values shown in Fig. 9, it can be seen that the higher impacts (Pts) produced on the human health and abiotic resource depletion, being the 1, 4, 10 and 19 tests those with the highest values. It is important to note that all of these four tests were carried out under dry machining conditions. Thus, the use of cryogenic assisted machining helps at reducing environmental impacts. These impacts can be due to such benefits of using cryogenic jets: for instance, no disposal of the cryogenic nitrogen is required as it evaporates into air; no cleaning of the parts are required; high-speed jet(s) of cryogenic remove chips from cutting zone and ensures clean cutting environment. Moreover, this reduction of environmental impact is due to a reduction in specific energy consumption (shown in Fig. 8). Furthermore, the material removal rates in these experimental runs (1, 4, 10, 19) are lower to medium; thence, the lower MRR is associated with bigger impacts on the sustainability indicators. Lower MRR means lower material removal per unit time, hence, to attain a certain amount of material

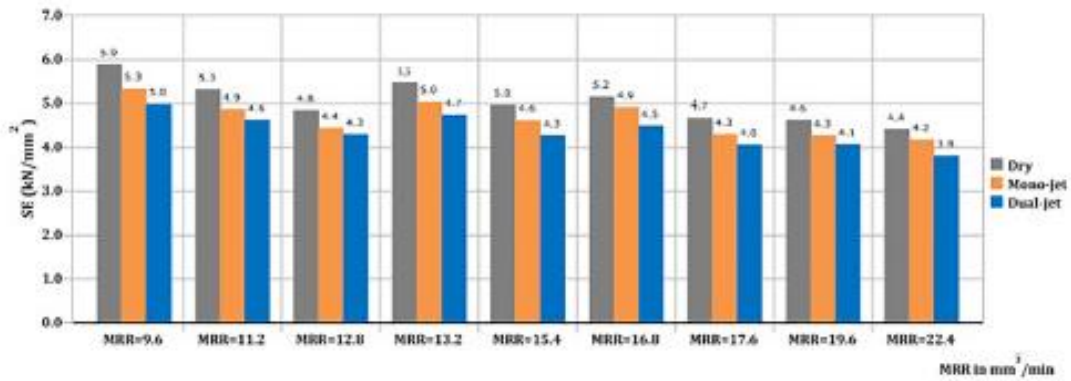


Fig. 8. Influence of cryogenic cooling jet on the specific cutting energy requirements at different MRRs.

Table 4

Preprocessing sequence.

| Expt. No. | Main cutting force, $F_2$ | Chip-cool temperature, $\theta$ | Surface roughness, $R_a$ | Specific cutting energy, $S_c$ | Material removal rate, $MRR$ |
|-----------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 1         | 0.2917                    | 0.7200                          | 0.3700                   | 0.0000                         | 0.0000                       |
| 2         | 0.5730                    | 0.8800                          | 0.4400                   | 0.2644                         | 0.0000                       |
| 3         | 0.7500                    | 1.0000                          | 0.6000                   | 0.4327                         | 0.0000                       |
| 4         | 0.1250                    | 0.6040                          | 0.2400                   | 0.2692                         | 0.1250                       |
| 5         | 0.4016                    | 0.6920                          | 0.3200                   | 0.4904                         | 0.1250                       |
| 6         | 0.5417                    | 0.8000                          | 0.4700                   | 0.6058                         | 0.1250                       |
| 7         | 0.0000                    | 0.4000                          | 0.0000                   | 0.5000                         | 0.2500                       |
| 8         | 0.2767                    | 0.4780                          | 0.0700                   | 0.6971                         | 0.2500                       |
| 9         | 0.3750                    | 0.5200                          | 0.2400                   | 0.7644                         | 0.2500                       |
| 10        | 0.5000                    | 0.6000                          | 0.6000                   | 0.9971                         | 0.2813                       |
| 11        | 0.7195                    | 0.6400                          | 0.7100                   | 0.4038                         | 0.2813                       |
| 12        | 0.8750                    | 0.6600                          | 0.8300                   | 0.5481                         | 0.2813                       |
| 13        | 0.3334                    | 0.3100                          | 0.3500                   | 0.4875                         | 0.4531                       |
| 14        | 0.5525                    | 0.3700                          | 0.4300                   | 0.6106                         | 0.4531                       |
| 15        | 0.7500                    | 0.5480                          | 0.6200                   | 0.7740                         | 0.4531                       |
| 16        | 0.1250                    | 0.2000                          | 0.2000                   | 0.5865                         | 0.6250                       |
| 17        | 0.3707                    | 0.6920                          | 0.3200                   | 0.7644                         | 0.6250                       |
| 18        | 0.5417                    | 0.4000                          | 0.4000                   | 0.8798                         | 0.6250                       |
| 19        | 0.6667                    | 0.2680                          | 0.5600                   | 0.3510                         | 0.5625                       |
| 20        | 0.7903                    | 0.3680                          | 0.6700                   | 0.4663                         | 0.5625                       |
| 21        | 1.0000                    | 0.4800                          | 1.0000                   | 0.6683                         | 0.5625                       |
| 22        | 0.5417                    | 0.1000                          | 0.4900                   | 0.6058                         | 0.7813                       |
| 23        | 0.7523                    | 0.2000                          | 0.6000                   | 0.7740                         | 0.7813                       |
| 24        | 0.8750                    | 0.4000                          | 0.8000                   | 0.8750                         | 0.7813                       |
| 25        | 0.2917                    | 0.0000                          | 0.2900                   | 0.7067                         | 1.0000                       |
| 26        | 0.4563                    | 0.2000                          | 0.3900                   | 0.8221                         | 1.0000                       |
| 27        | 0.7083                    | 0.3600                          | 0.5600                   | 1.0000                         | 1.0000                       |

removal the machined must be run for more time. This extra machine time incur expenses in terms of machine cost, fuel cost, human hour cost, and coolant cost. Hence, a higher MRR is suggested in the perspective of sustainable manufacturing. However, higher MRR indicates higher cutting speed and feed which has negative impact of productivity (as mentioned earlier), and therefore, an optimization was required and accordingly performed in section 2.2 and 3.2.

**Impact 2002 + methodology:** this methodology is mainly based on human health, although it also evaluates other environmental issues such as the quality of the ecosystems and the depletion of resources. By comparing this methodology to the previous, it is possible to confirm that no significant discrepancies are found among them. From the results shown in Fig. 10, it is possible to see that the tests 1, 4, 10 and 19 are again those that generate the higher impacts. This methodology indicates that the higher impacts are

produced on human health, resources depletion and climate change, without being influenced by the quality of the ecosystems. This is due to the energy consumption and use of cryogenic coolant. The prominent impact on climate change can be explained by the use of nitrogen that is extracted from environment; and afterward converted to liquid state by compression and cooling. Each step of the cryogenic nitrogen processing and the plant's machineries consumes energy and directly influences the environment. However, it is to be noted that for simplicity of calculation we did not include the environmental effects of cryogenic plant in this study, only the use of cryogenic nitrogen in machining is considered.

#### 4. Conclusions

The current study deals with three aspects of eco-friendly cryogenic cooling assisted turning of Ti-6Al-4V: influence of

**Table 5**  
Deviation sequence.

| Exp. No. | Main cutting force, $F_t$ | Chip-tool temperature, $\theta$ | Surface roughness, $R_a$ | Specific cutting energy, $S_c$ | Material removal rate, $M_{RR}$ |
|----------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 1        | 0.7083                    | 0.2800                          | 0.6300                   | 1.0000                         | 1.0000                          |
| 2        | 0.4270                    | 0.1200                          | 0.5600                   | 0.7356                         | 1.0000                          |
| 3        | 0.2500                    | 0.0000                          | 0.4000                   | 0.5673                         | 1.0000                          |
| 4        | 0.8750                    | 0.3960                          | 0.7600                   | 0.7308                         | 0.8750                          |
| 5        | 0.5984                    | 0.3080                          | 0.6800                   | 0.5096                         | 0.8750                          |
| 6        | 0.4583                    | 0.2000                          | 0.5300                   | 0.3942                         | 0.8750                          |
| 7        | 1.0000                    | 0.6000                          | 1.0000                   | 0.5000                         | 0.7500                          |
| 8        | 0.7233                    | 0.5240                          | 0.9300                   | 0.3029                         | 0.7500                          |
| 9        | 0.6250                    | 0.4800                          | 0.7600                   | 0.2356                         | 0.7500                          |
| 10       | 0.5000                    | 0.4000                          | 0.4000                   | 0.8029                         | 0.7188                          |
| 11       | 0.2805                    | 0.3600                          | 0.2900                   | 0.5962                         | 0.7188                          |
| 12       | 0.1250                    | 0.3400                          | 0.1700                   | 0.4519                         | 0.7188                          |
| 13       | 0.6686                    | 0.6900                          | 0.6500                   | 0.5625                         | 0.5469                          |
| 14       | 0.4475                    | 0.6300                          | 0.5700                   | 0.3894                         | 0.5469                          |
| 15       | 0.2500                    | 0.4540                          | 0.3800                   | 0.2260                         | 0.5469                          |
| 16       | 0.8750                    | 0.8000                          | 0.8000                   | 0.4135                         | 0.3750                          |
| 17       | 0.6298                    | 0.3080                          | 0.6800                   | 0.2356                         | 0.3750                          |
| 18       | 0.4583                    | 0.6000                          | 0.6000                   | 0.1202                         | 0.3750                          |
| 19       | 0.3333                    | 0.7340                          | 0.4400                   | 0.6490                         | 0.4875                          |
| 20       | 0.2097                    | 0.6320                          | 0.3300                   | 0.5337                         | 0.4875                          |
| 21       | 0.0000                    | 0.5200                          | 0.0000                   | 0.3317                         | 0.4875                          |
| 22       | 0.4583                    | 0.9000                          | 0.5100                   | 0.3942                         | 0.2188                          |
| 23       | 0.2477                    | 0.8000                          | 0.4000                   | 0.2260                         | 0.2188                          |
| 24       | 0.1250                    | 0.6000                          | 0.2000                   | 0.1250                         | 0.2188                          |
| 25       | 0.7083                    | 1.0000                          | 0.7100                   | 0.2933                         | 0.0000                          |
| 26       | 0.5437                    | 0.8000                          | 0.6100                   | 0.1779                         | 0.0000                          |
| 27       | 0.2917                    | 0.6400                          | 0.4400                   | 0.0000                         | 0.0000                          |

**Table 6**  
Grey-relational coefficient, grade and associated rank.

| Exp. No. | Grey-relational coefficient |                                 |                          |                                |                                 | Weighted grey relational grade | Rank |
|----------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------|
|          | Main cutting force, $F_t$   | Chip-tool temperature, $\theta$ | Surface roughness, $R_a$ | Specific cutting energy, $S_c$ | Material removal rate, $M_{RR}$ |                                |      |
| 1        | 0.4138                      | 0.6410                          | 0.4405                   | 0.3333                         | 0.3333                          | 0.4328                         | 25   |
| 2        | 0.5394                      | 0.8065                          | 0.4717                   | 0.4047                         | 0.3333                          | 0.5111                         | 16   |
| 3        | 0.6667                      | 1.0000                          | 0.5556                   | 0.4685                         | 0.3333                          | 0.6048                         | 6    |
| 4        | 0.3636                      | 0.5580                          | 0.3968                   | 0.4063                         | 0.3636                          | 0.4177                         | 26   |
| 5        | 0.4552                      | 0.6188                          | 0.4237                   | 0.4952                         | 0.3636                          | 0.4713                         | 21   |
| 6        | 0.5218                      | 0.7148                          | 0.4854                   | 0.5991                         | 0.3636                          | 0.5289                         | 14   |
| 7        | 0.3333                      | 0.4546                          | 0.3333                   | 0.5000                         | 0.4000                          | 0.4042                         | 27   |
| 8        | 0.4087                      | 0.4883                          | 0.3497                   | 0.6228                         | 0.4000                          | 0.4539                         | 22   |
| 9        | 0.4444                      | 0.5102                          | 0.3968                   | 0.6797                         | 0.4000                          | 0.4862                         | 19   |
| 10       | 0.5000                      | 0.5556                          | 0.5556                   | 0.3898                         | 0.4108                          | 0.4810                         | 20   |
| 11       | 0.6407                      | 0.5814                          | 0.6329                   | 0.4961                         | 0.4108                          | 0.5448                         | 13   |
| 12       | 0.8000                      | 0.5952                          | 0.7463                   | 0.5253                         | 0.4108                          | 0.6154                         | 4    |
| 13       | 0.4286                      | 0.4202                          | 0.4348                   | 0.4706                         | 0.4776                          | 0.4463                         | 24   |
| 14       | 0.5277                      | 0.4425                          | 0.4673                   | 0.5622                         | 0.4776                          | 0.4955                         | 18   |
| 15       | 0.6667                      | 0.5241                          | 0.5682                   | 0.6887                         | 0.4776                          | 0.5851                         | 8    |
| 16       | 0.3636                      | 0.3846                          | 0.3846                   | 0.5474                         | 0.5714                          | 0.4508                         | 23   |
| 17       | 0.4427                      | 0.6188                          | 0.4237                   | 0.6797                         | 0.5714                          | 0.5473                         | 12   |
| 18       | 0.5218                      | 0.4546                          | 0.4545                   | 0.8062                         | 0.5714                          | 0.5617                         | 9    |
| 19       | 0.6000                      | 0.4052                          | 0.5319                   | 0.4351                         | 0.5333                          | 0.5011                         | 17   |
| 20       | 0.7045                      | 0.4417                          | 0.6024                   | 0.4837                         | 0.5333                          | 0.5531                         | 11   |
| 21       | 1.0000                      | 0.4902                          | 1.0000                   | 0.6012                         | 0.5333                          | 0.7240                         | 1    |
| 22       | 0.5218                      | 0.3571                          | 0.4950                   | 0.5591                         | 0.6957                          | 0.5257                         | 15   |
| 23       | 0.6687                      | 0.3846                          | 0.5556                   | 0.6887                         | 0.6957                          | 0.5986                         | 7    |
| 24       | 0.8001                      | 0.4546                          | 0.7143                   | 0.8000                         | 0.6957                          | 0.6929                         | 3    |
| 25       | 0.4138                      | 0.3333                          | 0.4132                   | 0.6303                         | 1.0000                          | 0.5581                         | 10   |
| 26       | 0.4790                      | 0.3846                          | 0.4505                   | 0.7376                         | 1.0000                          | 0.6108                         | 5    |
| 27       | 0.6316                      | 0.4386                          | 0.5319                   | 1.0000                         | 1.0000                          | 0.7204                         | 2    |

process parameters on machining responses, multi-objective optimization of all responses, and life cycle assessment of turning process. The following concluding remarks can be found:

- The cryogenic cooling jet assisted turning is better than dry cutting in respect of eco-friendliness, clean manufacturing

environment, energy saving and performance improving mode of cutting. In fact, simultaneous application of dual-jets cryogenic nitrogen at the rake and flank surfaces outperformed single-jet cryogenic condition.

- The target of efficient machining system is to minimize the cutting force, temperature, specific energy and surface

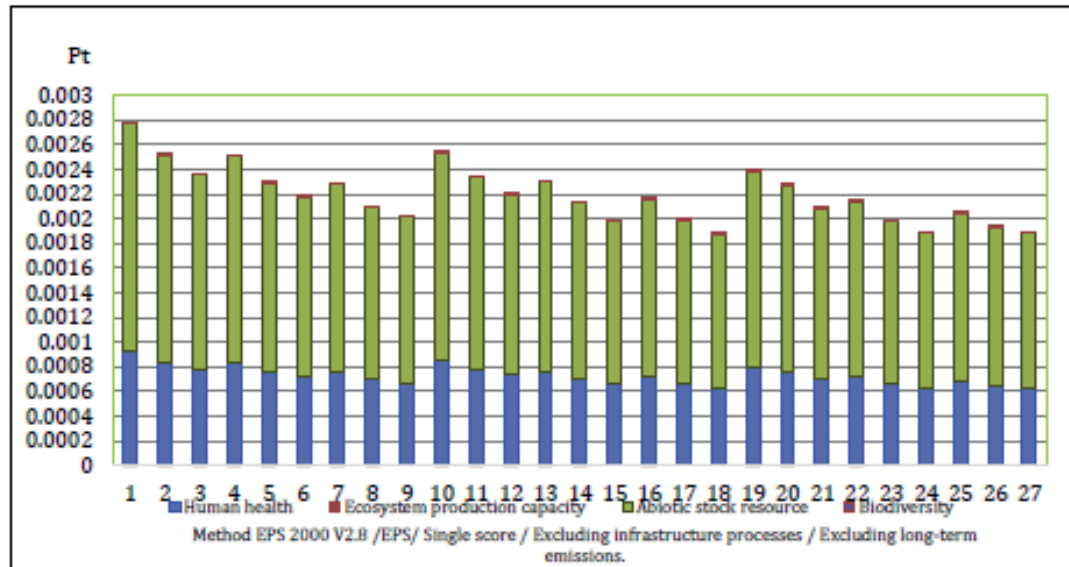


Fig. 9. Impact contribution of the analyzed experiments using EPS 2000 methodology.

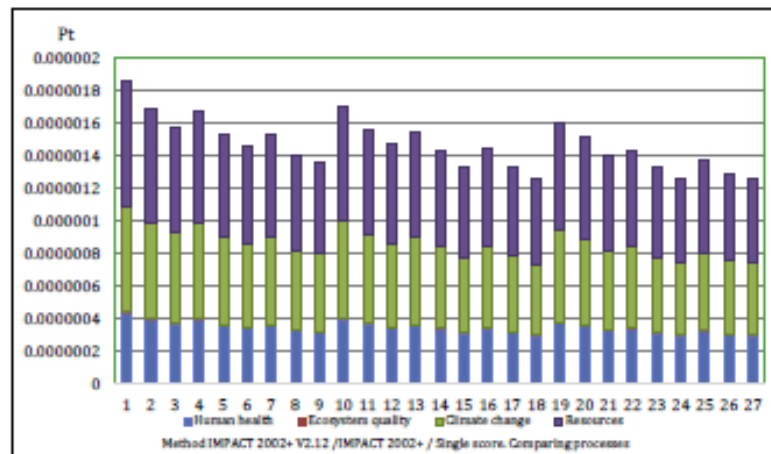


Fig. 10. Impact contribution of the experimental tests. Impact 2002+ methodology.

roughness. From experimental data, it was found that higher cutting speed and lower feed rate supported those targets except for lower cutting speed to minimize the temperature and higher feed rate to minimize specific energy. Moreover, an increased MRR is associated with reduced specific energy requirement. These trade-offs necessitated the multi-objective optimization of responses.

- Grey-relational analysis revealed that the optimum results are: main cutting force  $\min F_c = 539.55$  N, chip-tool interface temperature  $\min T = 910$  °C, average surface roughness parameter  $\min R_a = 0.72$   $\mu\text{m}$ , specific cutting energy  $\min S_c = 4.49$   $\text{kJ}/\text{mm}^2$  and material removal rate  $\min \text{MRR} = 16.8$   $\text{mm}^3/\text{min}$ .
- LCA is revealed to be a user friendly tool for calculating environmental emissions during turning of Ti-6Al-4V alloy considering dry and cryogenic cooling conditions. From this

analysis, it has been verified that the role of cryogenic cooling emerges out the more sustainable alternative and significantly improves the process performance as compared with dry machining.

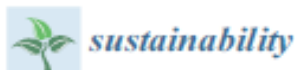
### 5. Future outlook

The life cycle assessment of machining processes (i.e. turning, milling, drilling, grinding) under state-of-art cooling-lubricating conditions i.e. minimum quantity lubrication, high-pressure coolant, wet cooling, nitrogen gas cooling, compressed cold air cooling, etc. in machining of alloys and superalloys can be tentative future avenues of research.

## References




- Al-Ghamdi, K.A., Iqbal, A., Hussain, G., 2014. Machinability comparison of AISI 4340 and Ti-6Al-4V under cryogenic and hybrid cooling environments: a knowledge engineering approach. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* 220, 2144–2164. <https://doi.org/10.1177/0954405414648495>.
- Alcazar, M.I., Nishadivaran, A., Zgoh, M., Kirchahn, R.E., Olivetti, E.A., 2018. Streamlined life cycle assessment: a case study on tablets and integrated circuits. *J. Clean. Prod.* 200, 819–826. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.273>.
- Bagherzadeh, A., Budak, E., 2018. Investigation of machinability in turning of difficult-to-cut materials using a new cryogenic cooling approach. *Tribol. Int.* 119, 510–520. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.11.033>.
- Behara, B.C., Alrmyayeh, H., Ghosh, S., Rao, P.V., 2017. A comparative study of recent lubricant strategies for turning of Ni-based superalloy. *J. Manuf. Process.* 30, 541–552. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.10.027>.
- Bosfin, A., Sartori, S., Bruschi, S., Ghisetti, A., 2017. Experimental investigation on the feasibility of dry and cryogenic machining as sustainable strategies when turning Ti6Al4V produced by Additive Manufacturing. *J. Clean. Prod.* 142, 4142–4151. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.209>.
- Carou, D., Rubio, E.M., Agustina, B., Mañón, M.M., 2017. Experimental study for the effective and sustainable repair and maintenance of bars made of Ti-6Al-4V alloy. Application to the aeronautic industry. *J. Clean. Prod.* 164, 465–475. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.095>.
- Dantoli, M., Giza, T.I., Habb, K., Carou, D., Rani, A.M.A., Saha, B.B., 2017. Thermal analysis during turning of AZ31 magnesium alloy under dry and cryogenic conditions. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 91, 2855–2868. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9803-5>.
- Dawin, J.P., Rubio, E.M., Carou, D., 2015. A note on the use of the minimum quantity lubrication (MQL) system in turning. *Ind. Lubr. Tribol.* 60, 256–261. <https://doi.org/10.1108/ILT-07-2014-0070>.
- Frazila, D., 2010. Macro-level environmental comparison of near-dry machining and flood machining. *J. Clean. Prod.* 18, 1031–1039. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.01.017>.
- Gupta, M.K., 2015. Optimization of machining parameters for turning AISI 4340 steel using Taguchi based grey relational analysis. *Indian J. Eng. Mater. Sci.* 22, 679–685.
- Gupta, M.K., Sood, P., 2017. Machining comparison of aerospace materials considering minimum quantity cutting fluid: a clean and green approach. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 231, 1446–1464. <https://doi.org/10.1177/0954405216684454>.
- Gupta, M.K., Sood, P.K., Sharma, V.S., 2016a. Machining parameters optimization of titanium alloy using response surface methodology and particle swarm optimization under minimum-quantity lubrication environment. *Mater. Manuf. Process.* 31, 1671–1682. <https://doi.org/10.1080/10426944.2015.1117632>.
- Gupta, M.K., Sood, P.K., Sharma, V.S., 2016b. Investigations on surface roughness measurement in minimum quantity lubrication turning of titanium alloys using response surface methodology and box – cox transformation. *J. Manuf. Sci. Prod.* <https://doi.org/10.1515/jmsp-2015-0015>.
- Gupta, M.K., Sood, P.K., Sharma, V.S., 2016. Optimization of machining parameters and cutting fluids during nano-fluid based minimum quantity lubrication turning of titanium alloy by using evolutionary techniques. *J. Clean. Prod.* 135, 1276–1288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.184>.
- Gupta, M.K., Sood, P.K., Singh, G., Sharma, V.S., 2017. Sustainable machining of aerospace material – Ti (grade-2) alloy: modeling and optimization. *J. Clean. Prod.* 147, 614–627. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.133>.
- Hou, P., Xu, Y., Talebar, M., Lamisikie, C., Miller, S.A., Xu, M., 2018. Life cycle assessment of end-of-life treatments for plastic film waste. *J. Clean. Prod.* 201, 1052–1060. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.278>.
- Jawahir, I.S., Arta, H., Biermann, D., Duffau, J., Klocke, F., Meyer, D., Newman, S.T., Pusavec, F., Putz, M., Rech, J., Schütze, V., Umbrello, D., 2016. Cryogenic manufacturing processes. *CRP Ann.* 65, 713–736. <https://doi.org/10.1016/j.crp.2016.06.007>.
- Kadiri, G.S., Pawade, R.S., 2017. Surface integrity and sustainability assessment in high-speed machining of Inconel 718—An eco-friendly green approach. *J. Clean. Prod.* 147, 273–283.
- Królczyk, G.M., Niesiony, P., Maruda, R.W., Wojciechowski, S., 2017. Dry cutting effect in turning of a duplex stainless steel as a key factor in clean production. *J. Clean. Prod.* 142, 3343–3354. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.136>.
- Lapierre, L., Reinhart, G., 2014. *CRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer Publishing Company, Incorporated.
- Lequien, P., Poulachon, G., Outeiro, J.C., Rech, J., 2018. Hybrid experimental/modelling methodology for identifying the convective heat transfer coefficient in cryogenic assisted machining. *Appl. Therm. Eng.* 128, 500–507. <https://doi.org/10.1016/j.applthermeng.2017.09.054>.
- Liu, Z.Y., Li, C., Fang, X.Y., Gao, Y.B., 2018. Cumulative energy demand and environmental impact in sustainable machining of Inconel superalloy. *J. Clean. Prod.* 181, 329–336. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.251>.
- Lopes Silva, D.A., de Oliveira, J.A., Padovesi Filho, R.A., Gomes de Oliveira, J.F., Jannone da Silva, E., Onetto, A.R., 2018. Life Cycle Assessment in automotive sector: a case study for engine valves towards cleaner production. *J. Clean. Prod.* 184, 286–300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.252>.
- Mia, M., 2017. Multi-response optimization of end milling parameters under through-tool cryogenic cooling condition. *Measurement* 111, 134–145. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.033>.
- Mia, M., Dhar, N.R., 2018. Effects of duplex jets high-pressure coolant on machining temperature and machinability of Ti-6Al-4V superalloy. *J. Mater. Process. Technol.* 252, 688–696. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.10.040>.
- Mia, M., Gupta, M.K., Singh, G., Królczyk, G., Pimenov, D.V., 2018a. An approach to cleaner production for machining hardened steel using different cooling-lubrication conditions. *J. Clean. Prod.* 187, 1069–1081. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.279>.
- Mia, M., Khan, M.A., Rahman, S.S., Dhar, N.R., 2017. Mono-objective and multi-objective optimization of performance parameters in high pressure coolant assisted turning of Ti-6Al-4V. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 90, 109–118. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9872-z>.
- Mia, M., Rifat, A., Dip, E.T., Gupta, M.K., Hussain, M.J., Goswami, A., 2018b. Multi-objective Optimization of Chip-tool Interaction Parameters Using Grey-taguchi Method in MQI-assisted Turning. *Measurement* <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.014>.
- Mia, M., Singh, G., Gupta, M.K., Sharma, V.S., 2018c. Influence of Ranque-Hilsch vortex tube and nitrogen gas assisted MQI in precision turning of Al 6061-T6. *Precis. Eng.* 53, 280–299. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.04.011>.
- Pervaz, S., Kannan, S., Kishawy, H.A., 2018. An extensive review of the water consumption and cutting fluid based sustainability concerns in the metal cutting sector. *J. Clean. Prod.* 197, 134–153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.190>.
- Sales, W.F., Schoop, J., Jawahir, I.S., 2017. Tribological behavior of PCD tools during superfinishing turning of the Ti6Al4V alloy using cryogenic, hybrid and flood and lubricant environments. *Tribol. Int.* 114, 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.03.088>.
- Sanz, A., Negro, A.A., Fernández, R., Galvo, F., 2013. Comparative study about the use of two and three-dimensional methods in surface finishing characterization. *Procedia Eng.* 63, 913–921. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.267>.
- Sankaya, M., Güllü, A., 2015. Multi-response optimization of minimum quantity lubrication parameters using Taguchi-based grey relational analysis in turning of difficult-to-cut alloy Haynes 25. *J. Clean. Prod.* 91, 347–357. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.020>.
- Singh, G., Gupta, M.K., Mia, M., Sharma, V.S., 2018. Modeling and optimization of tool wear in MQI-assisted milling of Inconel 718 superalloy using evolutionary techniques. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 97, 481–494. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1911-3>.
- Singh, G., Sharma, V.S., 2017. Analyzing machining parameters for commercially pure titanium (Grade 2), cooled using minimum quantity lubrication assisted by a Ranque-Hilsch vortex tube. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 88, 2921–2928. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8882-9>.
- Uğak, N., Çiçek, A., 2018. The effects of cutting conditions on cutting temperature and hole quality in drilling of Inconel 718 using solid carbide drills. *J. Manuf. Process.* 31, 662–673. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.01.003>.
- Watson, J.K., Taminger, K.M.B., 2018. A decision-support model for selecting additive manufacturing versus subtractive manufacturing based on energy consumption. *J. Clean. Prod.* 176, 1316–1322. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.009>.
- Wojciechowski, S., W. Maruda, R., M. Królczyk, G., Niesiony, P., 2018. Application of signal to noise ratio and grey relational analysis to minimize forces and vibrations during precise ball end milling. *Precis. Eng.* 51, 582–596. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.10.014>.
- Yi, S., Jang, Y.-C., An, A.K., 2018. Potential for energy recovery and greenhouse gas reduction through waste-to-energy technologies. *J. Clean. Prod.* 176, 503–511. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.103>.
- Yigit, R., Celik, E., Findik, F., Koksul, S., 2008. Tool life performance of multilayer hard coatings produced by HTVD for machining of nodular cast iron. *Int. J. Refract. Metals Hard Mater.* 26, 514–524. <https://doi.org/10.1016/j.jmhm.2007.12.008>.
- Zhou, L., Li, J., Li, F., Meng, Q., Li, J., Xu, X., 2016. Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review. *J. Clean. Prod.* 112, 3721–3734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.098>.

## 7.2.2. Comparative study of the environmental impact of the manufacture of traditional bricks and bricks of porous cooked clay with biological basics through Life Cycle Analysis (LCA). <https://doi.org/10.3390/su10082917>.



Article

### Comparative Study on the Environmental Impact of Traditional Clay Bricks Mixed with Organic Waste Using Life Cycle Analysis

José Adolfo Lozano-Miralles <sup>1</sup>, Manuel Jesús Hermoso-Orzáez <sup>1,\*</sup> , Carmen Martínez-García <sup>2</sup>   
and José Ignacio Rojas-Sola <sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Department of Engineering Graphics, Design and Projects, University of Jaén, 23071 Jaén, Spain; jalm0017@red.ujaen.es (J.A.L.-M.); jirojas@ujaen.es (J.I.R.-S.)

<sup>2</sup> Department of Chemical, Environmental and Material Engineering, High Polytechnic School of Linares, University of Jaén, Linares Scientific and Technological Campus, Cinturón Sur, s/n, 23700 Linares, Spain; cmartin@ujaen.es

\* Correspondence: mhorzaez@ujaen.es; Tel: +34-610-389-020

Received: 3 July 2018; Accepted: 1 August 2018; Published: 18 August 2018



**Abstract:** The construction industry is responsible for 40–45% of primary energy consumption in Europe. Therefore, it is essential to find new materials with a lower environmental impact to achieve sustainable buildings. The objective of this study was to carry out the life cycle analysis (LCA) to evaluate the environmental impacts of baked clay bricks incorporating organic waste. The scope of this comparative study of LCA covers cradle to gate and involves the extraction of clay and organic waste from the brick, transport, crushing, modelling, drying and cooking. Local sustainability within a circular economy strategy is used as a laboratory test. The energy used during the cooking process of the bricks modified with organic waste, the gas emission concentrate and the emission factors are quantified experimentally in the laboratory. Potential environmental impacts are analysed and compared using the ReCiPe midpoint LCA method using SimaPro 8.0.5.13. These results achieved from this method are compared with those obtained with a second method—Impact 2002+ v2.12. The results of LCA show that the incorporation of organic waste in bricks is favourable from an environmental point of view and is a promising alternative approach in terms of environmental impacts, as it leads to a decrease of 15–20% in all the impact categories studied. Therefore, the suitability of the use of organic additives in clay bricks was confirmed, as this addition was shown to improve their efficiency and sustainability, thus reducing the environmental impact.

**Keywords:** life-cycle analysis (LCA); sustainable materials; sustainability; climate impact; bioclimatic architecture

#### 1. Introduction

Building and road construction is responsible for the consumption of almost half of the raw materials and energy throughout the planet [1]. Consequently, construction has a great impact on the depletion of finite resources, in addition to the production of greenhouse gas emissions from the combustion of fossil fuels. In order to reduce the associated greenhouse gas emissions and resulting impact on the climate, it is necessary to use environmentally sustainable building materials [2,3].

The baked clay have been widely used in the construction of houses traditionally, since it is an economical product that uses cheap raw materials (clay, sand and water) and a simple manufacturing process of firing. However, since the arrival of clay bricks in the 1980s, the market for clay-based bricks has started to decrease, which is also partially due to construction systems that are based on exterior enclosures of concrete blocks. Nevertheless, the producers found technological barriers due to their

limitation as insulating objects, in addition to an inability to use them in low height buildings due to weight limits [4–6].

Nowadays, in the context of sustainable development and with thermal regulations, it is necessary to develop new construction materials with high thermal and mechanical performance. The incorporation of by-products or waste from different origins has been evaluated to improve these properties [7].

Historically, there are studies that have applied LCA to the materials used for the construction of buildings since the 1970s, especially in Germany [8–10]. Thus, life cycle analyses have been carried out in residential sectors, such as houses [11] or single-family homes [12], to establish strategies for reducing gas the emissions in residential sectors through new construction structures in hot and humid conditions [13].

Following the above strategies, studies are being carried out in the United Kingdom using LCA, which have demonstrated that introducing materials of biological origin, such as hemp, into the manufacture of construction materials can reduce the environmental impact. Hemp is a natural resource that has recently been used as a low environmental impact material in a series of composite products and as an insulating element in exterior wall construction of buildings [14–16].

It should be noted that during the brick manufacturing process, the thermal decomposition of the pore-forming agents (drying and firing stages) leads to an increase in the porosity of the material [17] and thus increases its insulating capacity [18–20].

Current environmental sustainability policies and associated concepts of bioclimatic architecture as well as social concern for general environmental aspects (global warming, increased damage to the ozone layer and the accumulation of waste) have caused the construction industry to be increasingly sensitive and obliged to consider new construction materials that reduce energy consumption, which requires the creation of innovative products that are sustainable. In fact, in Europe, the construction sector is responsible for 40–45% of primary energy consumption, which comprises a significant proportion of greenhouse gas emissions [21,22]. The use of sustainable materials would contribute to reduce these gas emissions.

With such expectation, some studies were carried out that have applied the LCA methodology for analysing the production of cellulose nanofibers as an organic biofuel additive to prevent the use of plastic materials. A previous study found the reduction in greenhouse gases by up to 75%; the reduction in production costs by 12%; and a 2- to 5-fold improvement in the energy efficiency of production [23]. In addition, the LCA model is currently being applied in numerous studies, such as one by Tsinghua University that aims to calculate the life-cycle fossil energy consumption and greenhouse gas emissions in China [24]. These studies promote that it is necessary to evaluate the environmental impact of construction materials using the LCA technique. Many scientific studies that use the LCA methodology compare different materials, highlighting those with a smaller impact on the environment [25,26].

The manufacture of new materials that reduce environmental impact by incorporating organic waste from other processes allows economic and social development in rural areas that generate such waste products [27].

A smaller impact on human health results from the reduction of environmental impacts in the processes of extraction and use of resources, the reduction in energy consumption and consequently, a reduction in the emission of CO<sub>2</sub> into the atmosphere [28].

The improvement of local industrial activity, which is based on traditional and sustainable materials with a smaller environmental impact, is the basis of the new models of Sustainable Circular Economy [29].

The objective of this research is to apply the LCA methodology to new samples of clay with the incorporation of biomass in order to determine new construction materials from the viewpoints of sustainability [30,31].

## 2. Materials and Methods

In this study, different samples of ceramic material have been used in bricks, which are made with products and resources from the nearby geographic area (Bailén, Jaén). The manufacturing process, including extraction, sieving, drying and firing of the materials, has been carried out in a similar way to industrial manufacturing so that the results can be extrapolated to greater production levels.

LCA is an adequate methodology to determine the environmental impact that occurs throughout the life cycle of products, services or processes. It also allows the determination of the impact of any phase independently from the rest [6].

To this end, a comparative study has been carried out between a sample made exclusively with 100% clay and a mixture composed of 15% barley components (leftovers that remain after the seed has been extracted from the cereal) and 85% of the base clay mixture (brick with red clay (BYRC)), which is called BB15 (Barley bagasse 15) [32].

These materials have been selected due to their low cost, availability and close location to the research centre. For this reason, the transport costs of the organic waste that are framed within a strategy of local circular economy, in which the Province of Jaén is involved in the recovery and reuse of this type of biological waste, have not been taken into account. Furthermore, during the firing process, the organic material degrades under the thermal effect, which produces pores that increase the sample's insulation capacity [33]. Thus, this results in reduced thermal bridging and improved energy efficiency in the construction of sustainable housing [34].

### 2.1. Development of Fired Clay Samples

The first sample is a reference sample without additives (BYRC). It contains 100% clay, which originated from Bailén (Jaén, Spain). Clay has been provided by a company in the sector. It was crushed to obtain a powder with particles of approximately 3 mm in order to promote thermal conductivity [35,36].

For the second sample (BB15), 85% of the reference sample (BYRC) was separated, to which 15% of barley bagasse was added as an additive and mixed in a laminator to improve the homogeneity, obtaining a sample with a biological basis.

The bagasse was provided by the Heineken brewery (Jaén, Spain) located in Jaén's capital. It was crushed and sieved to obtain a milling of less than 0.5 mm. The amount of incorporated additive was chosen to be consistent with previous studies [37–39].

The required amount of water was added to obtain the desired moisture and plasticity that are necessary to avoid defects in the structure during the process. Subsequently, the samples were modelled by an extrusion process in the form of tablets (175 × 79 × 17 mm), dried at the temperatures of up to 105 °C and finally fired by increasing the temperature progressively for 11 h until the maximum temperature of 920 °C was reached. The samples remained at this temperature for 1 h afterwards according to the industrial recommendations of the ceramic sector.

The clay and waste were milled with an analytical mill (IKA MF-10) and later separated by size using ASTM (American Society for Testing Materials) standard sieve series (ASTM mesh/size mm: 3.50/5.60, 4/4.75, 6/3.35 and 7/2.8) and a CISA (Cedacera Industrial S.L., Barcelona, Spain) screening (model RP-15). The instrument had a tolerance error of ±2%. Besides, each used sieve had an error of ±5%. A sample of 100 g of solid was sieved. The analysis was conducted according to the standard UNE-EN 933-2.

After this, the samples were shaped using a pneumatic laboratory extruder Nannini Renato TP-01 model, dried at the temperatures of up to 105 °C in an oven (CR MARES S.A. 204 Model) and finally, the sintering of these test specimens was performed in an electric chamber furnace (NABERTHERM LA 60/14 model) with increases in temperature as follows: 3 °C/min from room temperature to 400 °C; 2 °C/min from 400 °C to 700 °C; 1 °C/min from 700 °C to 920 °C and maintaining the temperature steady at 920 °C for 1 h.

## 2.2. Life-Cycle Analysis (LCA)

The life cycle analysis was carried out using the ISO 14040 standards (Table 1) to define the principles and framework and according to ISO 14044 to describe the different stages of the analysis [40–42].

**Table 1.** ISO 14040. Resource AENOR.es.

| Standard          | Description   | Edition |
|-------------------|---|---------|
| ISO 14040:2006    | Environmental Management. Life Cycle Assessment. Principles and Framework.  | 2006    |
| ISO 14044:2006    | Environmental Management. Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines.   | 2006    |
| ISO/TR 14047:2012 | Environmental Management. Life Cycle Assessment. Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations. | 2006    |

### 2.2.1. Objective and Scope

The LCA of the brick products including organic waste was carried out in the present study, which followed the process to obtain the clay samples. The study was aimed to analyse and compare the environmental impacts of the different formulations and identify the unit of the process that presents the strongest environmental impact in an ecological design approach, as the main environmental benefit in construction is to reuse the bricks and recycle the aggregates [43].

In order to build an inventory of production and establish the scope of the study, the functional unit is defined as the production of 1 kg of clay with a fixed thermal resistance.

The LCA methodology allows the determination of the environmental impact of the processes, products or systems analysed in different ways. Essentially, one can analyse certain stages of the life cycle or analyse the entire cycle. The present investigation focused only on the impact associated with the production of the new samples, thus performing the “cradle to gate” studies.

The studied system used the raw materials (clay, sand, water and vegetable matter) from the laboratory and takes into account the energy consumed in production (sieving, drying and firing). In order to overcome the potential limitations, the initial hypotheses are defined as follows:

- The electricity used considers that the production mix corresponds to the Spanish energy production system.
- The cleaning of the different devices used in the process is dismissed since it is not a considerable percentage.
- The transport of material has been considered. For each component of the material, the relevant distance covers from the point of processing or extraction of quarry to the study laboratory for calculation purposes [44].

The evaluation of the life cycle impact of the use of bagasse for brick construction was carried out using LCA SimaPro software 8.30 [45], which is widely used [46].

### 2.2.2. Life-Cycle Inventory

For the life cycle inventory, all inputs and outputs of the system were listed for the different stages of the life cycle. Figure 1 shows a flow diagram of the different steps of the process with the associated flows, while Figure 2 shows the inputs, which are also called foreground data that have their own life cycle. These environmental impacts (background data) are taken into account for the overall evaluation of the life cycle of the product [47,48].

The inventory data were obtained directly from the experiments or through the use of data collected from industrial producer partners or from bibliographic references. The consumption data of the different processes are shown in Table 2.

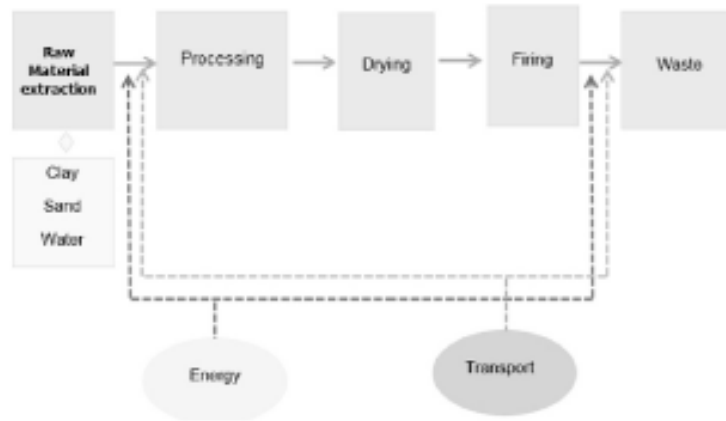


Figure 1. Clay cycle.

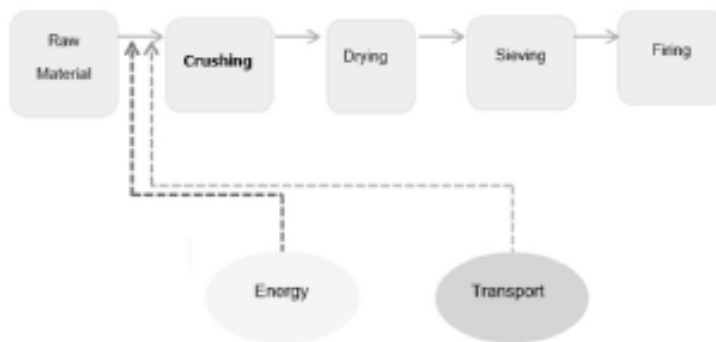


Figure 2. Barley cycle.

Table 2. Inventory data of the different processes.

| Inventory Data            |                       |          |                       |          |
|---------------------------|-----------------------|----------|-----------------------|----------|
| Concept                   |                       |          |                       |          |
| <b>Raw Materials (kg)</b> | <b>BYRC (kg)</b>      | <b>%</b> | <b>BB15 (kg)</b>      | <b>%</b> |
| Mix clay + sand           | 0.683                 | 68.30    | 0.662                 | 66.20    |
| Barley                    |                       |          | 0.021                 | 2.10     |
| Water                     | 0.317                 | 31.70    | 0.317                 | 31.70    |
| Total                     | 1.00                  | 100.00   | 1.00                  | 100.00   |
| <b>Energy (MJ)</b>        |                       |          |                       |          |
| Cutting                   |                       |          | 0.335                 |          |
|                           |                       |          | 0.121                 |          |
| Crushing                  | 0.250                 |          | 0.333                 |          |
| Drying                    | 0.083                 |          |                       |          |
| Firing                    | 25.400                |          | 21.515                |          |
| Total                     | 25.733                | 100.00   | 22.304                | 100.00   |
| <b>Transport (tKm*)</b>   |                       |          |                       |          |
| Lorry (3.3 t)             | $6.66 \times 10^{-5}$ |          | $1.88 \times 10^{-5}$ |          |

tKm\*. This unit represents the transport of 1 tonne of material for 1 km.

### 2.2.3. Impact Evaluation

The objective of the present study is to compare the results obtained by the two methods. On the one hand, the IMPACT 2002+ method considers the four categories of damage-oriented impact—human health, ecosystem quality, climate change and resources—separately. On the other hand, the ReCiPe Endpoint v1.12 method considers only three categories of damage-oriented impact: human health, ecosystem quality and resources.

With the data previously provided, an evaluation of the environmental impact of the samples was carried out using software SimaPro 8.30. A comparative study was performed using two evaluation methods to check for possible differences in the results. The ReCiPe Endpoint v1.12 method was used first [49]. This method evaluated the damage caused in four impact categories, whose characteristics are described in Table 3 [30,44,50–52]. Impact 2002+ v2.12 was the second analysis method [53,54].

**Table 3.** Indicators of impacts according to ReCiPe Endpoint v1.12

| Impact Category          | Category Indicator  | Measurement Units         |
|--------------------------|---------------------|---------------------------|
| Quality of the ecosystem | FDP *               | FDP/m <sup>2</sup> × year |
| Human health             | DALY **             | People/year               |
| Natural resources        | Damage to resources | MJ/Kg                     |
| Abiotic resources ***    | Exhaustion          | Kg                        |

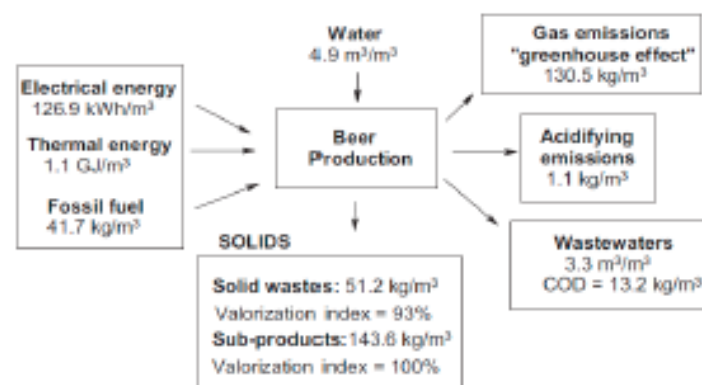
\* Fraction of potential disappearance of the ecosystem per m<sup>2</sup> and year. \*\* Disability-adjusted life year: Reduction of years of life per person/year. \*\*\* Climatic, geological and geographical resources. Biodiversity.

### 3. Results

The objective of the study was to compare the environmental impact of the two formulations developed. The functional unit has been defined as the production of 1 kg of the porous sample, corresponding to that of the reference sample without the vegetable agent [19].

The brewing process consumes a considerable amount of energy and uses large volumes of water. The beer is fermented by selected yeasts from the barley malt, which is used alone or mixed with other starchy products that can be transformed into sugars by enzymatic digestion. Subsequently, the beer is subjected to a cooking process and added with hops and/or its derivatives [38].

Next, a mass balance is presented regarding water and energy inputs, as well as the outputs with respect to waste and by-products, liquid effluents, and emissions to the atmosphere (Figure 3) [39].



**Figure 3.** Mass balance with respect to brewing [39].

Bagasse is an organic fraction solid waste. During the total process of obtaining beer, 16.99–23.09 kg of waste is obtained for each hectolitre of bottled beer. As indicated above, this bagasse is a by-product

of the brewing industry that results from the pressing and filtering process after the saccharification of cereal grain (barley, basically) malting. Its content in dry matter is 20–25%.

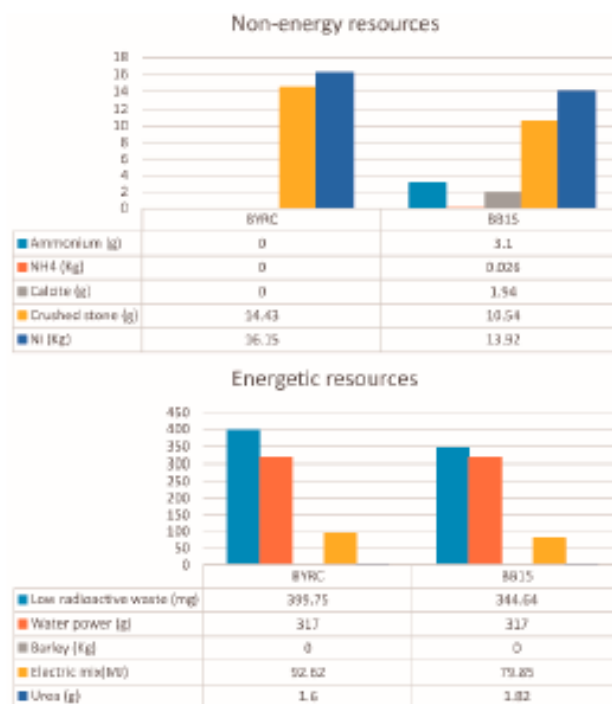
The residue from the brewing industry has a protein content of around 24–26% in dry matter. It is also rich in fibre as it has NDF (Neutral Detergent Fiber) content of 44% (cellulose, hemicellulose and lignin content of the cell wall) and FAD (Acid Detergent fiber) content of 20% (cell wall content estimator in cellulose and lignin). On the other hand, it has a lignin content of 5%, ash content of 7%, P content of 6 g/kg and Ca content of 3 g/kg. The metabolizable energy content is 2.86 Mcal/kg [38,39].

### 3.1. Method ReCiPe Endpoint v1.12

Once the inventory data have been entered, the SimaPro software and the ReCiPe Endpoint v1.12 method provides the results shown in Table 4 and Figure 4, where the contribution amounts provided by the different clay samples can be analysed in each impact category. These data were provided by the program once the different amounts of raw materials and processes were introduced [55].

**Table 4.** Analysis of the energy and non-energy resources of the comparative cycle of clay samples as a base.

| Non-Energy Resources | BYRC  | BB15  | Energetic Resources        | BYRC   | BB15   |
|----------------------|-------|-------|----------------------------|--------|--------|
| Ammonium (g)         | 0     | 3.10  | Low radioactive waste (mg) | 399.75 | 344.64 |
| NH4 (Kg)             | 0     | 0.026 | Water power (g)            | 317    | 317    |
| Calcite (g)          | 0     | 1.94  | Barley (Kg)                | 0      | 0.15   |
| Crushed stone (g)    | 14.43 | 10.54 | Electric mix (MJ)          | 92.62  | 79.85  |
| Ni (Kg)              | 16.15 | 13.92 | Urea (g)                   | 1.60   | 1.82   |



**Figure 4.** Comparative graphic analysis of the energy and non-energy resources of the comparative cycle of clay samples as a base using the first method, the ReCiPe Endpoint v1.12.

The general comparison of the scenarios represents the relative percentage in each impact category. The most impressive scenario in the category represents 100% and the others are calculated according to the latter. The comparison with the scenario of the BB15 sample using the ReCiPe Endpoint v1.12 method is presented in Figure 5.

The reference sample without a pore-forming agent shows a maximum impact in the 12 impact categories. Therefore, in the three categories of damage, namely human health, ecosystem and resources, there is a gap or difference of 10–22% compared to the other scenarios. In Figure 5, the impacts of the two samples are compared, which shows that the base sample (BYRC) usually produces a greater impact than the sample to which biological material has been added (BB15). Likewise, the electricity consumption is higher in the base sample, so the aspects related to resources are affected in the final result.

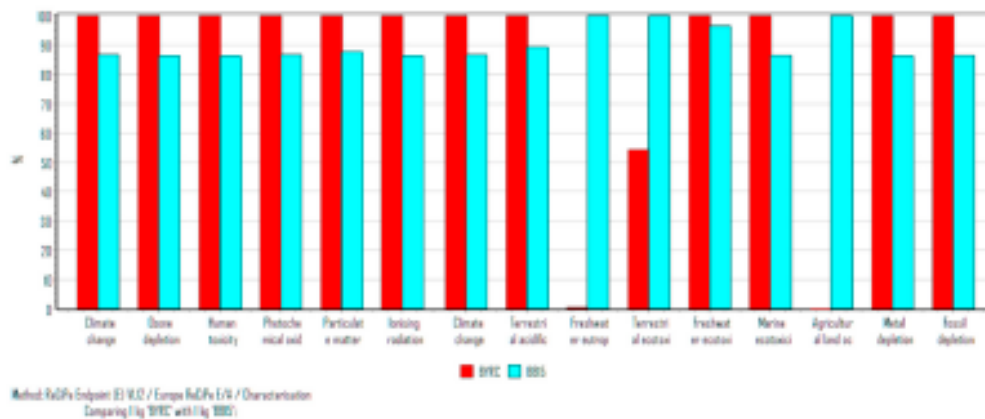


Figure 5. Comparative impact of the samples analysed with ReCiPe Endpoint v1.12 method.

In Figure 6, the impact of the samples on human health, ecosystem and resources is observed. In the base sample (BYRC), the impacts are slightly higher on human health, ecosystems, and resources, as compared with BB15 sample.

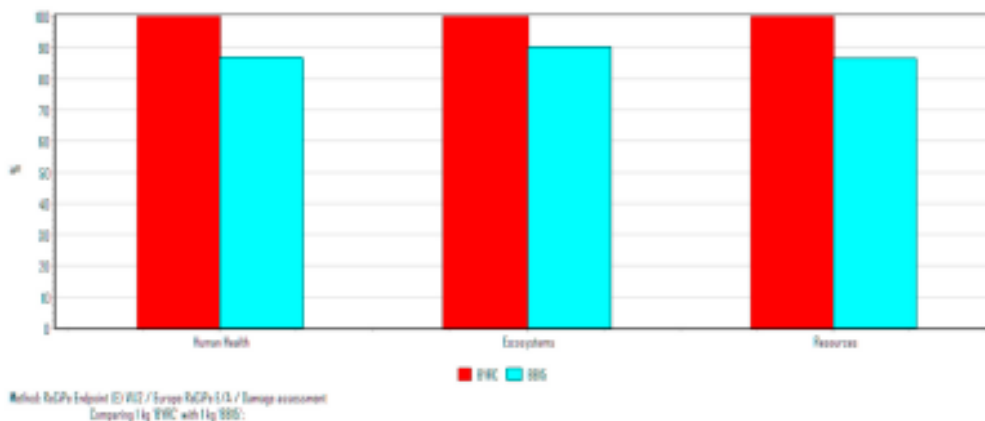


Figure 6. Damage assessment of the samples with ReCiPe Endpoint v1.12 method.

By performing an analysis of the samples using the single score, it is easy to determine the impact that each sample has on the three aspects with the ReCiPe Endpoint v1.12 method. As seen in Figures 7 and 8, the base sample (BYRC) has the greatest impact.

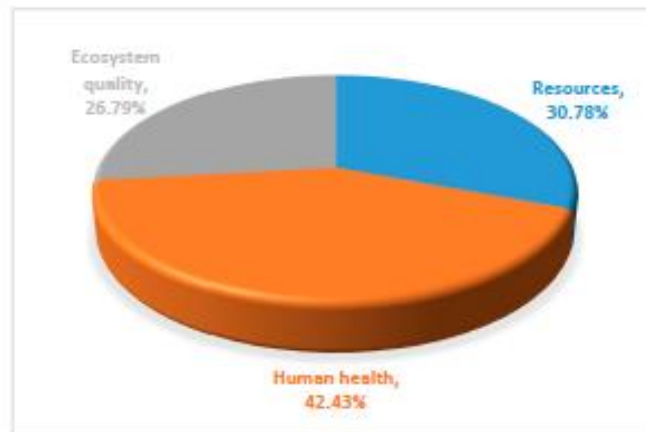


Figure 7. Contribution of BYRC base to each damage category as calculated using the ReCiPe Endpoint v1.12 method.

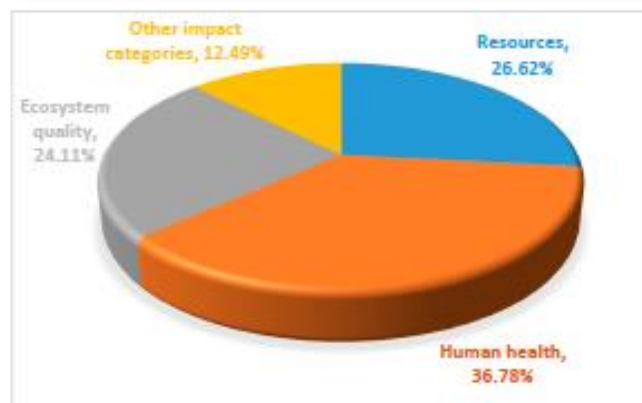


Figure 8. Contribution of BB15 base to each damage category as calculated using the ReCiPe Endpoint v1.12 method.

The results in Figures 7–9 and Table 5 show the quantities of the flows that have the greatest impact on resources, air emissions, and human health. The greatest impact is the emission of CO<sub>2</sub> into the atmosphere, which is mainly due to the electrical energy consumed in the firing phase, followed by the emissions of Methane, Sulfur Dioxide and Nitrogen Dioxide.

By analysing the different stages of the processes studied, the software gives the information about those that are responsible for the greatest impacts. The results are presented in Figure 9 and Table 5.

It appears that the cutting and the firing steps have the most significant impact on the life cycle of the products, representing 92–98% in the 15 categories of impacts (Figure 5).

Similar results were observed with Impact 2002+ methods (Figure 10). These results can be explained by the large consumption during cutting and firing, which is reduced in the BB15 sample due to the incorporation of organic matter.

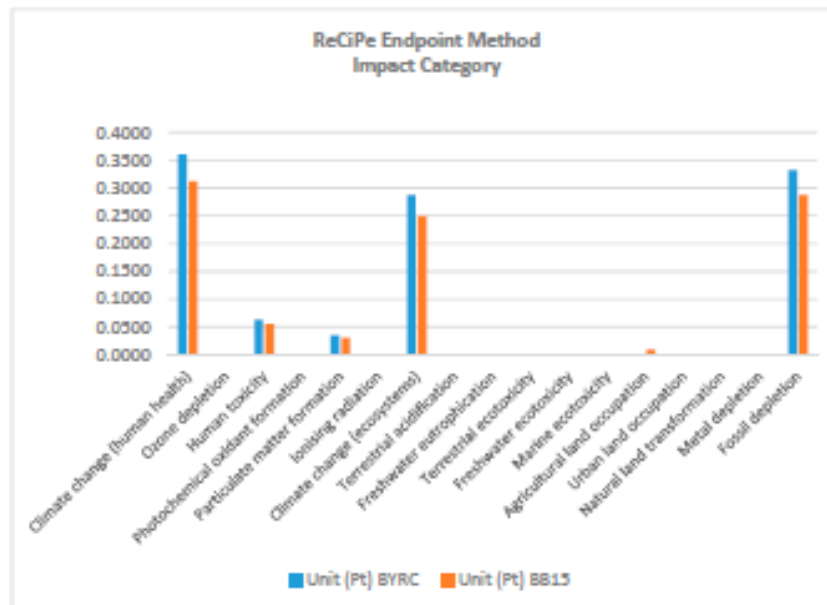


Figure 9. Impacts on the ecosystem as calculated using the ReCiPe Endpoint v1.12 method.

Table 5. Analysis of Impact category results calculated using the ReCiPe Endpoint v1.12 method.

| ReCiPe Endpoint Method<br>Impact Category | Unit (Pt)     |               |
|---|---------------|---------------|
|   | BYRC          | BB15          |
| Climate change (human health)             | 0.3603        | 0.3122        |
| Ozone depletion                           | 0.0000        | 0.0000        |
| Human toxicity                            | 0.0633        | 0.0547        |
| Photochemical oxidant formation           | 0.0000        | 0.0000        |
| Particulate matter formation              | 0.0347        | 0.0304        |
| Ionising radiation                        | 0.0003        | 0.0002        |
| Climate change (ecosystems)               | 0.2875        | 0.2491        |
| Terrestrial acidification                 | 0.0011        | 0.0010        |
| Freshwater eutrophication                 | 0.0000        | 0.0000        |
| Terrestrial ecotoxicity                   | 0.0002        | 0.0004        |
| Freshwater ecotoxicity                    | 0.0000        | 0.0000        |
| Marine ecotoxicity                        | 0.0008        | 0.0007        |
| Agricultural land occupation              | 0.0000        | 0.0094        |
| Urban land occupation                     | 0.0000        | 0.0000        |
| Natural land transformation               | 0.0000        | 0.0000        |
| Metal depletion                           | 0.0010        | 0.0008        |
| Fossil depletion                          | 0.3317        | 0.2869        |
| <b>Total</b>                              | <b>1.0809</b> | <b>0.9459</b> |

### 3.2. Impact 2002+ v2.12 Method

The Impact 2002+ method provides additional information about the factors that influence climate change. Figure 10 shows that of the 15 indicators, 11 contribute the greatest impact and correspond to the base sample (BYRC), while the samples with biological material show a higher impact in only 4. These results are practically similar to the impacts shown in Figure 11, which also includes the information on the damage of the samples due to climate change.

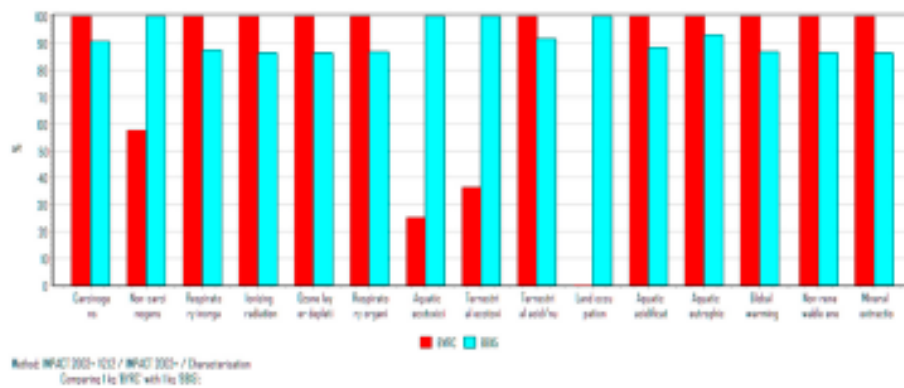


Figure 10. Comparative impact of the samples analysed with Impact 2002+ v2.12 method.

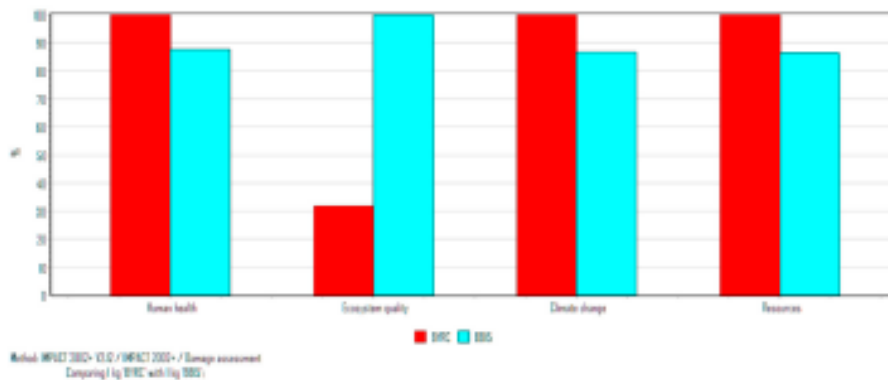


Figure 11. Evaluation of the damage of the samples with Impact 2002+ v2.12 method.

Figures 10 and 11 show how the results give similar percentages in the three categories of impact that are common to the two methods. There is a lower percentage in the sample with organic matter. However, the data given by the method of Impact 2002+ in terms of the quality of the ecosystems show that a much higher value was obtained for the sample BB15 (Figures 6 and 11).

Figure 12 and Table 6 show how the greatest impact on resources occurs, both for the extraction of raw materials and for obtaining the raw materials that are necessary to produce the electrical energy needed in the manufacturing processes of the new material.

Table 6. Analysis of Impact category results with Impact 2002+ v2.12 method.

| Impact 2002+ Method     | Unit (Pt)     |               |
|-------------------------|---------------|---------------|
|                         | BYRC          | BB15          |
| Carcinogens             | 0.0005        | 0.0004        |
| Non-carcinogens         | 0.0021        | 0.0036        |
| Respiratory inorganics  | 0.6948        | 0.6077        |
| Ionizing radiation      | 0.0048        | 0.0041        |
| Ozone layer depletion   | 0.0001        | 0.0000        |
| Respiratory organics    | 0.0006        | 0.0005        |
| Aquatic ecotoxicity     | 0.0000        | 0.001         |
| Terrestrial ecotoxicity | 0.0005        | 0.0005        |
| Terrestrial acid/nutri  | 0.0118        | 0.0108        |
| Land occupation         | 0.0000        | 0.0075        |
| Global warming          | 1.0075        | 0.9250        |
| Non-renewable energy    | 1.2555        | 1.0851        |
| Mineral extraction      | 0.0001        | 0.0001        |
| <b>Total</b>            | <b>3.0411</b> | <b>2.6744</b> |

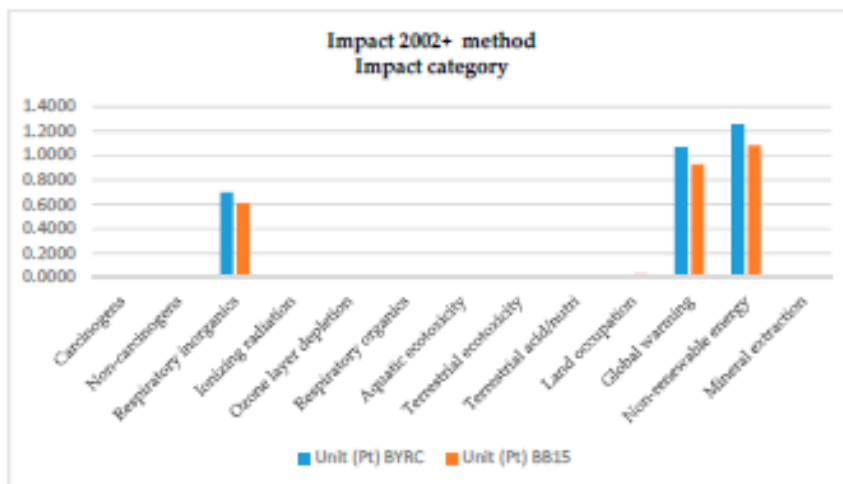


Figure 12. Impacts on the ecosystem with Impact 2002+ v2.12 method.

Comparing Figures 13 and 14, it was observed that a considerable improvement can be achieved in the reduction of the impacts in all categories, with the greatest improvement in resources.

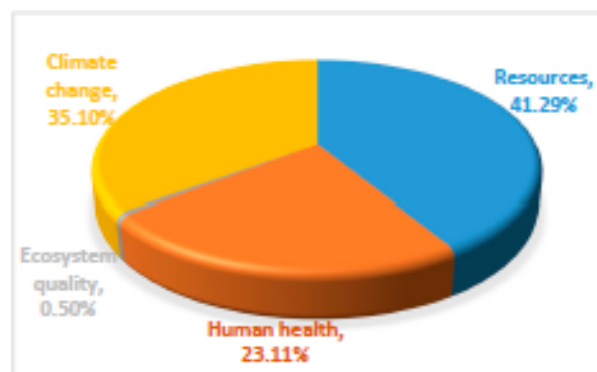


Figure 13. Contribution of BYRC base to each damage category as calculated using Impact 2002+ v2.12 method.

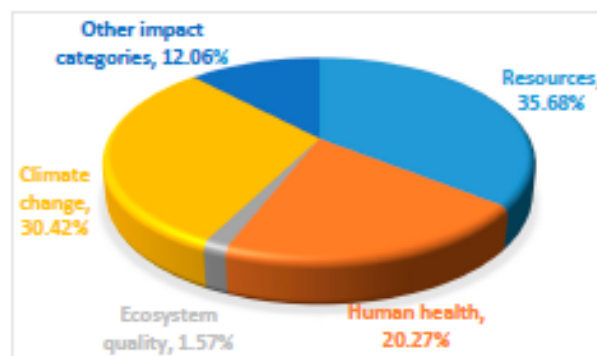


Figure 14. Contribution of BB15 base to each damage category as calculated using Impact 2002+ v2.12 method.

#### 4. Discussion

To deduce the results of environmental impact, the physical and mechanical properties and heating values of the bagasse for both bricks were analysed (Tables 7–9).

Table 7. Physical and mechanical properties.

| Firing Temp. (°C) | Waste (%) | Linear Shrinkage (%) | Weight Loss (%) | Suction (kg/m <sup>2</sup> -min) | Water Absorption 24 h (%) | Boiled Water Absorption (%) |
|-------------------|-----------|----------------------|-----------------|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 920               | 0         | 0.10 ± 0.05          | 9.20 ± 0.04     | 2.416 ± 0.068                    | 13.78 ± 0.18              | 15.86 ± 0.14                |
|                   | 10        | -0.16 ± 0.12         | 19.49 ± 0.05    | 4.174 ± 0.088                    | 26.71 ± 0.16              | 33.34 ± 0.41                |

Table 8. Physical and mechanical properties.

| Firing Temp. (°C) | Waste (%) | Open Porosity (%) | Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> ) | Compressive Strength (MPa) | Thermal Conductivity (w/mK) |
|-------------------|-----------|-------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 920               | 0         | 29.15 ± 0.26      | 1832.3 ± 1.10                     | 42.00 ± 1.61               | 0.68 ± 0.02                 |
|                   | 10        | 46.86 ± 0.40      | 1405.4 ± 0.99                     | 9.20 ± 0.37                | 0.47 ± 0.01                 |

Table 9. Heating Value (HV) of Bagasse.

|                     |        |
|---------------------|--------|
| Higher HV (Kcal/kg) | 4761.5 |
| Lower HV (Kcal/kg)  | 4362.9 |

Bulk density decreased but open porosity increased by the addition of residue. The addition of bagasse generated greater porosity due to its high content of organic matter. This can be seen in the weight loss of approximately 20%.

The samples of bagasse with addition of 10% of residue do not meet the minimum value of compressive strength of 10 MPa for ceramic bricks, which is the limit set by the Spanish Association for Standardization and Certification (AENOR), although this value is close to the required limit. This material could be used for the construction of the elements that should not withstand high loads.

The use of organic waste in the studied percentage decreases the capacity of bricks to the values of acceptable compressive strength. This is because the burning of organic waste creates more porous bricks [56]. However, the use of waste from brewing industries can provide environmental and economic benefits since it could be considered as raw materials to produce some new products. As shown in the aforementioned figures, the addition of organic waste can save energy because this waste has a higher heating value and, therefore, it could be said that the inclusion of waste in building material may contribute to sustainability from an environmental point of view [57,58].

These obtained results are consistent with the findings of other research that studied the potential environmental effect of waste valorisation through the development of ceramic materials compared with traditional ceramic materials [59].

#### 5. Conclusions

In this investigation, the environmental impacts of two brick samples have been studied using life cycle analysis: one with a traditional sample and the other with a mixture of clay and organic waste. In addition, the results have been verified using two different methods.

For the biological sample, a vegetable additive, which was specifically barley bagasse, was incorporated into a traditional clay base in order to check for improvement in the aspects of weight and environmental contamination without modification of the physical and mechanical properties. The study focused on the environmental impact, which required Life Cycle Analysis using the ReCiPe Endpoint v1.12 characterization method and the Impact 2002+ method. It was observed that the incorporation of plant additives into the matrix decreases the impact by 15–20% compared with the reference sample.

The reduction in the impacts results from the lower use of the original raw materials since the incorporation of organic waste reduces the extraction of fossil materials. This occurs in the extraction phase.

In the production phase, the sample with organic waste needs to reach a lower temperature compared to the BYRC base. This is because the organic waste is burned and the pores are produced during the brick manufacturing process.

The two most important impacts that are reduced with the BB15 sample are the levels of CO<sub>2</sub> and Methane released to the atmosphere, which are responsible for the ozone layer depletion.

With the damage assessment, the obtained data show that the improvement in the quality of ecosystems was quite significant due to the use of organic waste, which could also lead to reduce the impact of climate change. Therefore, a clear reduction of the environmental impact is possible using a biological vegetable and clay mixed brick. It shows a reduction in the impact generated by obtaining and transforming the raw materials.

The use of organic waste in brick production would be a very interesting innovation in the field of sustainable construction as waste can be utilized to reduce its impact on environment. In the future, new sustainable building materials could be used in construction to study their real behaviour.

According to the results obtained and taking into account both sustainable development and the regulations on energy efficiency, it can be deduced that the development of new materials using by-products or wastes is necessary to facilitate their incorporation into the cycle of industrial life. This would reduce energy and resource consumption as well as greenhouse gas emissions.

The use of materials with a low cost and of a plant origin, which are also located close to the production centres, and their reincorporation into the manufacturing processes through the use of waste in a circular economy environment could become an opportunity for improvement and sustainable development in the future.

**Author Contributions:** Conceptualization, J.A.L.-M. and C.M.-G.; Methodology, J.A.L.-M. and M.J.H.-O.; Software, J.A.L.-M. and C.M.-G.; Validation, J.A.L.-M.; M.J.H.-O. and C.M.-G.; Formal Analysis, Rojas-Sola; Investigation, J.A.L.-M. and M.J.H.-O.; Resources, J.A.L.-M.; C.M.-G.; M.J.H.-O. and J.I.R.-S.; Data Curation, J.A.L.-M. and C.M.-G.; Writing-Original Draft Preparation, J.A.L.-M. and M.J.H.-O.; Writing-Review & Editing, M.J.H.-O. and J.I.R.-S.; Visualization, J.A.L.-M.; Supervision, C.M.-G.; M.J.H.-O. and J.I.R.-S.; Project Administration, J.A.L.-M. and M.J.H.-O.

**Funding:** This research was conducted as part of the SmartMats (MAT2015-70034-R) Project, “Smart materials for sustainable construction”, which was funded by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness and FEDER. (MINECO-FEDER). The authors gratefully acknowledge this support. The authors also gratefully acknowledge the technical and human supports provided by CICT of the University of Jaén (UJA, MINECO, Junta de Andalucía, FEDER).

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Edwards, B. *Rough Guide to Sustainability*, 3rd ed.; RIBA Enterprises: London, UK, 2010.
2. Pittau, E.; Krause, E.; Lumia, G.; Habert, G. Fast-Growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls. *Build. Environ.* **2018**, *129*, 117–129. [[CrossRef](#)]
3. Dong, L.; Wang, Y.; Li, H.X.; Jiang, B.Y.; Al-Hussein, M. Carbon Reduction Measures-Based LCA of Prefabricated Temporary Housing with Renewable Energy Systems. *Sustainability* **2018**, *10*, 718. [[CrossRef](#)]
4. Kornmann, M. *Clay Building Materials: Manufacturing and Properties*; New South Wales Technical and Further Education Commission: New South Wales, Australia, 2005.
5. De Schepper, M.; Van den Heede, P.; Van Driessche, I.; De Belie, N. Life Cycle Assessment of Completely Recyclable Concrete. *Materials* **2014**, *7*, 6010–6027. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Bories, C.; Vedrerne, E.; Paulhe-Massol, A.; Vilarem, G. Development of porous fired clay bricks with bio-based additives: Study of the environmental impacts by Life Cycle Assessment (LCA). *Constr. Build. Mater.* **2016**, *125*, 1142–1151. [[CrossRef](#)]
7. Horn, R.; Dahy, H.; Gantner, J.; Speck, O.; Leistner, P. Bio-Inspired Sustainability Assessment for Building Product Development-Concept and Case Study. *Sustainability* **2018**, *10*, 130. [[CrossRef](#)]

8. Dong, Y.H.; Ng, S.T. A life cycle assessment model for evaluating the environmental impacts of building construction in Hong Kong. *Build. Environ.* **2015**, *89*, 183–191. [[CrossRef](#)]
9. Weibenberger, M.; Jenschb, W.; Lang, W. The convergence of life cycle assessment and nearly zero-energy buildings: The case of Germany. *Energy Build.* **2014**, *76*, 551–557. [[CrossRef](#)]
10. Finnveden, G.; Hauschild, M.Z.; Ekvall, T.; Guinée, J.; Heijungs, R.; Hellweg, S. Recent developments in life cycle assessment. *J. Environ. Manag.* **2009**, *91*, 1–21. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
11. Cuellar-Franca, R.M.; Azapagic, A. Environmental impacts of the UK residential sector: Life cycle assessment of houses. *Build. Environ.* **2012**, *54*, 86–99. [[CrossRef](#)]
12. Soust-Verdaguer, B.; Llatas, C.; Garcia-Martinez, A. Simplification in life cycle assessment of single-family houses: A review of recent developments. *Build. Environ.* **2016**, *103*, 215–227. [[CrossRef](#)]
13. Balasbaneh, A.T.; Bin-Marsono, A.K. Strategies for reducing greenhouse gas emissions from residential sector by proposing new building structures in hot and humid climatic conditions. *Build. Environ.* **2017**, *124*, 357–368. [[CrossRef](#)]
14. Kenneth, I.P.; Miller, A. Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime wall constructions in the UK. *Resour. Conserv. Recycl.* **2012**, *69*, 1–9. [[CrossRef](#)]
15. Islam, H.; Jollands, M.; Setunge, S.; Ahmed, I.; Haque, N. Life cycle assessment and life cycle cost implications of wall assemblages designs. *Energy Build.* **2014**, *84*, 33–45. [[CrossRef](#)]
16. Aouba, L.; Bories, C.; Coutand, M.; Perrin, B.; Lemerrier, H. Properties of fired clay bricks with incorporated biomasses: Cases of olive stone flour and wheat straw residues. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *102*, 7–13. [[CrossRef](#)]
17. Russ, W.; Mörtel, H.; Meyer-Pittroff, R. Application of spent grains to increase porosity in bricks. *Constr. Build. Mater.* **2005**, *19*, 117–126. [[CrossRef](#)]
18. Barbieri, L.; Andreola, E.; Lancellotti, L.; Taurino, R. Management of agricultural biomass wastes: Preliminary study on characterization and valorisation in clay matrix bricks. *Waste Manag.* **2013**, *33*, 2307–2315. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
19. Bories, C.; Borredon, M.E.; Vedrenne, E.; Vilarem, G. Development of eco-friendly porous fired clay bricks using pore-forming agents: A review. *J. Environ. Manag.* **2014**, *143*, 186–196. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
20. Mohammed, M.S.; Ahmed, A.I.; Osman, R.M.; Khattab, I. Combinations of organic and inorganic wastes for brick production. *Polym. Compos.* **2014**, *35*, 174–179. [[CrossRef](#)]
21. United Nations Environment Programme (UNEP). *Buildings and Climate Change: Status, Challenges and Opportunities*; UNEP: Nairobi, Kenya, 2006.
22. Navajas, A.; Uriarte, I.; Gandia, L.M. Application of Eco-Design and Life Cycle Assessment Standards for Environmental Impact Reduction of an Industrial Product. *Sustainability* **2017**, *9*, 1724. [[CrossRef](#)]
23. Moon, D.; Sagisaka, M.; Tahara, K.; Tsukahara, K. Progress towards Sustainable Production: Environmental, Economic, and Social Assessments of the Cellulose Nanofiber Production Process. *Sustainability* **2017**, *9*, 2368. [[CrossRef](#)]
24. Peng, T.D.; Zhou, S.; Yuan, Z.Y.; Ou, X.M. Life Cycle Greenhouse Gas Analysis of Multiple Vehicle Fuel Pathways in China. *Sustainability* **2017**, *9*, 2183. [[CrossRef](#)]
25. Monteiro, H.; Freire, F. Life-Cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods. *Energy Build.* **2012**, *47*, 572–583. [[CrossRef](#)]
26. Pargana, N.; Pinheiro, M.D.; Silvestre, J.D.; Brito, J. Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings. *Energy Build.* **2014**, *82*, 466–481. [[CrossRef](#)]
27. Mohajerani, A.; Uluwatta, A.; Setunge, S. Fired-Clay Bricks Incorporating Biosolids: Comparative Life-Cycle Assessment. *J. Mater. Civil Eng.* **2018**, *30*. [[CrossRef](#)]
28. Lamnatou, C.; Lecoeuve, B.; Chemisana, D.; Cristofari, C.; Canaletti, J.L. Concentrating photovoltaic/thermal system with thermal and electricity storage: CO<sub>2eq</sub> emissions and multiple environmental indicators. *J. Clean. Prod.* **2018**, *192*, 376–389. [[CrossRef](#)]
29. Diaz-Garcia, A.; Martinez-Garcia, C.; Cotes-Palomino, T. Properties of Residue from Olive Oil Extraction as a Raw Material for Sustainable Construction Materials. Part I: Physical Properties. *Materials* **2017**, *10*, 100. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
30. Silvestre, J.D.; Pargana, N.; de Brito, J.; Pinheiro, M.D.; Durao, V. Insulation Cork Boards-Environmental Life Cycle Assessment of an Organic Construction Material. *Materials* **2016**, *9*, 394. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

31. Kua, H.W.; Kamath, S. An attributional and consequential life cycle assessment of substituting concrete with bricks. *J. Clean. Prod.* **2014**, *81*, 190–200. [[CrossRef](#)]
32. Naked-Ha, A.; de Moraes-Sedrez, M.; Pires-Condeixa, K.; Jorge Evangelista, A.C.; Thomas-Boer, D. Life Cycle Assessment: A Comparison of Ceramic Brick Inventories to Subsidize the Development of Databases in Brazil. *Appl. Mech. Mater.* **2013**, *431*, 370–377. [[CrossRef](#)]
33. Fu, Y.C.; Zhu, H.Y.; Shen, J.Y. Thermal decomposition of dimethoxymethane and dimethyl carbonate catalyzed by solid acids and bases. *Thermochim. Acta* **2005**, *434*, 88–92. [[CrossRef](#)]
34. Kayo, C.; Noda, R. Climate Change Mitigation Potential of Wood Use in Civil Engineering in Japan Based on Life-Cycle Assessment. *Sustainability* **2018**, *10*, 561. [[CrossRef](#)]
35. Garcia-Ten, J.; Orts, M.J.; Saburit, A.; Silva, G. Thermal conductivity of traditional ceramics. Part I: Influence of bulk density and firing temperature. *Ceram. Int.* **2010**, *36*, 1951–1959. [[CrossRef](#)]
36. Garcia-Ten, J.; Orts, M.J.; Saburit, A.; Silva, G. Thermal conductivity of traditional ceramics. Part II: Influence of mineralogical composition. *Ceram. Int.* **2010**, *36*, 2017–2024. [[CrossRef](#)]
37. Bories, C. *Study of the Characteristics of a Bio-Based Pore-Forming Agent and Mechanisms Used to Obtain a Micro-Porous Building Brick with High Thermal and Mechanical Properties*; Institut National Polytechnique des Sciences des Agrossources: Toulouse, France, 2015.
38. Olajire-Abass, A. The brewing industry and environmental challenges. *J. Clean. Prod.* **2012**, *1*, 21. [[CrossRef](#)]
39. Oreopoulou, V.; Russ, W. *Utilization of By-Products and Treatment of Waste in the Food Industry*; Oreopoulou, V., Russ, W., Eds.; Springer: Berlin, Germany, 2007; p. 111.
40. British Standards Institution (BSI). *ISO 14040:2006 Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework*; BSI London, UK, 2006.
41. British Standards Institution (BSI). *ISO 14044:2006 Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines*; BSI London, UK, 2006.
42. Fraile-Garcia, E.; Ferreiro-Cabello, J.; Lopez-Ochoa, L.M.; Lopez-Gonzalez, L.M. Study of the Technical Feasibility of Increasing the Amount of Recycled Concrete Waste Used in Ready-Mix Concrete Production. *Materials* **2018**, *10*, 817. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
43. De Klijn-Chevalerias, M.; Javed, S. The Dutch approach for assessing and reducing environmental impacts of building materials. *Build. Environ.* **2017**, *111*, 147–159. [[CrossRef](#)]
44. Laso, J.; Garcia-Herrero, I.; Margallo, M.; Vazquez-Rowe, I.; Fullana, P.; Bala, A.; Gazulla, C.; Irabien, A.; Aldaco, R. Finding an economic and environmental balance in value chains based on circular economy thinking: An eco-efficiency methodology applied to the fish canning industry. *Resour. Conserv. Recycl.* **2018**, *133*, 428–437. [[CrossRef](#)]
45. *PRé Consultants*; Version 7.2.3; SimaPro LCA Software: Amersfoort, The Netherlands, 2010.
46. Pieragostini, C.; Mussati, M.C.; Aguirre, P. On process optimization considering LCA methodology. *J. Environ. Manag.* **2012**, *96*, 43–54. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
47. De Diego-Álvarez, J.; Sáez-Gómez, V.; Jiménez-Camacho, J.; Cintas-Álvarez, J.M.; Laguna-Martínez, J.A. *Herramientas para la Optimización Energética en la Fabricación de Materiales Cerámicos*; Fundación Innovarcilla: Bailén, Spain, 2012.
48. Farias, R.D.; Martínez-García, C.; Cotes-Palomino, T.; Martínez-Arellano, M. Effects of Wastes from the Brewing Industry in Lightweight Aggregates Manufactured with Clay for Green Roofs. *Materials* **2017**, *10*, 527. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
49. Abin, R.; Laca, A.; Laca, A.; Díaz, M. Environmental assessment of intensive egg production: A Spanish case study. *J. Clean. Prod.* **2018**, *179*, 160–168. [[CrossRef](#)]
50. Pons, J.J.; Penades-Pla, V.; Yepes, V.; Martí, J.V. Life cycle assessment of earth-retaining walls: An environmental comparison. *J. Clean. Prod.* **2018**, *192*, 411–420. [[CrossRef](#)]
51. Huijbregts, M.A.J.; Steinmann, Z.J.N.; Elshout, P.M.E.; Stam, G.; Verones, F.; Vieira, M.; Zijp, M.; Hollander, A.; van Zelm, R. ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2017**, *22*, 138–147. [[CrossRef](#)]
52. Dong, Y.H.; Ng, S.T. Comparing the midpoint and endpoint approaches based on ReCiPe—A study of commercial buildings in Hong Kong. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2014**, *19*, 1409–1423. [[CrossRef](#)]
53. Jolliet, O.; Margni, M.; Charles, R. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2003**, *8*, 324. [[CrossRef](#)]

54. Humbert, S.; Schryver, A.D.; Margni, M.; Jolliet, O. IMPACT 2002+: User Guide. Available online: [http://www.quantis-intl.com/pdf/IMPACT2002\\_UserGuide\\_for\\_vQ2.2.pdf](http://www.quantis-intl.com/pdf/IMPACT2002_UserGuide_for_vQ2.2.pdf) (accessed on 27 July 2018).
55. Kumbhar, S.; Kulkarni, N.; Rao, A.B.; Rao, B. Environmental Life Cycle Assessment of traditional bricks in Western Maharashtra, India. *Energy Procedia* **2014**, *54*, 260–269. [[CrossRef](#)]
56. Cotes-Palomino, T.; Martínez-García, C.; Corpas Iglesias, F.A. Waste of beer brewery and sostenible ceramic. In *Proceedings of the Fourth Symposium on Urban Mining and Circular Economy*, Bergamo, Italy, 21–23 May 2018.
57. Proietti, S.; Desideri, U.; Sdringola, P.; Zepparelli, E. Carbon footprint of a reflective foil and comparison with other solutions for thermal insulation in building envelope. *Appl. Energy* **2013**, *112*, 843–855. [[CrossRef](#)]
58. Cusido, J.A.; Cremades, L.V. Environmental effects of using clay bricks produced with sewage sludge: Leachability and toxicity studies. *Waste Manag.* **2012**, *32*, 1202–1208. [[CrossRef](#)][[PubMed](#)]
59. Simion, I.M.; Ghinea, C.; Maxineasa, S.G.; Taranu, N.; Bonoli, A.; Gavrilesu, M. Ecological footprint applied in the assessment of construction and demolition waste integrated management. *Environ. Eng. Manag. J.* **2013**, *12*, 779–788.






© 2018 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 7.2.3. LCA case study to LED outdoor lighting luminaries as circular economy solution to local scale. doi. 10.3390/su12010190



Article

### LCA Case Study to LED Outdoor Luminaries as a Circular Economy Solution to Local Scale

José Adolfo Lozano-Miralles <sup>1</sup>, Manuel Jesús Hermoso-Orzáez <sup>2,\*</sup> , Alfonso Gago-Calderón <sup>3</sup>  and Paulo Brito <sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Universidad de Jaén, 23071 Jaén, Spain; jalm0017@red.ujaen.es

<sup>2</sup> Department of Graphic Engineering Design and Projects, Universidad de Jaén, 23071 Jaén, Spain

<sup>3</sup> Department of Graphic Expression, Design and Projects, Universidad of Málaga, 29016 Málaga, Spain; agago@uma.es

<sup>4</sup> LP Portalegre, Campus Politécnico, 10, 7300-555 Portalegre, Portugal; pbrito@ipportalegre.pt

\* Correspondence: mhorzaez@ujaen.es; Tel.: +34-610-389-020

Received: 30 September 2019; Accepted: 18 December 2019; Published: 25 December 2019



**Abstract:** The replacement of luminaires with discharge lamps with high luminous efficacy and long life-time LED based equipment is a reality worldwide promoted by policies that favor their gradual substitution. There is a great concern in this manufacturing industry to develop new luminaires with low environmental impact during the manufacturing and transportation processes and its end-of-life disposal (reducing greenhouse gas emissions, toxic or hazardous components, ...). Life cycle assessment (LCA) is a very extended tool used to provide information on the quality and quantity of environmental impacts in the life cycle phases of any product, system, or service. This article includes all phases of the LCA analysis of a selected streetlight LED luminaire manufactured by a SME where a landfill deposit is the end-of-life scenario. In a second phase, alternatives are sought for the reuse of the most significant elements that improve its local economy. The results are classified and sorted according to the ISO 14040 standard.

**Keywords:** life cycle assessment; LED lighting; streetlight waste; recycling; circular economy

#### 1. Introduction

Energy usage in public lighting accounts for 2.3% of the total electricity consumed in the world [1] and, according to different studies, in municipalities of developed countries, values between 40% [2] and 60% of the total municipal electricity budget can be reached [3]. A large number of public lighting installations were created 30 and 40 years ago and are therefore they can be considered obsolete [4]. Nowadays, LED technology has reached levels of energy efficiency in consolidated commercial products in the range of 70–130 lm/W [5] and the latest prototypes reach up to 200 lm/W [6] with increasingly lower costs. In addition, their lifetime expectation can be up to 5-times greater than that of discharge lamps (100,000 h LED vs. 20,000 h HPS) [7].

The construction of buildings and roads—and in particular lighting installations—are responsible for the consumption of almost half of the raw materials and energy of the planet [8]. Growing technological development causes industrial products to be discontinued and consequently replaced with greater advance [9]. Current trend of reducing greenhouse gas emissions in all fields of industry, construction, agriculture, transport, etc. Many cities replace the luminaires of public roads with others with LED technology or induction that reduce such impacts. Similar studies advise the use of indicators as efficient criteria for the selection of exterior lighting with low environmental impact [10]. For this reason, special attention should be paid to the design of new street lighting systems and to the refurbishment of existing ones, since many of them are inadequate. In light of this, it is very important

to implement street lighting designs that fulfil lighting requirements, avoiding energy waste and eco-efficiency and, at the same time, result in sustainability for municipalities [11,12]. The economic and environmental impact is expected to be linked to the safety of pedestrians and drivers achieving secure levels of luminance or illuminance and keeping glare under maximum levels allowed [13]. This causes a stock of systems that are not used, which leads to its storage without knowing their end of life. However, it is very important to determine the impacts that LED luminaires will cause on the environment in the manufacturing and transportation processes. We are currently in a context in which it needs to be known if the continuous extraction of new materials has more or less environmental impacts than the recycling and reuse of the materials recovered at the end of life of the products [14].

With such an expectation, many studies are being developed that apply the life cycle assessment (LCA) methodology to analyze the environmental impacts caused in the manufacture of equipment. A product manufactured with the criteria of a low environmental impact can cause the reduction of greenhouse gases by up to 75%, the reduction of production costs by 12% and an improvement of 2–5 times in the energy efficiency of production [15]. In addition, the LCA model is currently being applied in numerous studies, such as one from Tsinghua University that aims to calculate the life cycle fossil energy consumption and greenhouse gas emissions in China [16]. These studies show that it is necessary to evaluate the environmental impact of building materials for installations using the LCA technique. Many scientific studies that use the LCA methodology compare different materials, highlighting those with a minor impact on the environment [17,18].

Comparative studies applying LCA techniques are presented as a solution between outdoor public lighting technologies [19]. In this way, similar studies have been carried out for other products, from individual products [20] to complex systems such as buildings [21]. LED lamp technology consistently improves and product development decreases the environmental impact of the manufacture of LED luminaires [22].

The present study determines, through the LCA of its components, which are the ones that cause a greater environmental impact, in order to reduce them and propose alternatives for their manufacture. The results differ between polluting elements in the environment in the categories of toxic and non-toxic. The analysis includes all the life cycle scenarios of the luminaires, including the final disposal action for toxic and non-toxic wastes [23].

LCA studies allow companies to have a starting point for research and eco-design of new products, as well as the environmental improvement of those designed [24].

In a second phase, alternatives are sought to reuse most of the suitable components, which improve the local economy. The recycling of aluminum, plastic, steel, and other inorganic products is a solution to the problem of landfills. Replacing virgin plastic/aluminum with recycled plastic/aluminum results in greater environmental benefits [25].

This study investigates the environmental impacts of a road luminaire, as well as the impact caused by its recycling in another end-of-life scenarios alternative to landfill. For this purpose, we have analyzed a last generation product of an SME of this electronic devices manufacturing segment (this product is usually sold and distributed in Spain and Portugal). We have used the LCA methodology as a model to analyze the environmental impacts produced during its manufacturing and transportation process. This procedure can be used by similar distributors and marketers to incorporate it into the ecological label of their products.

## 2. Methodology

LCA is a general methodology useful to evaluate the impact of any design of products, process, and services on human health and the ecosystem [26,27].

According with their description in Table 1 [28–31] LCA is defined as the collection and evaluation of the inputs and outputs to determine any possible environmental impacts of the element evaluated during its life cycle. Thus, this is a tool for the analysis of the environmental burden of products in all its phases from the extraction of resources, production of components and the product itself,

distribution and use of the mentioned product, and its residue management after being discarded, whether re-purposing, recycling, or final disposal [30,31].

**Table 1.** List of ISO standards with their content description related to define the LCA analysis.

| Standard          | Description   | Edition |
|-------------------|---|---------|
| ISO 14040:2006    | Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework.  | 2006    |
| ISO 14044:2006    | Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines.   | 2006    |
| ISO/TR 14047:2012 | Environmental management. Life cycle assessment. Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations. | 2012    |

The procedure detailed to perform a LCA analysis is composed of four phases: (1) goal and scope definition, (2) life cycle inventory analysis, (3) life cycle impact assessment, and (4) interpretation of results.

According to the previous approach, the first objective of this work was to determine the impacts of street light systems using the LCA through the EPS 2000 (Environmental Priority Strategies in product design) [32] and the CML-IA baseline [33] methods. This would provide us with information concerning the quantity and importance of CO<sub>2</sub> emissions to the atmosphere of the studied system as well as other important impacts. From the analysis of the results, we can determine the environmental impacts that were found during the manufacture and operation of the equipment. The information which LCA provides us, and to determine in investment policies and reduce the impacts on the environment, and what materials have recycling potential to incorporate them into a new end-of-life cycle as components of other raw materials [24].

To perform the LCA we have chosen a model LED streetlight luminaire, assembled in Spain and commercially distributed, mainly, in the Iberian Peninsula and countries in the north shore of Africa (Morocco and Algeria). This luminaire integrates LED devices and electronic and electric elements manufactured or assembled in the USA and, mostly, in China, like most of the products of this class in the current market in the EU countries and that are being used massively to undertake substitutions in exterior lighting renovations.

### 2.1. Equipment

For the introduction of the data in the calculation software SimaPro 8.3, it is necessary to have an absolute knowledge of the product considering all its components (materials, weights, origin, manufacturing processes, consumptions, etc.) as well as their functions [1].

Functional unit: LED Luminaire. Family: ViaSolP, assembled and distributed from Málaga (Spain) by the company SOLITEC [34] Model: ViaSolP-50-N, nominal power: 50 W—correlated color temperature (CCT): 4,000 K—Surge Voltage Protector (SVP): 20 kV/10 kA—Class I). Architecture: aluminum heatsink housing, tempered glass screen, LED optical block with electronic control integrated and set of an electric driver unit and protections. The arm segment with which the luminaire is attached to the poles is not considered a part of the streetlight in this study [14,35].

We can break down this LED luminaire fixture in an architecture consisting of three basic components: a luminaire body or heatsink housing with a transparent light output window, a driver or AC/DC-CC power supply accompanied by electric protection and connection elements and light source or optical block that includes an electronic control system. This last block consists of a printed circuit board (PCB) where the LED matrix and all the integrated circuits required and placed along with polymethyl methacrylate (PMMA) lenses that generates the specific photometric diagram of the light emitted. The configuration of the LEDs matrix to generate the luminaires is carried out based on a scalable structure. This allow achieving different power setups considering a different number of emitters. The modules mounted each with a variable number of LED diodes form the light matrix of the lamp [36–38].

As presented in Figure 1, the streetlight body measures 112 (height) × 495 (length) × 227 (width) mm. Within the luminaire body a 1.6 mm thick aluminum PCB (an insulated metal substrate based aluminum clad with copper foil on the opposite side) with lines and pads to solder up to 24 LEDs (3 × 8 parallel/serial matrix configuration) is incorporated. The possible options that can be selected to configure a luminaire from two different modular blocks each mounted with a variable number of diodes formed the luminous matrix of the luminaire. Other minor components of the luminaire, such as screws, cables, and small electrical complements (wire crimp connectors and holders, etc.), have not been incorporated into the study since it is estimated that their weight in the set is not significant and/or they are not manufactured with materials that produce impacts on the environment [39]. The data used in the information gathering phase for the LCA is provided in detail by the manufacturer and verified or supported by the documentation existing in the bibliography on the product [40,41]. Table 2 shows the technical specifications of the LED luminaire chosen [28].

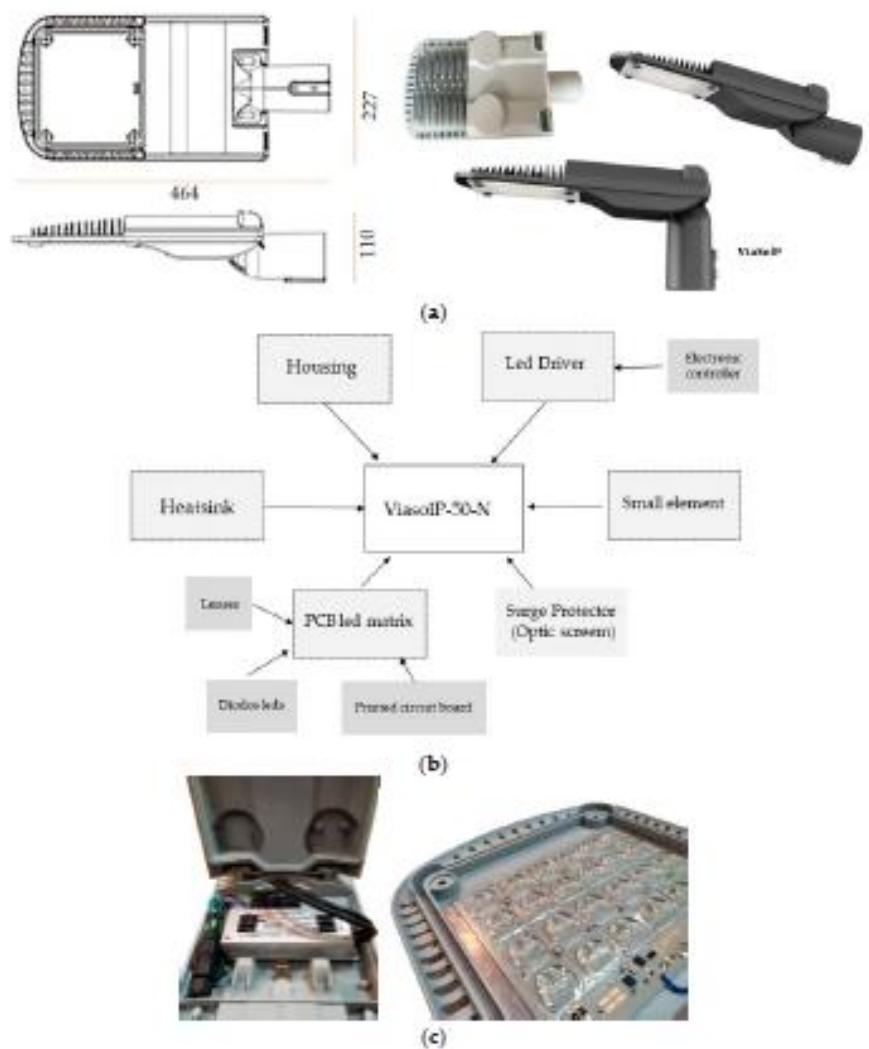


Figure 1. LED Streetlight luminaire, Family: ViaSciP. (a) General view and dimensions. (b) Outside diagram. With different parts of luminaries. (c) Image of PCB with electric elements (LED-Driver) and a LED-matrix with image of lenses (Source: SOLITEC).

**Table 2.** Detailed technical specifications of the LED luminaire evaluated (Source: SOLITEC)

| Functional Characteristics                          |   |
|---|---|
| Luminaire type                                      | Outdoors/street lighting  |
| Height × length × width                             | 112 × 495 × 227 mm  |
| Heatsink material                                   | EN AC-43100 (AISI10Mg(b)) cast aluminum                             |
| Heatsink coating                                    | Corrosive environments paint<br>Zinc-free epoxy primer (Alestal)    |
| Optic screen  | 110 × 165 × 6 mm tempered glass                                     |
| LED matrix PCB                                      | 159 × 123 × 1.6 mm Aluminum PCB<br>70 μm Cu (COBRITHERM Aismalibar) |
| LED model   | High power LED XP-G3 (CREE)   |
| Integrated electronic controller                    | Microcontroller MSP430F2001 (TI)                                    |
| Security sensor system                              | Control temperature IC TM-125 (TI)                                  |
| Communication 0–10 V protocol                       | Lineal regulator: 78L12 (STM)<br>AmpOp: LM358D (TI)                 |
| Lenses  | PMMA Strada C12362 (Ledil)  |
| Driver type   | ELG-75-24B (Meanwell)   |
| Nominal Power (AC)                                  | 50 W  |
| Lifetime expectation ( $T_{amb}$ 25 °C $T_j$ 85 °C) | 80,000 h (L80B10—IES LM80 & TM21)                                   |

Throughout the life cycle, the distances necessary for the extraction, processing and manufacturing of the materials necessary to obtain the luminaire have been calculated. This phase of LCA involves quantifying the inputs and outputs of the activities of the system evaluated. Four steps are performed in life cycle inventory (LCI): (1) develop a flow diagram of the process, product, or service evaluated, (2) develop a data collection plan, (3) collect data, and (4) evaluate and report LCI results. (Figure 2)

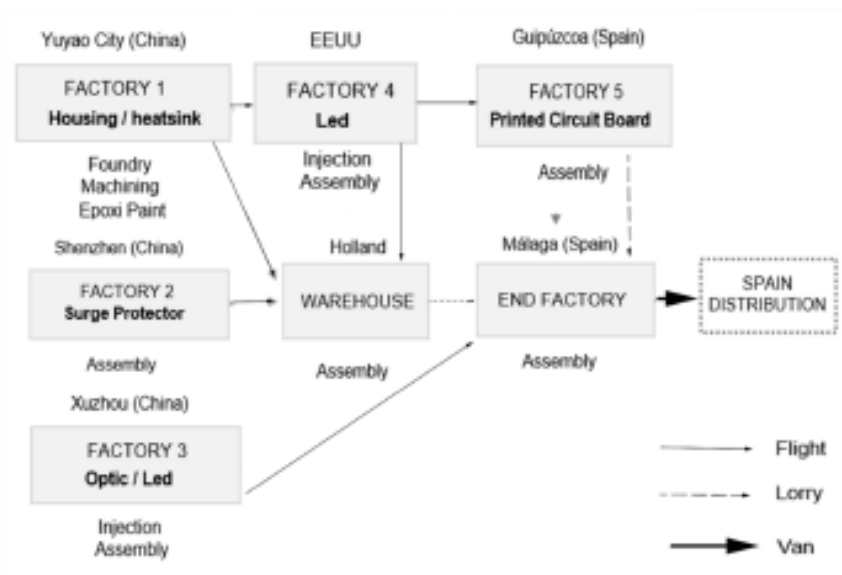
**Figure 2.** Simplified components and manufacturing transport diagram of the LED luminaire (Source: SOLITEC).

Figure 3 shows the diagram with the life cycle considering all the processes, which include in the final packaging, the distribution toward the end user, its usage and the final disposal in landfill/warehouse.

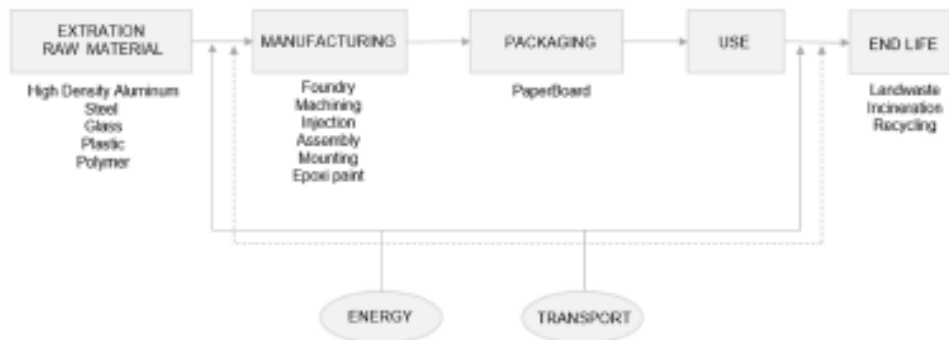


Figure 3. Simplified scheme of the life cycle diagram of the luminaire from cradle to grave (Source: self-made).

LED encapsulated include a series of metals that although in small quantities are quite valuable. The most significant are “gallium (Ga) and indium (In), rare earth elements like yttrium (Y) and cerium (Ce), and precious metals such as gold (Au) and silver (Ag)” [41]. These metals have not result significant in the LCA analysis as:

- Their quantity is very small with respect to the total system studied. “It is a considerable challenge the full recycling of LED devices. The difficulty concerns the methods used to sort and reuse these materials, especially due to the small amounts used” [42]. However, “To compensate for the gap between the growing demands and restricted supply of these metals, many countries have given significant focus on obtaining them through the E-waste” [43].
- This material are not included in the list of material considered as dangerous by the UE Directives (RoHS [44] & WEEE [45]) and Regulations [46,47], as declared by the certificates of the LED models included in the luminaire and available in the web page of the manufacturer. Thus, they do not entail considerable environmental impacts.

Toxic heavy metals (such as As, Fe, Cu, etc.) that may threaten the environment (soil and underground water pollution) or the health of humans/animals, reported in some works [48–52], are not found in the LED model used.

## 2.2. Annual Energy Consumption

The calculation of the annual energy consumption of the LED Luminaire has been done within the following limits: 11 annual medium daily working hours with a service life of 20 years (80,000 h). These values are estimated considering the lifetime expectation of the different components of the luminaire where the two limiting elements are the LEDs (estimated using the IES LM-80-2015: LM-80 test and TM-21 report) and the LED driver (estimated using the MIL-HDBK-217F Notice 2 Stress analysis test).

The functional unit of the LCA can be determined based on the quantity and quality of the light depending on a period of use of the same. This is important in the case of performing comparative LCAs between different luminaires, since it can significantly affect the results, especially if variable criteria are used for each luminaire [49]. In our case, we use the useful life to facilitate data collection in the inventory, as explained in the previous paragraph.

The inventory of entrances and exits during the extraction of the materials was adapted to the procedures defined in the ecoinvent database [45]. This was prepared under a cooperation agreement between the Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH Zurich), the Paul Scherrer Institute (PSI), the Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA), and the Swiss Federal

Agroscope Research Station (ART). It contains more than 2.5 million data sets for products and services in the energy, agriculture, transportation, construction materials, chemicals, pulp and paper, waste treatment, and agricultural sectors for different continents [34,50,51].

This tool allows us, once the data has been entered, to obtain the environmental pollution units through various impact categories. These are calculated according to the calculation method selected [52].

The distribution for the use of the luminaires has been carried out in the Iberian Peninsula (Portugal and Spain), calculating the values of km of transport through commercial vehicles. Once the luminaire's useful life has been completed, an end-of-life scenario of storage in warehouse/re-incorporation of recyclable material as raw material is contemplated. The environmental behavior of material collection and energy consumption in the re-incorporation of the material into the productive cycle (circular economy) is studied. Table 3 shows the Life Cycle Inventory (LCI) of materials, energy, transport and waste of the LED luminaire under study.

**Table 3.** LCI of materials of the LED Luminaire ViaSolP-50-N

| Raw Materials                    | Kg                     |
|----------------------------------|------------------------|
| <b>Housing/Power supply/LEDs</b> |                        |
| Aluminum, high density           | 3.98                   |
| Steel                            | 0.85                   |
| Template glass                   | 0.27                   |
| Copper                           | 0.21                   |
| Paperboard                       | 0.10                   |
| Polystyrene                      | 0.08                   |
| Total                            | 5.49                   |
| <b>Energy</b>                    |                        |
| Medium voltage electricity mix   | 4.400                  |
| <b>Transport</b>                 |                        |
|                                  | <b>tkm<sup>1</sup></b> |
| By plane                         | 3.462                  |
| By lorry (40 t)                  | 2.280                  |
| By van (<3,5 t)                  | 2.440                  |
| <b>Waste</b>                     |                        |
|                                  | <b>Kg</b>              |
| Electronic system                | 1.24                   |

<sup>1</sup> tkm: Unit of transport of 1 ton material per 1 km (Source: self-made).

To establish the environmental impact of the luminaire, three different aspects have been considered: the analysis of the inventory, the evaluation of the impact and the interpretation of the analysis.

The SimaPro v8.30 software [53–57] supported by two calculation methods it is used to conduct a sensitivity study that indicates a possible deviation from the results obtained [52]. The EPS 2000 [32] and the CML-IA baseline [54] methods are the best options to calculate the environmental impacts associated with the life phases described as both methods give us a similar level of aggregation of results [49,52]. The EPS 2000 is an evaluation system based on scientific and pragmatic knowledge for eco-design and is focused in the evaluation of the final damage, using a two-level weighting system. The first one within each protection area (resources, ecosystem and human health) and the second one on the panel type. The ultimate goal is to obtain the total environmental burden of a product or system through a single unified score. The CML-IA baseline is a LCA methodology developed by the Center of Environmental Science (CML) of Leiden University in the Netherlands. This method elaborates the problem-oriented midpoint approach and provides a list of impact assessment of obligatory impact categories that are among the most used in LCAs. The baseline indicators are recommended for simplified studies [33,55].

The selection of the analysis methods is clearly linked to our objective, because we seek to determine which components of the luminaire studied are the ones that have the greatest impact, in the

first place and which ones can be recovered for reuse as raw material. These data provide us with information to achieve eco-design development in this type of products [54,56].

The EPS 2000 method assesses four main impact categories and which correspond to: the loss of ecosystem regeneration (PDF-m<sup>2</sup>-yr) the damage caused to people's health (DALY), depletion of natural resources (MJ/Kg), and the depletion of biodiversity (PDF-m<sup>2</sup>-yr) [32]. This method represents the environmental effects of the evaluated system model using 13 midpoint indicators and has priority environmental strategies for the design of products and the latest version of the EPS method evaluates the impact on the environment through its effects in one or several human health themes (Table 4).

**Table 4.** Environmental aspects evaluated by the EPS 2000 method with their reference units

| Impact Categories             | Unit                     |
|-------------------------------|--------------------------|
| Ecosystem production capacity | * PDF-m <sup>2</sup> -yr |
| Human health                  | Person/yr                |
| Damage resources              | MJ/Kg                    |
| Biodiversity depletion        | * PDF-m <sup>2</sup> -yr |

\*PDF-m<sup>2</sup>-yr. Potentially disappeared fraction of species of m<sup>2</sup> during a year.

CML-IA baseline method assesses five main impact categories. This CML method represents the environmental effects of the evaluated system model using 11 midpoint indicators (e.g., global warming, ozone depletion, water acidification, creation of photochemical oxidant, and water eutrophication), which determinate the five endpoint indicator values [58–62]. This method offers us information on environmental impacts such as shown in Table 5.

**Table 5.** Environmental aspects evaluated by the CML-IA baseline method with their reference units

| Impact Categories                 | Unit                                    |
|-----------------------------------|---|
| Global warming/climate change     | Kg CO <sub>2</sub> equiv.               |
| Ozone depletion                   | Kg CFC-11 equiv.                        |
| Water acidification               | Kg SO <sub>2</sub> equiv.               |
| Creation of photochemical oxidant | Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> equiv. |
| Water eutrophication              | Kg PO <sub>4</sub> equiv.               |

### 3. Results

The aim of this section is to determine all the possible environmental impacts related to the parameters obtained in the previous section. The present study will be carried out in accordance with priority strategies of the EPS 2000 method, and to the following sequence of tasks: classification, characterization (indicators are selected according to each category of impact), standardization, and valuation.

The categories of impact are identified from the following issues: production capacity of the ecosystem (including information relating to agriculture, fish or meat, and the decrease in timber field), protection of human health (including human diseases), natural resources and abiotic resource in stock, with the environmental cost, resources, and biodiversity (including the extinction of species) [59,60].

The EPS 2000 method assesses. In order to perform a correct analysis of the results, the software allows simplifications and groupings of the results based on the characteristics of the impacts, grouping according to the categories of the selected method.

As it can be seen in Figure 4, the greatest impacts occur on the depletion of resources, based on the consumption of fossil fuels due to the excessive transport of the different components of luminaires. With a smaller percentage, but not negligible, we see that the impacts on human health must also be reduced and the possible alternatives analyzed. With less importance, we find the impacts to the capacity of regeneration of the ecosystem and the reduction of biodiversity.

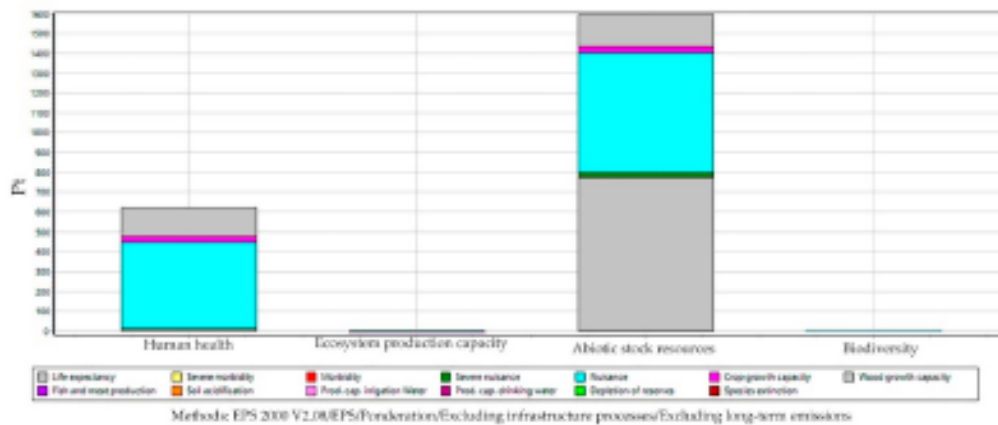


Figure 4. Weighting phase for LCA evaluation with the EPS 2000 method. Simplification to assign relative importance weights to each of the impacts founds (Pt: point of impact) (Source: self-made).

Through the single score we can determine the kPt value for the LED street lighting equipment, in factory processes where the greatest impact is found [32]. The transport by plane to the assembly plant in Spain is the one that has the greatest impact, being up to 72% greater than with respect to the rest of means. In addition, road transport is added by truck or van for last mile and end-product distribution. This fundamentally affects human health. On the other hand, the manufacture of the housing (heatsink) in the factory, generates an important impact on the reduction of abiotic resources. The rest of the impact are of little relevance. Figure 5 illustrates more in detail the information on those impact categories that are most affected. Adding the impacts produced both in the manufacturing processes and in the transport of the housing and the other hand, power supply, it results in 87% of impacts on the reduction of reserves, and 13% on the life expectancy. In this study, the packaging has a lower relative impact than other processes.

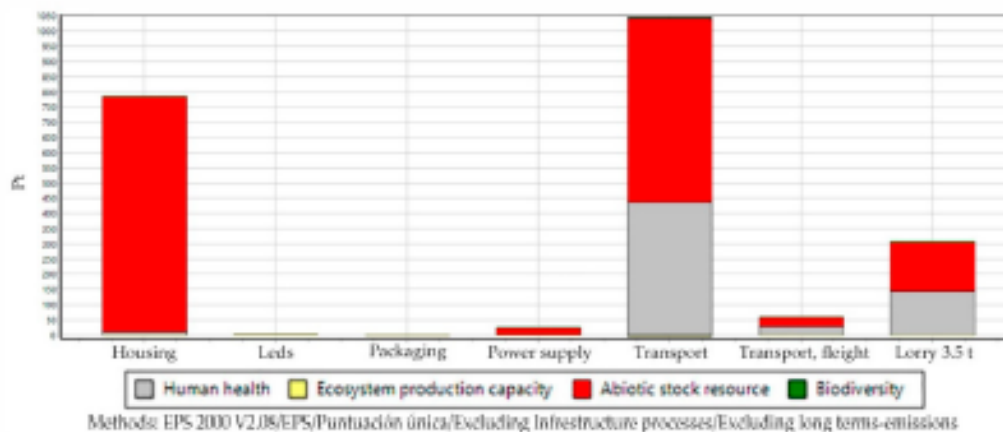


Figure 5. Single Score phase for LCA evaluation with the EPS 2000 method. Simplification to assign relative importance weights to each of the impacts founds (Pt: point of impact) (Source: self-made).

Figure 6 shows the single score obtained per category with this method. In this stage, the relative importance of each category of impact is determinate. The eco-point indicator (kPt) is used [61]. It must be considered that the absolute value of the points is quite irrelevant, as the main aim is to compare relative differences between the products or components.

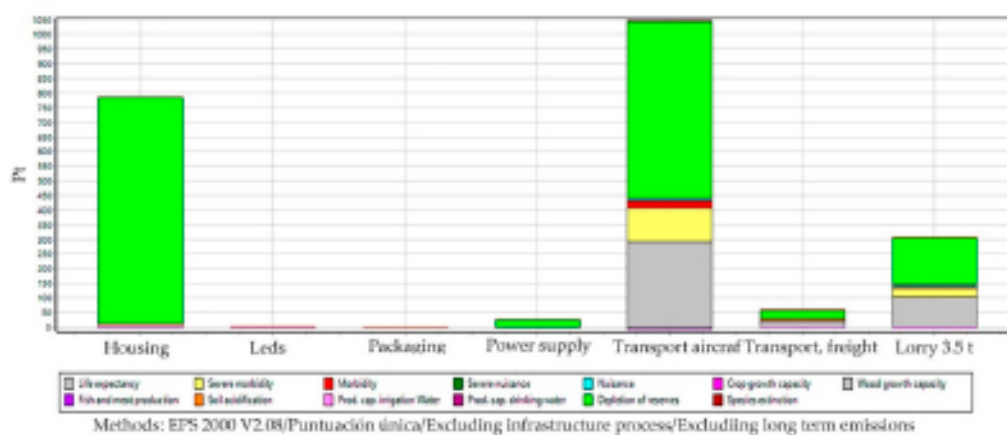


Figure 6. Single score phase classified by categories for LCA evaluation with the EPS 2000 method.

The weighed factors to the energetic consumption and the categories are shown in Table 6. The values for the single score method and the products that produce these impacts.

Table 6. Affected categories and weighed factors related to the resource consumption. LCA + EPS 2000 method (Source: self-made).

| Damaged Categories      | (kPt) Luminaire Housing | (kPt) Luminaire Driver | % of the Highest Environmental Impact  |
|-------------------------|-------------------------|------------------------|--|
| Human toxicity          | 0.437                   | 0.215                  | Emissions to air<br>CO <sub>2</sub> : 67.50%<br>Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH): 23.56% |
| Exhaustion of resources | 0.605                   | 2.280                  | Mining<br>Petroleum: 77.20%<br>Coal: 12.54%<br>Natural gas: 11.88%                             |

As common point to the results obtained, we can determine that energetic consumption in the form of electricity is the most relevant factor for the LCA analysis.

To simplify results, contributions to environmental impact indicators, the values have been sorted into four groups. The performed analysis included the different stages of life of each one of the constituents, but it must be borne in mind that the variation of conditions of their use as well as the length of operational lifetime may change the results.

With the scenario of 100% virgin raw material formulation [62], results are obtained that indicate that the greatest environmental effects were achieved in the categories corresponding to the extraction of materials (57%), the generation of inorganic material in suspension within of the atmosphere added to human health (41%), the ecosystems quality (1%), and biodiversity (1%). Such impacts occurred in the stages of extraction, transformation, and transport of materials (see Figure 7).

Breaking down the results, we can say that in the extraction of materials, the largest contribution corresponded to aluminum (75.2%), steel (12.3%), plastic (7.0%), and glass (5.5%). Volatil inorganic material, it was determined that the main components are NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> emissions.

In the other hand, the CML-IA baseline method indicates that the consumption of fossil resources are the 96.9% for the housing and a 23% for the LEDs encapsulated, and are the main impact factor, which is increased to 91.3% that we can see in the characterization of flight transport. With the consumption of mineral fuel, respiratory effects caused by inorganic substances air emissions such as SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> (human toxicity) together with climatic change due to CO<sub>2</sub> emissions (global warming).

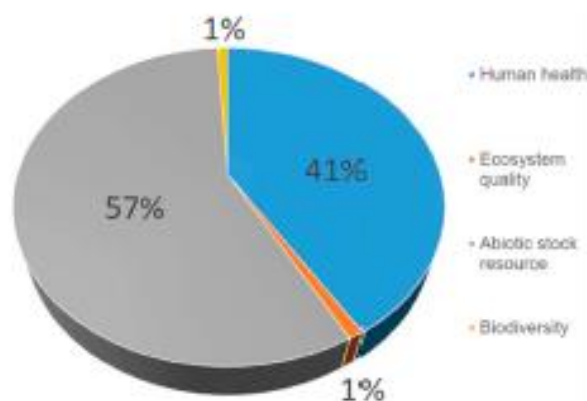


Figure 7. Relative importance of impacts according four categories. % Impacts. Method EPS 2000.

The quality of ecosystems is mainly affected by marine aquatic (38.5%), acidification and eutrophication (71.8%), and ozone layer (75.8%). Damages caused by eco-toxicity are chiefly because of heavy metals emissions in air and water, while the damages by acidification and eutrophication are principally owing to NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> emissions. The driver or power supply only affect to abiotic depletion. Figure 8 shows the values for the method, as well as the products they produce these impacts. This graph shows that human toxicity is the most important related to life expectancy.

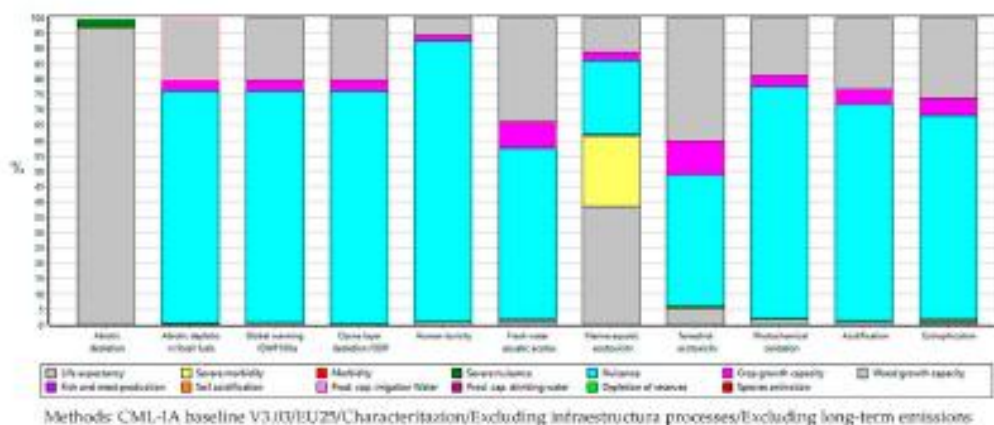


Figure 8. Characterization phase for the LCA analysis simplified to assign the relevance of each of the impacts through relative weights using the CML-IA baseline method.

Figure 9 shows the same results as Figure 8, but with uPt score values that the standard does not consider mandatory in LCA studies, but allow a better interpretation of the results.

As before, we can determine that energetic consumption in form of electricity is the most relevant factors for the LCA. Table 7 shows the most affected categories and the largest weighed factors related to energy consumption according to the CML-IA baseline method.

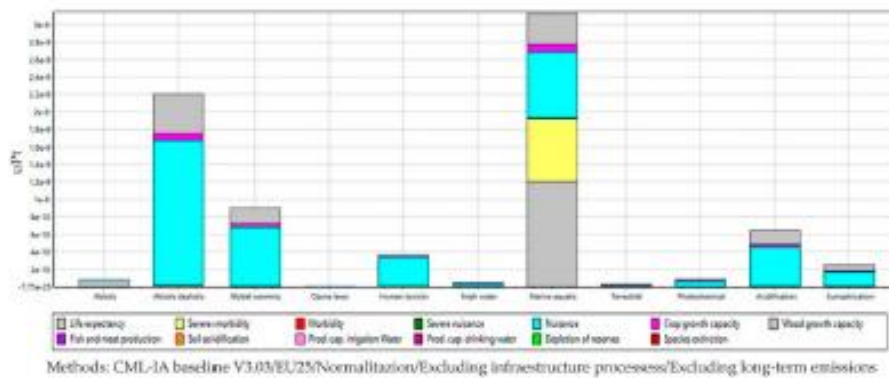


Figure 9. Normalization phase classified by categories for better understanding categories. CML-IA baseline. Eco-point indicator (uPt) is used.

Table 7. Most affected categories and weighed factors related to energy consumption. Analysis CML-IA baseline method (source: self-made).

| Damaged Categories                          | (uPt) Luminaire Housing | (uPt) Luminaire Driver  | % of the Highest Environmental Impact  |
|---|-------------------------|-------------------------|--|
| Human health (global warming)               | $6.78 \times 10^{-18}$  | $1.80 \times 10^{-18}$  | Emissions to Air<br>CO <sub>2</sub> : 85.9%<br>Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH): 25.6% |
| Exhaustion of resources (abiotic depletion) | $1.60 \times 10^{-9}$   | $64.47 \times 10^{-10}$ | Mining<br>Petroleum: 72.90%<br>Coal: 15.20%<br>Natural gas: 9.67%                            |

To simplify results, contributions to environmental impact indicators, the values have been sorted into four groups. The performed analysis included the different stages of life of each one of the constituents, but it must be borne in mind that the variation of conditions of their use as well as the length of operational lifetime may change the results.

Figure 10 shows results consistent with those obtained in Figure 7. Showing percentages corresponding to the extraction of materials with (46%), the generation of inorganic matter added to human health (36%), the quality of ecosystems similar to marine aquatic ecotoxicity (7%), and abiotic depletion (11%).

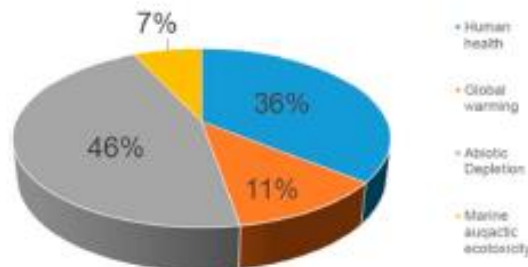


Figure 10. Relative importance of impacts according to four main categories. % Impacts. LCA + CML-IA baseline method.

Performing an analysis of the results obtained, it is observed that the greatest impacts occur in the depletion of resources. These results coincide in the methods used, so as an analysis of these results it leads us to justify the need to reduce the extraction of raw materials.

#### 4. Discussions

The results obtained are consistent with respect to those presented in similar works applied to similar products and counting only direct contributions [60]. Analyzing the results obtained, we can summarize the discussion in the following fundamental points.

The national or even the local production of some elements and/or systems is scarce, reducing in some cases to the mere assembly of elements. It is necessary to incorporate eco-design both to reduce the amount of material used and to achieve a greater location of the components that avoid the important impacts of transport. Eco-design is an environmental benefit that has an economic benefit since most of the improvements refer to the decrease in material [10,57,63]. It is important to consider that the results of the analyzes may be affected by the place where the study is carried out, which mainly affects the impacts caused by the greater or lesser transport of the components in the manufacturing phase. The LCA studies considering would provide designers with important data for their decision-making in different manufacturing scenarios.

The components of the luminaires have different manufacturing areas, some far away, which causes a considerable increase in the impacts of transport to the final assembly site. The end of life of components such as the housing does not present alternatives to landfill or incineration, due to the material with which it is manufactured.

It is necessary the environmental analysis of the alternative of recycling and incorporation to other materials, as an alternative of reuse of the plastic or aluminum on the housing heatsink [62].

When not finding LCA studies on similar luminaires, it is necessary to carry out other comparative LCA studies, with LED luminaires of the latest technology, and under local production that provides us with environmental information on these products and that can be used for decision making along with other aspects such as economic, technical, maintenance, etc. [64].

Depending on the limits that we have established in the present study, the LEDs include in their manufacturing processes a series of metals that although in small quantities are quite valuable. The most significant are the Ga, In and the rare earths. A point to consider within the circular economy would be the recovery of these metals, through green and clean technologies, based on end-of-life techniques of the LEDs components, as well as recent studies support [41,43,48].

#### 5. Conclusions

It is important to consider the end of life of all the components of the LED luminaires due to the increasing scarcity of resources and the exclusively environmental consequences that the processing entails. Based on the data obtained from LCAs, a path is opened to determine which recycling and reuse processes are the most suitable depending on the individual variables of each system studied. In the same way, the manufacturing companies must incorporate self-recycling environmental policies that provide direct raw materials and complement their manufacturing processes, thus reducing environmental impacts considerably.

In future studies, new technologies should be considered that allow us to analyze recycling scenarios in which the components of LED luminaires are included as the basis for a local circular economy. This provides a significant reduction in the overall impacts of the product, in terms of the uPt indicator. In the design phase of the luminaires, where the materials, the composition of the recycled material, and other relevant considerations are selected, these aspects affect the processes to be used, the quality of the product and its relationship with the environment. The most important point is to reduce the cost transport of the components and for this reason it is necessary to conduct LCA studies with different scenarios in which the differences in the results are collected by varying the countries of extraction of raw materials, processing, and use of the luminaires, all affected by the mix of electrical energy of each country in each case. LCA methods with two methodologies has been used in the present work to determine the LED luminaires impacts like study case. The most localized manufacturing would bring economic and social improvement to local scale. The lower potentials of the LEDs are mainly due to the longer useful lifespan. An LCA study, however, has shown that,

relative to incandescent bulbs, LEDs represent approximately an 80% reduction in primary energy demand and in global warming, human toxicity, and resource depletion potentials during the use and manufacturing stages [65,66].

On the other hand, research into new materials manufacturing technologies, less polluting, would favor this location, reducing transport cost, and let changing oriented to local manufactured production with recycled materials (circular economy). LCA of the luminaires, let evaluate the use of by-products or waste and their recycled incorporation into the industrial life cycle [61,67]. Consequently, the products with the lowest impact will allow a reduction in CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions, as well as a reduction in the consumption of energy and resources.

In this way, the use of low-cost recycled materials with a low environmental impact, which are also close to the production centers, and their return to manufacturing processes through recovery, would be encouraged by the public administrations, allowing the promotion of circular economic strategies.

The waste generated by the replacement of the luminaires with others that incorporate new technologies, are very abundant and represent up to 72% of the total volume. These elements must be reincorporated into the manufacturing life cycle of the same luminaires or other life cycles that may be complementary due to their characteristics and affinities. The use of recyclable or bioplastic plastics can be a solution that allows its recovery as waste and its subsequent use for the manufacture of biogas or in the manufacture of construction materials for sustainable buildings. In this regard, it is noteworthy that tests are already being carried out regarding the use of electrical plastic waste to produce syngas or gasification gas [68,69] or as a material for sustainable construction [18].

On the other hand, aluminum is a highly appreciated metal that could be used as a material for the manufacture of anodes or cathodes in hydrolysis processes to obtain hydrogen, as a possible future use. It is possible to reuse the metal base, which is of great value mainly as aluminum for industrial reuse, as an electrical conductor, or as electrodes in the hydrolysis processes for the production of H<sub>2</sub> [70].

**Author Contributions:** The author contribution is summarized: Conceptualization: M.J.H.-O. and J.A.L.-M.; Methodology: M.J.H.-O. and J.A.L.-M.; Software: J.A.L.-M.; Validation: A.G.-C. and M.J.H.-O.; Formal analysis: A.G.-C. and M.J.H.-O.; Investigation: M.J.H.-O. and J.A.L.-M.; Resources: M.J.H.-O. and P.B.; Data curation: M.J.H.-O.; Writing: M.J.H.-O.; Writing—Review and editing: A.G.-C.; Supervision and funding acquisition, P.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research did not receive external financing directly; However, in this work, Hermoso-Ortiz Manuel Jesús has participated as a principal investigator in the research carried out at the Center Polytechnic Institute of Portalegre (Portugal), participating as a Scholarship Scholar with the “José Castillejo” Grant of the Ministry of Education and Science of the Government of Spain, within the international project-project of cross-border cooperation ECO2CIR for the introduction of ecology and circular economy through the prevention of improved recycling, waste management and recovery in the central, Extremadura and Alentejo regions. (Interreg Spain-Portugal) supervised by Brito Paulo, with the aim of looking for Models that serve as a reference for massive LED replacements that are expected to be carried out in the short and medium term, for additional waste treatment and recovery in the regions of Alentejo (Portugal) and Extremadura (Spain).

**Acknowledgments:** We thank to the manufacturer of the luminaire SOLITEC for providing us with all the information necessary to perform the LCA analysis developed.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Lobão, J.A.; Devezas, T.; Catalão, J.P.S. Energy efficiency of lighting installations: Software application and experimental validation. *Energy Rep.* **2015**, *1*, 110–115. [CrossRef]
2. Ozadowicz, A.; Grela, J. The street lighting integrated system case study, control scenarios, energy efficiency. In Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2014, Barcelona, Spain, 16–19 September 2014.
3. Fiaschi, D.; Bandinelli, R.; Conti, S. A case study for energy issues of public buildings and utilities in a small municipality: Investigation of possible improvements and integration with renewables. *Appl. Energy* **2012**, *97*, 101–114. [CrossRef]

4. Traverso, M.; Donatello, S.; Moons, H.; Quintero, R.; Gama Caldas, M.; Wolf, O. Revision of the EU green public procurement criteria for street lighting and traffic signals—Preliminary report. *EJRR* **2018**, *9*, 316–328.
5. Djuretic, A.; Kostic, M. Actual energy savings when replacing high-pressure sodium with LED luminaires in street lighting. *Energy* **2018**, *157*, 367–378. [[CrossRef](#)]
6. Miller, N.J.; Beeson, T.; McIntosh, J.; Safranek, S. *Top Efficiency Performers: An Investigation into High-Achieving Led Luminaires*; Pacific Northwest National Laboratory: Richland, WA, USA, 2018.
7. Shahzad, K.; Čuček, L.; Sagir, M.; Ali, N.; Rashid, M.I.; Nazir, R.; Nizami, A.S.; Al-Turaiif, H.A.; Ismail, L.M.I. An ecological feasibility study for developing sustainable street lighting system. *J. Clean. Prod.* **2018**, *175*, 683–695. [[CrossRef](#)]
8. Edwards, B. *Rough Guide to Sustainability: A Design Primer*, 4th ed.; RIBA Publishing: London, UK, 2014; ISBN 9781859465073.
9. Hermoso-Orzáez, M.J.; Rojas-Sola, J.L.; Gago-Calderón, A. Electrical consequences of large-scale replacement of metal halide by LED luminaires. *Light. Res. Technol.* **2018**, *50*, 282–293. [[CrossRef](#)]
10. Lecese, E.; Salvadori, G.; Rocca, M. Critical analysis of the energy performance indicators for road lighting systems in historical towns of central Italy. *Energy* **2017**, *138*, 616–628. [[CrossRef](#)]
11. Beccali, M.; Bonomolo, M.; Lecese, E.; Lista, D.; Salvadori, G. On the impact of safety requirements, energy prices and investment costs in street lighting refurbishment design. *Energy* **2018**, *165*, 739–759. [[CrossRef](#)]
12. Hermoso-Orzáez, M.J.; Lozano-Miralles, J.A.; Lopez-Garcia, R.; Brito, P. Environmental Criteria for Assessing the Competitiveness of Public Tenders with the Replacement of Large-Scale LEDs in the Outdoor Lighting of Cities as a Key Element for Sustainable Development: Case Study Applied with PROMETHEE Methodology. *Sustainability* **2019**, *11*, 5982. [[CrossRef](#)]
13. Peña-García, A.; Hurtado, A.; Aguilar-Luzón, M.C. Impact of public lighting on pedestrians' perception of safety and well-being. *Saf. Sci.* **2015**, *78*, 142–148. [[CrossRef](#)]
14. Douglas, H.; Jurgens, C.; Zatzoff, E. *Life Cycle Assessment of Streetlight Technologies*; University of Pittsburgh, Mascaro Center for Sustainable Innovation: Pittsburgh, PA, USA, 2009.
15. Moon, D.; Sagisaka, M.; Tahara, K.; Tsukahara, K. Progress towards sustainable production: Environmental, economic, and social assessments of the cellulose nanofiber production process. *Sustainability* **2017**, *9*, 2368. [[CrossRef](#)]
16. Peng, T.; Zhou, S.; Yuan, Z.; Ou, X. Life cycle greenhouse gas analysis of multiple vehicle fuel pathways in China. *Sustainability* **2017**, *9*, 2183. [[CrossRef](#)]
17. Monteiro, H.; Freire, F. Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods. *Energy Build.* **2012**, *47*, 572–583. [[CrossRef](#)]
18. Pargana, N.; Pinheiro, M.D.; Silvestre, J.D.; De Brito, J. Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings. *Energy Build.* **2014**, *82*, 466–481. [[CrossRef](#)]
19. Tähkämö, L.; Räsänen, R.S.; Halonen, L. Life cycle cost comparison of high-pressure sodium and light-emitting diode luminaires in street lighting. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2016**, *21*, 137–145. [[CrossRef](#)]
20. Bonamente, E.; Scrucca, F.; Rinaldi, S.; Merico, M.C.; Asdrubali, E.; Lamastra, L. Environmental impact of an Italian wine bottle: Carbon and water footprint assessment. *Sci. Total Environ.* **2016**, *560–561*, 274–283. [[CrossRef](#)]
21. Fantozzi, F.; Gargari, C.; Rovai, M.; Salvadori, G. Energy upgrading of residential building stock: Use of life cycle cost analysis to assess interventions on social housing in Italy. *Sustainability* **2019**, *11*, 1452. [[CrossRef](#)]
22. Richter, J.L.; Tähkämö, L.; Dalhammar, C. Trade-offs with longer lifetimes? The case of LED lamps considering product development and energy contexts. *J. Clean. Prod.* **2019**, *226*, 195–209. [[CrossRef](#)]
23. Butera, S.; Christensen, T.H.; Astrup, T.F. Life cycle assessment of construction and demolition waste management. *Waste Manag.* **2015**, *44*, 196–205. [[CrossRef](#)]
24. Lozano-Miralles, J.A.; Hermoso-Orzáez, M.J.; Martínez-García, C.; Rojas-Sola, J.L. Comparative study on the environmental impact of traditional clay bricks mixed with organic waste using life cycle analysis. *Sustainability* **2018**, *10*, 2917. [[CrossRef](#)]
25. Bogner, J.; Pipatti, R.; Hashimoto, S.; Diaz, C.; Mareckova, K.; Diaz, L.; Kjeldsen, P.; Monni, S.; Faaij, A. Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: Conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. Working Group III (Mitigation). *Waste Manag. Res.* **2008**, *26*, 11–32. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

26. Rebitzer, G.; Ekvall, T.; Frischknecht, R.; Hunkeler, D.; Norris, G.; Rydberg, T.; Suh, S.; Weidema, B.P.; Pennington, D. Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environ. Int.* **2004**, *30*, 701–720. [CrossRef] [PubMed]
27. Curran, M.A. Learn more about Life Cycle Assessment Life Cycle. *Encycl. Ecol.* **2008**, *4*, 2168–2174. [CrossRef]
28. ISO 14040:2006. *ISO 14040:2006 Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework*; BSI: London, UK, 2006.
29. ISO. *ISO/TR 14047:2012 Environmental Management—Life Cycle Assessment—Illustrative Examples on How to Apply ISO 14044 to Impact Assessment Situations*; ISO: Geneva, Switzerland, 2012; p. 85.
30. Navajas, A.; Uriarte, L.; Gandia, L.M. Application of eco-design and life cycle assessment standards for environmental impact reduction of an industrial product. *Sustainability* **2017**, *9*, 1724. [CrossRef]
31. European Commission on Resource Efficient Opportunities in the Building Sector. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions COM(2014)*; EU: Brussels, Belgium, 2014; pp. 1–10.
32. Steen, B.; Arvidsson, P.; Nobel Gunnar Borg, A.; Louis, S.; Thomas Rydberg, V.; Göran Swan, V.; Enso David Weiner, S. *A Systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development (EPS). Version 2000—General System Characteristics*; Chalmers Tekniska Högsk: Gothenburg, Sweden, 1999; p. 67.
33. CML—Department of Industrial Ecology CML-IA Characterisation Factors. Available online: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors> (accessed on 5 September 2016).
34. Solitec-Viasolp. Technical Catalog on Led Lighting. *Outdoor Street Lights*. Available online: <http://www.solitecled.com> (accessed on 10 January 2018).
35. Azevedo, I.L.; Morgan, M.G.; Morgan, F. The Transition to Solid-State Lighting. *Proc. IEEE* **2009**, *97*, 481–510. [CrossRef]
36. CIE Spanish Lighting Committee. *Required Technical Requirements for Luminaires with Led Outdoor Lighting Technology*; CIE: Madrid, Spain, 2015.
37. CIE Spanish Lighting Committee Mixed Supply and Services Contract for the Provision of the Integral Outdoor Lighting Service of the Municipality of (AYTO) Specification sheet IDAE Contract Models. Available online: <https://www.cieisp.com/el-cie/biblioteca/documentacion-eses/> (accessed on 5 December 2016).
38. Zhang, H.; Burr, J.; Zhao, F. A comparative life cycle assessment (LCA) of lighting technologies for greenhouse crop production. *J. Clean. Prod.* **2017**, *140*, 705–713. [CrossRef]
39. Minguez, R.; Zamora, S.; Barrereboa, L.; Solaberrieta, E.; Etxaniz, O.; Muniozgueren, J.; Izcaro, J.; Larrieta, J.; Lopez, J. Life Cycle Assessment in Switchgears for Primary Electrical Distribution. *DYNA* **2013**, *88*, 543–550. [CrossRef]
40. Jägerbrand, A.K. New framework of sustainable indicators for outdoor LED (light emitting diodes) lighting and SSL (solid state lighting). *Sustainability* **2015**, *7*, 1028–1063. [CrossRef]
41. Swain, B.; Mishra, C.; Kang, L.; Park, K.S.; Lee, C.G.; Hong, H.S. Recycling process for recovery of gallium from GaN an e-waste of LED industry through ball milling, annealing and leaching. *Environ. Res.* **2015**, *138*, 401–408. [CrossRef]
42. Ari, Vidyadhar A Review of Technology of Metal Recovery from Electronic Waste. In *Intech*; Intechopen, Ed.; Ari: London, UK, 2019; Volume 1, p. 13.
43. Fang, S.; Yan, W.; Cao, H.; Song, Q.; Zhang, Y.; Sun, Z. Evaluation on end-of-life LEDs by understanding the criticality and recyclability for metals recycling. *J. Clean. Prod.* **2018**, *182*, 624–633. [CrossRef]
44. Europe Union (EU). *Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on Restrictions on the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment*; EU: Brussels, Belgium, 2011; Volume 174, p. 88.
45. Europe Union (EU). *Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)*; EU: Brussels, Belgium, 2002; p. 15.
46. The Association of Cities and Regions for Recycling (ACRR). *The Management of Waste Electrical and Electronic Equipment*; ACRR: Brussels, Belgium. Available online: <http://www.reuse.org/wp-content/uploads/00028-Brochure-ACRR-Part-1.pdf> (accessed on 23 December 2019).
47. Gramatyka, P.; Nowosielski, R.; Sakiewicz, P. Recycling of waste electrical and electronic equipment. *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.* **2007**, *20*, 535–538.

48. Kumar, A.; Kuppasamy, V.K.; Holuszko, M.; Song, S.; Loschiavo, A. LED lamps waste in Canada: Generation and characterization. *Resour. Conserv. Recycl.* **2019**, *146*, 329–336. [CrossRef]
49. Casamayor, J.L.; Su, D.; Ren, Z. Comparative life cycle assessment of LED lighting products. *Light. Res. Technol.* **2018**, *50*, 801–826. [CrossRef]
50. Harvey, M.; Pilgrim, S. The new competition for land: Food, energy, and climate change. *Food Policy* **2011**, *36*, S40–S51. [CrossRef]
51. Pieragostini, C.; Mussati, M.C.; Aguirre, P. On process optimization considering LCA methodology. *J. Environ. Manag.* **2012**, *96*, 43–54. [CrossRef]
52. Mark, G.; Michiel, O.; Jorrit, L.; Tommie Ponsioen, E.M. *Introduction to LCA with SimaPro*, 7th ed.; PRé: Amersfoort, The Netherlands, 2010.
53. Frischknecht, R. The Ecoinvent database: Overview and methodological framework. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2005**, *10*, 3–9. [CrossRef]
54. Jungbluth, N. *Description of Life Cycle Impact Assessment Methods*; Schaffhausen, Ed.; ESU-Services GmbH: Uster, Switzerland, 2019; p. 649.
55. Ferrara, C.; De Feo, G. Life cycle assessment application to the wine sector: A critical review. *Sustainability* **2018**, *10*, 395. [CrossRef]
56. Konstantzos, G.E.; Xevgenos, D.; Loizidou, M. Life cycle assessment of the SOL-BRINE evaporator unit. In Proceedings of the Win4Life International Conference, Tinos Island, Greece, 19–21 September 2013; National Technical University of Athens: Athens, Greece, 2013; pp. 1–2.
57. Acero, A.P.; Rodriguez, C.; Ciroth, A. *LCA Methods Impact Assessment Methods in LIFE Cycle Assessment and Their Impact Categories*; GreenDelta GmbH: Berlin, Germany, 2014; pp. 1–23.
58. Ruiz-Amador, D.; Zúñiga-Lopez, I. *Life Cycle and Carbon Footprint Analysis*, 1st ed.; Código Uned: 0105004ct01a01; UNED: Madrid, Spain, 2012; ISBN 978-84-362-6563-7.
59. Rode, I.; Moriarty, M.; Beattie, C.; McIntosh, J.; Hargroves, K. Technologies and Processes to Reduce Carbon Intensity of “Main Road Projects”, a research report and annotated bibliography for the Sustainable Built Environment National Research Centre (SBE-nrc) by the Curtin University Sustainability Policy Institute. In *A Sustainable Built Environment National Research Centre (SBE-nrc) Research Report and Annotated Bibliography by Curtin University Sustainability Policy Institute*; Sustainable Built Environment, National Research Centre: Perth, Australia, 2014.
60. Laso, J.; Garcia-Herrero, I.; Margallo, M.; Vázquez-Rowe, I.; Fullana, P.; Bala, A.; Gazulla, C.; Irabien, Á.; Aldaco, R. Finding an economic and environmental balance in value chains based on circular economy thinking: An eco-efficiency methodology applied to the fish canning industry. *Resour. Conserv. Recycl.* **2018**, *133*, 428–437. [CrossRef]
61. Dong, L.; Wang, Y.; Li, H.X.; Jiang, B.; Al-Hussein, M. Carbon reduction measures-based LCA of prefabricated temporary housing with renewable energy systems. *Sustainability* **2018**, *10*, 718. [CrossRef]
62. *Royal Decree 1890/2008, of November 14, Which Approves the Regulation of Energy Efficiency in Outdoor Lighting Installations and Its Complementary Technical Instructions EA-01 to EA-07*; Spanish Government: Madrid, Spain, 2008; p. 70.
63. Fraile-García, E.; Ferreira-Cabello, J.; López-Ochoa, L.M.; López-González, L.M. Study of the technical feasibility of increasing the amount of recycled concrete waste used in ready-mix concrete production. *Materials* **2017**, *10*, 817. [CrossRef]
64. Lim, S.R.; Kang, D.; Ogunseitan, O.A.; Schoenung, J.M. Potential environmental impacts from the metals in incandescent, compact fluorescent lamp (CFL), and light-emitting diode (LED) bulbs. *Environ. Sci. Technol.* **2013**, *47*, 1040–1047. [CrossRef] [PubMed]
65. OSRAM. *Opto Semiconductors Life Cycle Assessment of Illuminants: A Comparison of Light Bulbs, Compact Fluorescent Lamps and LED Lamps*; OSRAM: Regensburg, Germany, 2009; pp. 1–26.
66. Pons, J.J.; Penadés-Pla, V.; Yepes, V.; Martí, J.V. Life cycle assessment of earth-retaining walls: An environmental comparison. *J. Clean. Prod.* **2018**, *192*, 411–420. [CrossRef]
67. Panizio, R.M.; Brito, P.; Calado, L.F.C.; Alves, O. Effect of the incorporation of biomass in the carbonization of waste electrical and electronic equipment. In Proceedings of the Bioenergy International Conference, Portalegre, Portugal, 11–13 September 2019; p. 23.

68. Luz, E.C.; Rocha, M.H.; Lora, E.E.S.; Venturini, O.J.; Andrade, R.V.; Leme, M.M.V.; Del Olmo, O.A. Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil. *Energy Convers. Manag.* **2015**, *103*, 321–337. [[CrossRef](#)]
69. Prasertcharoensuk, P.; Hernandez, D.A.; Bull, S.J.; Phan, A.N. Optimisation of a throat downdraft gasifier for hydrogen production. *Biomass Bioenergy* **2018**, *116*, 216–226. [[CrossRef](#)]
70. Lin, J.Y.; Raharjo, A.; Hsu, L.H.; Shih, Y.J.; Huang, Y.H. Electrocoagulation of tetrafluoroborate ( $\text{BF}_4^-$ ) and the derived boron and fluorine using aluminum electrodes. *Water Res.* **2019**, *155*, 362–371. [[CrossRef](#)]



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 7.2.4. Environmental criteria for a assessing the competitiveness of public tenders with the replacement of large-scale LEDs in the outdoor lighting of cities as a key element for sustainable development: case study applied with Promethee methology. doi. 10.3390/su11215982



Article

### Environmental Criteria for Assessing the Competitiveness of Public Tenders with the Replacement of Large-Scale LEDs in the Outdoor Lighting of Cities as a Key Element for Sustainable Development: Case Study Applied with PROMETHEE Methodology

Manuel Jesús Hermoso-Orzáez <sup>1,\*</sup>, José Adolfo Lozano-Miralles <sup>1</sup>, Rafael Lopez-García <sup>2</sup> and Paulo Brito <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Graphic Engineering, Design and Projects, Universidad de Jaén, 23071 Jaén, Spain; jalm0017@red.ujaen.es

<sup>2</sup> Department of Mechanical and Mining Engineering, Universidad de Jaén, 23071 Jaén, Spain; rgarcia@ujaen.es

<sup>3</sup> Instituto Politécnico, LPP Portalegre, 7300-110 Portalegre, Portugal; pbrito@iipportalegre.pt

\* Correspondence: mhorzaez@ujaen.es; Tel: +34-610-389-020

Received: 13 October 2019; Accepted: 25 October 2019; Published: 28 October 2019



**Abstract:** The technological change to LEDs is an unstoppable reality which, little by little, is becoming increasingly important in terms of the lighting inside and outside our homes. The exterior lighting of our cities is moving decisively and clearly towards the incorporation of this technology in urban spaces. The energy efficiency, light quality, and economic benefits of LED technology are an unquestionable reality. This is causing public administration projects involving large-scale switches to LEDs to be promoted and financed; however, it is beginning to be observed that the commitment to the policies decided by this technology should take into account some environmental aspects which have not been studied to date. The environmental impact of the substitutions is caused by the need to valorize the replaced luminaires. Until now, most have been stored without the possibility of use, reuse, or recovery. The environmental impact produced in the manufacture of LED luminaires that replace the old sodium vapor (VSAP) or metal halide (MH) discharge lamps must also be considered. In addition, in the administrative clauses specifications that govern the public tenders, it is observed that the fundamental environmental aspects both of recycling the old lamps, and of the life cycle analysis (LCA) of the luminaires that are replacing them, have not been contemplated or valued with sufficient weight. In addition, there are very few public substitution contests in which environmental criteria are rewarded or valued in an important way. This work intends to summarize a methodological proposal using the techniques of multiple decision-making criteria for the selection of bidding companies for public outdoor lighting competitions. We propose the use of the PROMETHEE method multi-criteria analysis for the application of the most commonly used criteria for the luminaire LED selection process, including an environmental impact assessment with LCA techniques, and propose this as a case or model guide in the public contests of cities. A model of the bidding conditions that addresses and assesses the environmental aspects which are absolutely key to sustainable development is supported by the ecological criteria of the circular economy.

**Keywords:** Life cycle assessment LCA; LED luminaires; lighting public tender; streetlight waste; recycling waste; environmental criteria; decision tool; PROMETHEE; lighting pollution; circular economy

## 1. Introduction

Today, artificial lighting demands 20% of total global electricity production [1]. Its impact represents 1.9 billion tons of CO<sub>2</sub> emissions per year, which represents 70% of vehicle emissions worldwide [2]. Energy consumption in public lighting accounts for 2.3% of the world's electricity consumption [3] and, according to different studies, in the municipalities of developed countries, values of between 40% [4] and 60% of municipal electricity consumption can be reached [5]. A large number of public lighting installations were created between 30 and 40 years ago and are therefore obsolete [6]. Today, LED and/or OLED technology has reached high levels of efficiency (more than 276 lm/W) and increasingly low costs. In addition, its useful life is several times greater than that of discharge lamps [3]. Street lighting is an important part of transport infrastructure and public utilities. In Europe (EU28), there are more than 1.6 million km of illuminated streets that consume annually approximately 35 TWh with a cost of €4 billion for public authorities [6].

In the European Union (hereafter the EU), energy savings and efficiency policies aimed at urban lighting are being promoted [7]. Lighting installations in Spain total 8,849,839 points of light, which, with an average power of 156 W, represents an electricity consumption of 5296 GWh/year for the whole of Spain [8]. The new energy-saving policies promoted by the EU recommend the replacement of discharge lamps—sodium vapor (VSAP) or metal halide (MH)—with LED luminaires. Replacing the discharge lamps with LEDs with similar lighting performance allows a reduction of electricity consumption between 20% and 50%. [9–12]. Currently, there are a large number of reasons to upgrade street lighting—one reason is that LEDs are the most efficient light source, even more than high-pressure sodium (HPS) lamps [13,14]. LED luminaires and the associated equipment are considered to be technologically mature—a fact that considerably reduces their cost [15,16].

Numerous studies have analyzed the energy efficiency of these new luminaires by comparing them with fluorescent lamps [17] and MH lamps [18,19]. The reduction of LED prices, together with the high capacity of control, regulation, and remote management, allow us to obtain periods of the amortization of investments with terms of less than three years [20,21]. Studies conducted in the city of Detroit have allowed for the calculation of “simple payback” return periods with amortizations in less than 2.5 years [22]. In this global scenario, different companies and studies have generated reports that ensure that it is expected that, in developed countries, more than \$53.7 million can be invested in LED street lighting during the period 2015–2025 [23].

However, the replacement of LED discharge lamps is encountering problems that were not common in lighting installations. Different studies have focused on comparatively evaluating both technologies, focusing on measuring the indexes of annoying glare, uniformity, possible contamination of the power grid, harmonic contamination, and trying to measure the dreaded cold peak currents in the ignition starts [24], as well as anomaly factors such as power factor (PF) and current total harmonic distortion (THD) [25]. At the time of the initial cold start of the installation, the “input peak currents” [26], and consequently the over-excitation of the diodes used by the LED sources (due to the voltage required during the start-up period), can cause overcurrent problems and unwanted disconnections [21,27–29].

The construction of buildings and roads—and in particular lighting installations—are responsible for the consumption of almost half of the raw materials and energy of the planet [30]. Consequently, the manufacture of products for construction in general and facilities in particular, such as outdoor lighting, has a great impact on the depletion of finite resources, in addition to the production of greenhouse gas emissions from the combustion of fossil fuels that are involved in equipment manufacturing processes. To reduce the associated greenhouse gas emissions and the resulting impact on the climate, it is necessary to use construction materials which are environmentally sustainable [31,32].

Current environmental sustainability policies and associated concepts of bioclimatic architecture, as well as social concern for general environmental aspects (global warming, greater damage to the ozone layer and the accumulation of waste), have made the construction industry increasingly sensitive

to the consideration of environmentally sustainable products and equipment. Materials that reduce energy consumption require the creation of innovative products that are sustainable. In fact, in Europe, the construction sector is responsible for 40–45% of primary energy consumption, which comprises a significant proportion of greenhouse gas emissions [33]. The use of sustainable materials in lighting equipment would help reduce these gas emissions.

With such an expectation, many studies are being developed that apply the LCA (Life Cycle Assessment) methodology to analyze the environmental impacts caused in the manufacture of equipment. A product manufactured with the criteria of a low environmental impact can cause the reduction of greenhouse gases by up to 75%, the reduction of production costs by 12% and an improvement of 2–5 times in the energy efficiency of production. In addition, the LCA model is currently being applied in numerous studies, such as one from Tsinghua University that aims to calculate the life cycle fossil energy consumption and greenhouse gas emissions in China. These studies show that it is necessary to evaluate the environmental impact of building materials for installations using the LCA technique. Many scientific studies that use the LCA methodology compare different materials, highlighting those with a minor impact on the environment [34,35].

On the other hand, environmental criteria are considered a key factor when selecting the most suitable LED equipment and luminaires to deal with mass substitutions. The life cycle analysis of the LED luminaire is becoming a priority aspect when selecting an LED luminaire to be replaced. Environmental analysis is becoming more frequent in terms of the different levels of impact that substitutions can cause in the medium and long term. It is for this reason that we intend to present a model of the technical specification in this work that allows us to incorporate, as criteria of assessment, the environmental impact criteria at the time of the massive replacement of discharge lamps with LED luminaires. A new technical report that is being prepared for green public procurement criteria presents the selection criteria that take into account the negative effects of environmental impacts [36,37].

LED lamps are still experiencing improvements in terms of their efficiency and design of materials, which raises questions about whether a longer life is desirable from a general environmental perspective. Applying a comprehensive evaluation of the LCA life cycle, actual product cases have been studied from 2012 to 2017—the research is based on previous studies of product life and lighting product research in order to determine the scenarios in which longer lives are desirable from a general environmental perspective. The factors explored in the scenarios include the improvement of products in terms of eco-efficiency, as well as the contexts of use of clean electricity. The results indicate that the replacement of a product with improved products resulted in environmental benefits compared to the use of longer-lasting products, but there is some compensation between environmental impacts. However, these compensations are minimized in the context of decarbonized electricity mixtures and will decrease further as the technology of the LED lamp matures technologically, and product development decreases the environmental impact of the manufacture of LED luminaires [38].

On the other hand, it seems that the multi-criteria decision tools [39,40] are becoming increasingly valuable in street lighting, especially for energy planning. Carli et al. [41,42] developed a multi-criteria decision-making tool for the support of public decision makers. This tool can help to select the optimum retrofit of an existing street lighting system in an urban area. The scope was to reduce energy consumption and environmental impacts, as well as maintaining the required comfort and the quality of life. This work aims to provide a model of technical conditions that will serve as a basis in public tenders with large-scale replacement by LED luminaires. Further, we aim to allow the contest evaluator of public tenders to use multicriteria decision tools such as PROMETHEE [43] to facilitate the choice of an LED luminaire that best suits the technical, light quality, savings and, of course, environmental sustainability requirements [37].

## 2. Methodology

At this point, we will define the objectives, the methodology pursued in this work and the case study that will serve as a methodological proposal.

## 2.1. Objective

The promulgation of the energy efficiency regulations (hereafter REEIAE) in Spain together with the growth of LED technology [44] and the admission of the contracting of energy services companies (Energetics Services Companies) (ESC) by the public administrations are milestones that have emerged in recent years—the facilities in the EU and their method of management, maintenance and control are changing. The pilot experiences carried out by the IDAE (Institute for Diversification and Energy Saving) in the Town Halls of Alcorcón and Soto del Real (Spain) to adapt their outdoor lighting installations to the requirements of the REEIAE [44] through (ESC) and the lines of financing implemented with the aid programs of the National Energy Efficiency Fund and JESSICA FIDAE have revealed the high potential for savings in electricity consumption of this type of facility. In addition, this potential for savings in economic terms allows, in most cases, investments to be made with a simple return period of less than six years, which is ideal for the business of ESC companies [45].

The municipalities in the case of Spain propose the reform of a set of more than 700,000 existing light points, and more than 97% of the cases have opted for the replacement of discharge lamps with LED technology. With this, an average saving of 65% per year in electricity consumption has been achieved due to the variation in the power of the new light points, which drops from an average of 164 to 58 W per luminaire. Most of the government, especially the local administrations, are opting for public tenders for the concession of the lighting services for a minimum of 10 years, including maintenance, management, and investments in the ESC (Services Energetics Business) modality [46].

However, in some municipalities, perhaps due to the rush generated by carrying out the substitutions in a precipitous manner, regardless of demanding minimum qualities [47] and due to the lack of a detailed study of the facilities or the qualities of the equipment to be replaced, unforeseen situations have arisen, such as massive blackouts associated with surges caused by thunderstorms, problems in the cold ignition of the lighting installation, or distortions in the network generated by the harmonic contamination associated with the electronic equipment of the LED drivers [21].

The EU Circular Economy Action Plan promotes a longer lifespan of the products to be used as building materials or in facilities; in particular, outdoor lighting. However, encouraging longer lives could also generate compensation between different environmental impacts for some product categories such as LED luminaires [3,4]. This is why the environmental impact analysis in the different categories obtained in the industrial manufacture of LED luminaires using LCA techniques has become a key and priority aspect to be taken into consideration in the preparation of the technical conditions to address the public bidding of projects, whose purpose is to address the technological changes to LEDs in external lighting, based on efficiency criteria as well as energy, light, economic and, of course, environmental requirements.

This work aims to propose an improved model of technical specifications, complementary to those proposed by the IDAE or the CIE (Spanish Lighting Committee) [45,46], which allows a municipal technician to guarantee that the replacement of LED luminaires will be carried out, with the maximum guarantees of technical performance, light energy, and a low environmental impact, allowing a municipal technician to face this change and its consequences in the medium and long term with the necessary peace of mind that at least the replaced product meets the standards of quality and sufficient light efficiency and respect for the environment. Finally, this specification model is discussed and analyzed, supported by studies and work carried out by specialists in the field.

A Specification of Technical Conditions type or model is proposed as a case study that will allow the replacement of 1034 luminaires with 100 W HM discharge lamps, with LED luminaires with low environmental impact, greater energy efficiency, and similar lighting performance. Contemplating, as a novelty, the analysis of environmental sensitivity of the LED luminaire using LCA techniques, it is intended that this improved technical specification model with respect to the one defined by the IDEA or the CIE will allow us to consider and improve some technical aspects that we consider determinants to improve the functionality and environmental sustainability of the lighting installation to be replaced.

## 2.2. Model Specification of Technical Conditions for Case Study and Valuation Criteria Including Environmental Impact Aspects

Next, we propose a model of the technical specifications that can serve as a reference in tenders for projects promoted by the public tenders, regardless of the variation of the weights of the different criteria, which can be carried out in line the best criteria by the bidder. In this case study, we intend to set some general guidelines to assess different criteria, and specifically the environmental criteria, as something innovative and necessary and which is widely demanded by a society which is becoming increasingly sensitized to environmental issues. Using as an example of a technical specification model, a particular case study is applied as a reference for the elaboration of other specifications that address similar objectives of the massive replacement of LEDs, based on eco-efficient environmental criteria.

Model of improved technical conditions for the procedure of contracting the supply and installation of lighting LED technology for a maritime walk of the city council of Fuengirola (This model is divided into 20 sections that we define.)

### 2.2.1. Introduction

Included in the Energy Savings and Efficiency Plan that the City of Fuengirola is carrying out, and thus complying with current legislation in this area, REEIAP and specialized regulations of application, as well as the CIE and IEC (International Electrotécnical Comision) recommendations on technical requirements required for luminaires with LED outdoor lighting technology, including UNE-EN, ISO, IEC and the standards contained therein, this specification proposes the technical conditions for the replacement of existing discharge luminaires with more efficient ones with LED technology equipped with electronic ignition equipment of variable power and with the possibility of point-to-point remote management by radiofrequency as an improvement. Furthermore, a sensitivity and environmental impact analysis of the LED luminaires is offered.

### 2.2.2. Objective

This model of the Technical Specification is intended to tender the supply, replacement and installation of 1034 energy-efficient and environmentally sustainable LED luminaires, replacing 1034 existing luminaires currently equipped with lamps (HM) and electromagnetic ballast with others equipped with LEDs, including dimmable plate and source (dimmable 1–10 V and potentiometer 100 K), and which are capable of point-to-point intercommunication by radiofrequency (Figure 1).

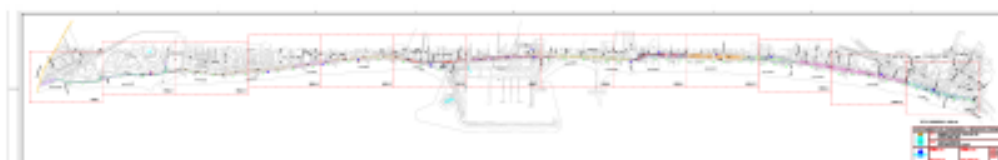


Figure 1. Plan of action for 6 km of P<sup>o</sup>, Maritime, Fuengirola (Málaga). Zone of LED lighting substitutions for which we are going to apply the Public Tender Model with Environmental Criteria as a case study (Source: Own elaboration).

This document is intended to establish the technical requirements and economic, lighting, and environmental technical criteria that will be used to assess the offers which must be submitted by the competing companies in the contract award process. In the replacement of the 1034 public lighting elements, the supply of the new equipment will be included, as well as its turnkey installation (labor, auxiliary machinery, and materials), including tests, as well as the withdrawal of the current equipment to a place indicated by the City Council.

This action aims to reduce pollutant emissions and improve the efficiency and light uniformity of the Promenade and represents a significant percentage decrease in energy expenditure, in addition to

minimizing the environmental impact in all environmental categories caused by the manufacture of LED luminaires.

### 2.2.3. Characteristics and LCA Required

The lighting of the Paseo Marítimo consists of 1034 luminaires mounted on columns of 4.5 m in height and with an interdistance of about 20 m. Each column is equipped with two luminaires each, with the exception of 10 columns with one luminaire per column—see Figure 2.

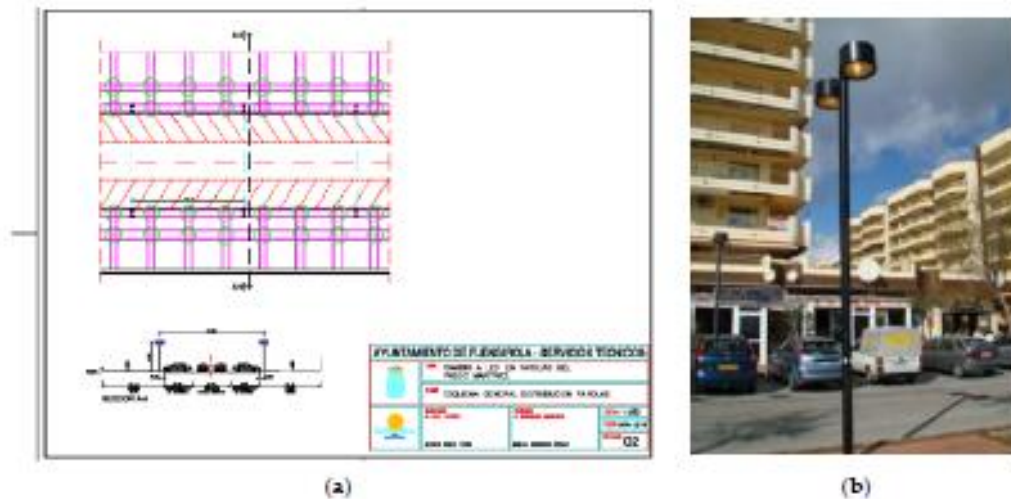


Figure 2. Luminaire detail and their position on a plane. (a) Detail plan of luminaire arrangement in the street; (b) Luminaire detail. (Source: own elaboration).

The column is connected to a voltage of 230 VAC 50 Hz, with a single phase, and each luminaire is protected with an independent fuse located in the lower door, at 1 m above ground (Figure 3).

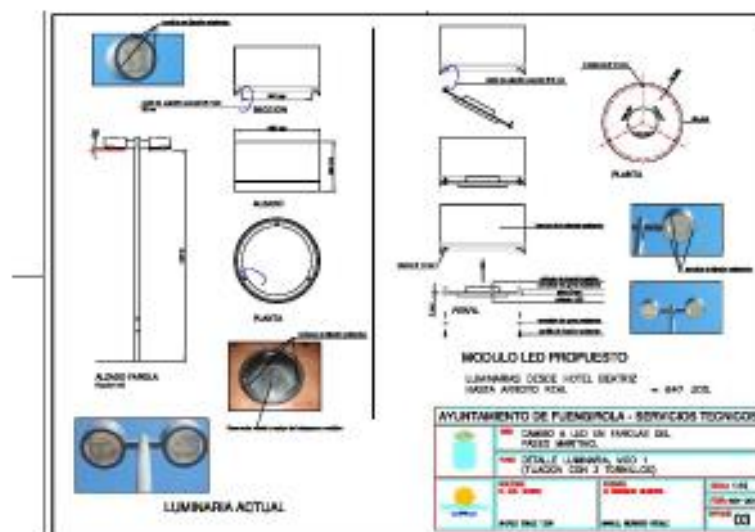


Figure 3. Detail of LED luminaire substitute (Source: own elaboration).

Each company participating in the contracting procedure must provide a complete lighting study carried out with a specific software DIALUX [48] program or similar to justify the adopted solution, which will specify in particular the results of the light study, with a definition of average uniformity ( $U_m$ ), minimum illuminance ( $E_{min}$ ) and medium illuminance ( $E_m$ ).

In addition, bidders will present an environmental impact study using life cycle analysis (LCA) techniques. The environmental impact study will require a life cycle analysis using a duly justified technical and scientific methodology [49]—see Figure 4.

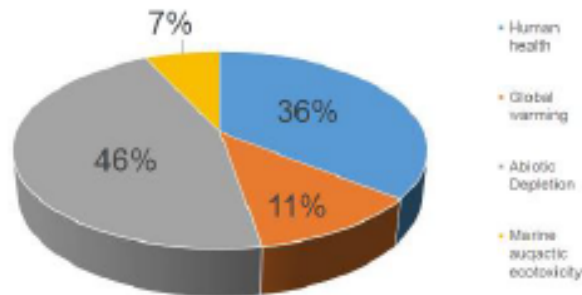


Figure 4. Detail of Results % of Environmental Impact Analysis (life cycle analysis (LCA)) performed for an LED Luminaire with SIMAPRO software (Method EPS 2000). Luminaire Viasol SOLIDY 50 W. (Source: Own elaboration. Dates: SOLIDY-SOLITEC LED Luminaires for LCA study).

LCA is an appropriate methodology to determine the environmental impact that occurs throughout the life cycle of products, services, or processes. It also allows for the determination of the environmental impact of any phase independently of the rest [50].

For the analysis of the LCA, which must be provided by bidding companies, any existing scientific–technical software on the market may be used, providing the technical characteristics, manufacturer, and version used—for example, SIMAPRO software (see Figure 4).

#### 2.2.4. Bidding Basis Budget

The budget of the contract, before VAT, will amount to €246,278.12, with the corresponding 21% VAT amounting to the total amount of the bidding base of € 297,996.53—an amount that can be improved downwards in the offers by the bidders (Table 1).

Table 1. Unit and total budget (Source: own elaboration).

| N° of Luminaires (Uds) | Unit Price (€) | Total € (without V.A.T) | Total € (with V.A.T) |
|------------------------|----------------|-------------------------|----------------------|
| 1.034                  | 238,18         | 246.278,12              | 297.996,53           |

This amounts to a unit budget per luminaire and point of light of €238.18, including the disassembly of existing luminaires and the assembly of the new plate equipped with an LED base plate and dimmable source (Dimmable 1–10 V and 100K Potentiometer), including in the unit price the auxiliary means of elevation, auxiliary machinery, labor, and materials—all assembled, fully finished, and tested.

Once the contract has been awarded, the price will include all expenses and taxes that are incurred as a result of the supply and the complete assembly—fully tested—including transport and auxiliary machinery.

#### 2.2.5. Execution Time (Deadline) and Reception of the Installation

The total term of the delivery and installation of the material object of this contract will be 12 months, counted from the moment of the signature of the Staking Verification Document. The main contractor awardee will incur a delay for the term cited in accordance with the public sector contract law.

Within a maximum period of 1 month from the total installation of the luminaires, the formal and positive act of reception will take place. When the installation is not in a condition to be received, this will be expressly stated, and instructions will be given to the contractor to remedy the defects or proceed to correct the defects in accordance with the agreement. When there is no correction or replacement, the City Council will leave the contractor's account, being exempt from the payment obligation.

#### 2.2.6. Installation Guarantee

A minimum guarantee of five years is established for the installed material, against manufacturing and/or malfunction, for any element or material of the installation that causes a total failure or a loss of illuminance greater than 5%, guaranteeing the luminous performance of the products. These guarantees will be based on a use of 4350 h/year. Regarding the failure of the power system, the drivers or power supplies must maintain their operation without alterations in their characteristics, especially in consumption and start-up peaks, during the warranty coverage period.

Mechanical defects due to material or manufacturing failures will also be guaranteed. All warranty terms must be agreed upon between the winner and the manufacturer, considering it necessary that all aspects and components affected by it are reflected and included in the guarantee document. During the warranty period, the shipping and return of the damaged material will be borne by the winning company.

During the guarantee period (minimum five years), the winner will keep a deposit of 5% of the material installed at no charge or cost to the City Council in the General Warehouse of Fuengirola. This material will be the property of the winning company until the end of the guarantee of the installed product—on which date, it can be withdrawn. This is intended to guarantee maintenance work, with the material in deposit provided by the Contractor company, thus facilitating the replacement of the damaged material by the deposit, without causing damage to the citizen and allowing a faster and more efficient replacement of defective materials. The removal of defective material remains the responsibility of the winning company, as well as its subsequent replacement, repair and shipping, at no cost to this administration. In this way, we will always maintain 5% as a refueling guarantee.

#### 2.2.7. Applicable Legislation

All products subject to this contract will be subject to the CE marking, which indicates that any element or component that exhibits this marking complies with the following legislation and any other associated legislation which is applicable at any time.

Bidders will be required to present the documentation and certificates necessary to justify compliance with current legislation, especially in environmental and recycling matters related to the luminaire model proposed by each of them for its supply and replacing the existing fittings—the lack of any of these documents will result in their exclusion from the award procedure.

Thus, bidders are required to present a certificate issued by a laboratory accredited by the ENAC (National Accreditation Entity) or similar international that proves that the company and all its manufacturing processes for the activity being contracted (equipment supplied) are certified by ISO 9001-2000, as well as a certificate of legislative compliance.

#### 2.2.8. Applicable Regulations

Bidders will also be required to submit the necessary documentation and certificates to justify compliance with current regulations regarding the luminaire model proposed by each of them for their supply and to replace the existing fittings. The lack of any of these documents will determine their exclusion from the award procedure (Tables 2–5)

**Table 2.** Security Requirements UNE-EN standard. (Source: ISO-UNE standard and own elaboration).

| Security Requirements Standardization UNE-EN   |
|--|
| UNE EN 60598-1 Luminaires. General requirements and tests.   |
| UNE EN 60598-2-3 Luminaires. Particular requirements. Street lighting luminaires.  |
| UNE EN 62504: 2015 General lighting. Products of electroluminescent diodes (LED) and related equipment. Terms and definitions. |

**Table 3.** Electromagnetic Compatibility. (Source: ISO-UNE standard and own elaboration).

| Electromagnetic Compatibility Standardization UNE-EN.  |
|--|
| UNE-EN 61000-3-2. Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 3-2: Limits. Limits for harmonic current emissions (equipment with 16A input current per phase).   |
| UNE-EN 61000-3-3. Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 3: Limits. Section 3: Limitation of voltage variations, voltage fluctuations and flicker in public low voltage supply networks for equipment with 16A input current per phase and not subject to a conditional connection. |
| UNE-EN 61547. General lighting equipment. EMC immunity requirements.   |
| UNE-EN 55015. Limits and measurement methods of the characteristics related to radioelectric disturbance of lighting equipment and the like.   |

**Table 4.** Luminaire Components. (Source: ISO-UNE standard, IEC (International Electrotechnical Commission) and own elaboration).

| Luminaire Components Standardization UNE-EN, and IEC  |
|---|
| UNE-EN 62031. LED modules for general lighting. Security Requirements   |
| UNE-EN 61347-2-13. Lamp control devices. Parts 2–13: Particular requirements for electronic control devices powered by direct current or alternating current for LED modules. |
| UNE-EN 62384. Electronic control devices powered by direct current or alternating current for LED modules. Performance Requirements   |
| IEC 62717: 2014. LED modules for general lighting. Performance Requirements   |
| IEC 62722-1: 2014. Operating characteristics of luminaires. Part 1: General requirements.   |
| IEC 62722-2-1: 2014. Operating characteristics of luminaires. Part 2: Particular requirements for LED luminaires.   |

**Table 5.** Luminaire Components (Source: ISO-UNE standard, CEI (Spanish Committee of Illumination) and own elaboration).

| Luminaire Components Standardization UNE-EN CIE  |
|--|
| UNE-EN 13032-1: 2006. Light and lighting. Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires. Part 1: Measurement and file format. |
| UNE-EN 13032-4. Light and lighting. Measurement and presentation of photometric data. Part 4: LED lamps, modules and LED luminaires.                     |
| CIE S025/E: 2015. Test method for LED lamps, luminaires and LED modules.   |
| CIE 127-2007 LED measurement   |

Both standards, IEC 62722-1 and IEC 62722-2-1 [51], are of great importance because they require the classification of luminaires according to IRC, color dispersion, flow maintenance and their efficiency in lm/W.

#### 2.2.9. Other Documents to Contribute

Additionally, bidders must provide a data sheet of the luminaires indicating all the technical characteristics regarding the type of light source, power supply, optical system, materials and finishes, operating temperatures, maintenance characteristics, degree of protection, electrical characteristics (power factor according to flow and current boot), and installation features—an official datasheet of the manufacturer or distributor of the light source used in the luminaires, indicating the exact type of source used in the luminaire, as well as all the technical characteristics of the type of light source

(nominal flow at 25 °C, lumens/watt, color temperature and color performance); a certificate issued by the manufacturer or distributor of the luminaire, including the duration of the warranty and the life of the luminaire (set of light source + power supply), and the conditions that will govern the warranty in addition to the references of the font types used; a guarantee equivalent to the useful life for labor and spare parts; a certificate that includes the test and photometric study of the luminaires in accordance with the provisions of the UNE-EN 13,032 Standard (the study must provide complete data of the photometric curves in a format compatible with free DIALUX luminaire software [48], light efficiency and its performance, the color temperature and the color performance of the light source); a photometric calculation carried out by means of a DIALUX calculation program or similar and for the type arrangement described in this Specification, in which compliance with the levels of average illuminance, average uniformity, maintenance factor, etc. is justified for the luminaire proposed by each bidding company; a certificate from the manufacturer, distributor or installer which is registered in a GIS (Integrated Waste Management System), and an environmental impact study, which includes the life cycle analysis (LCA) of the materials, products, and services included in the offer. This will be carried out by scientifically and technically competent personnel and will include, as an annex, the environmental product declaration, (EPD), consisting of standardized reports that provide quantified and verifiable information on the environmental performance of the entire life cycle of the materials [49].

#### 2.2.10. Initial Bases of the Project

Before starting the work, according to the contract direction, the performance of the project will be planned so that the lighting of the area is not altered, avoiding dark areas at all times and without affecting the lighting that is in service. The existing material which will not be reused will be dismantled according to the established plan and delivered to a place indicated by the City Council. All actions undertaken will be in accordance with what is specified in the different chapters of the Bid.

#### 2.2.11. Previous Visit of the Installation by the Bidders

Before the presentation of their offer, bidders may visit and investigate the installation object of this tender for the purpose of formulating an offer. They must coordinate with the person in charge of the contract and will not be able, in the case of being awarded the tender, to use differences observed from the data provided in this bidding document in order to claim a contractual modification or price change.

In order to visit the installation or see the disassembled equipment prior to the tender, the bidders will need to contact the person in charge of the city council contract via email.

#### 2.2.12. Samples

The presentation of a complete sample will be mandatory for the purposes of the appropriate verification, measurement and analysis of its characteristics and functionality. The samples will be delivered as an integral part of the technical offer. There must be a label clearly indicating the name or business name of the tenderer and the code and name of the article.

The Administration may carry out the tests that it deems necessary to verify the quality of the items and their adequacy for the intended supply. These tests may be of a destructive nature, and thus the delivered samples will not be returned. The samples presented together with the offers that are selected as awardees will not be returned, nor will they be considered, in any way, as a partial delivery of the awarded contract; they will remain the property of the City Council.

Failure to comply with the requirements indicated in this specification, as well as the non-suitability of the samples, will result in the exclusion of the bidder. Non-conformities or defects detected in the submitted samples, which do not imply the rejection of the offer, will be communicated to the contractor to be corrected.

### 2.2.13. Technical Characteristics

The technical characteristics are described in Table 6.

**Table 6.** Table of technical characteristics (Source: IEC, CEI and ISO-UNE Recommendations and own elaboration). THD: total harmonic distortion.

| Manufacturing Materials<br>(in Contact with the Outside) | Requirements  |
|--|---|
| Nominal Power  | Minimum 70W.  |
| Power Supply   | Externally dimmable:<br>0–10V and 100K potentiometer.               |
| Efficiency (lm/W)  | Minimum 80 lm/W   |
| Color Temperature (°K)                                   | Minimum 3.900 y Maximum 4.500 °K                                    |
| Estimated Useful Life                                    | Minimum 50,000 h.   |
| CRI (Chromatic Reproduction Index)                       | Minimum 70  |
| Optical Group Hermeticity Degree                         | Minimum IP 65.  |
| Degree of Protection Before Impacts                      | Minimum IK 10.  |
| Power Voltage and Frequency                              | AC230V/50Hz   |
| Power Factor (cos $\varphi$ )                            | Minimum 0.95  |
| THDmax current harmonics                                 | Maximum 20%   |
| THD harmonics of odd current order                       | Maximum 20%   |
| Environmental impact                                     | Maximum allowed according to current legislation                    |
| LCA Analysis   | Impact Categories:  |
| in all impact categories                                 | Human Health/Ecosystem Quality/Resources/Other<br>impact categories |

### 2.2.14. Functionality

To ensure adequate protection against saltpeter, dust and moisture penetration, the optical system, temperature control, power supply, mounting and disassembly screws of the plates containing the light source and the cooling system will be IP65 according to UNE 60598.

The luminaire will have a mountable and detachable electrical connection system that facilitates installation and maintenance. This system will not compromise the degree of tightness, electrical insulation or damage the electrical installation cable. The LED luminaires will be robust with a degree of impact resistance of IK10. The power supply must be replaced by mounting and disassembly screws. The system power factor must be greater than or equal to 0.95. The lifetime of the light source assembly shall be at least 50,000 h. The luminaires will be prepared to be managed by remote management systems; for this, the power supply will be adjustable (dimmable) with a voltage from 0 to 10 V and a 100 K potentiometer. Those luminaires which exceed the minimum power of 70 W in the improvements (LED board + source) must be placed externally, with fire resistance calculated to reduce the power to 70 W.

### 2.2.15. Photometry

The luminous efficiency of the assembly (light source + power supply) must be equal to or greater than 90 lm/W.

For the purpose of the calculation for the presentation of the Light Study, a model street will be used as a model for the evaluation of the light efficiency of the project, with a type arrangement with a distribution of luminaires at a symmetrical bilateral 20 m interdistance, a point of light height of 4.5 m, a width of the main road or roadway of 6 m, a width of double parking of 4.5 m on both sides of the main road or roadway, and the widths of the two sidewalks will be 8 m each—see the attached plan detail (Figure 2). All calculations must comply with Royal Decree 1890/2008 of November 14, REEIAE [44], which approves the regulation of energy efficiency in outdoor lighting installations and its complementary technical instructions EA-01 to EA-07, or it will be necessary to justify, that once the regulations are met, it will be possible for the projected equipment to meet the required levels.

During the installation period, the City Council may choose a sample that will be sent to a laboratory with ENAC accreditation, where the photometric values, light efficiency, performance, color temperature, color performance of the light source, the CE marking and degree of glare according to UNE-EN 13,032 will be determined [52].

#### 2.2.16. Security

No elements or metal component parts may accidentally detach due to vibrations or shocks and, in case of detachment, they must not fall on public roads; this is done to avoid the possibility of accidents. The closing of the luminaires will involve high security, i.e., the lights cannot, as a result of vibrations, have an accidental opening. However, this should not be an obstacle to the maintenance service. The plate that supports the luminaire and the power supply will be attached to the outer casing by means of a folding mechanism or a clamping cable. The electronic LED body and the power supply will be attached to the circular plate by means of screws in order to facilitate maintenance work.

#### 2.2.17. LCA analysis: Proposed Methodology to Evaluate the Environmental Impact as a Criterion

The life cycle analysis will be carried out using ISO 14,040 standards (Table 7) to define the principles and framework and in accordance with ISO 14,044 to describe the different stages of the analysis [53,54].

**Table 7.** Table of technical characteristics (Source: ISO standard recommendations and own elaboration).

| Standard          | Description  | Edition |
|-------------------|--|---------|
| ISO 14040:2006    | Environmental management. Life Cycle Assessment. Principles and framework.   | 2006    |
| ISO 14044:2006    | Environmental management. Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines.  | 2006    |
| ISO/TR 14047:2012 | Environmental management. Life Cycle Assessment. Illustrative examples on how to apply ISO 14,044 to impact assessment situations. | 2006    |

The proposed system will analyze the raw materials and energy used in the different manufacturing processes of the luminaire (anodized aluminum, plastics, polycarbonate, glass, etc.) in the laboratory and take into account the energy consumed in the production (extruded, welded, molding, machining, painting, sealing, etc.). To overcome the potential limitations, the initial assumptions are defined as follows:

- The determination of the electricity used assumes that the production mix corresponds to the Spanish energy production system.
- The cleaning of the different devices used in the process is discarded as it does not contribute a considerable percentage of the total energy.
- The transport of material has been considered, for each component of the material, to be the relevant distance covered from the quarry processing or extraction point to the study laboratory for calculation purposes [55].

The evaluation of the impact of the life cycle for the construction of LED luminaires will be carried out using the LCA SimaPro 8.30 software [56], or another similar program that is widely used in the technical or scientific field and which has sufficient guarantees for its use [57].

For the realization of the LCA, any existing software on the market may be used, providing the technical characteristics, manufacturer, version used, and guarantees of scientific use with proven results are reviewed and scientifically verified.

### 2.2.18. Evaluation of Environmental impacts in the Different Categories

In general, the results of the LCA performed with SimaPro 8.30 software [56] or similar software must contain separate results in the four main categories of damage-oriented impact: human health, ecosystem quality, climate change, and resources.

We intend to incorporate the LCA analysis into the specifications as an environmental criterion and compare the results obtained through a sensitivity analysis of the results, contrasted by at least two methods of impact assessment.

The use of at least two contrast methods is proposed for Sensitivity Analysis. Proposed methods include the IMPACT 2002+ Method [58,59] and the ReCiPe Endpoint v1.12, [60], EPS2000 method and CML IA-baseline method, or any other two methods that offer similar contrast guarantees. On the one hand, the IMPACT 2002+ method [58,59] considers the four categories of damage-oriented impact—human health, ecosystem quality, climate change and resources—separately. On the other hand, the ReCiPe Endpoint v1.12 method [61] considers only three categories of damage-oriented impact: human health, ecosystem quality and resources. In contrast, the EPS 2000 method and CML IA-baseline method provide us with information concerning the quantity and importance of CO<sub>2</sub> emissions to the atmosphere.

Any other method for contrast may be used which offers sufficient guarantees and is scientifically solvent and technically proven.

With the data provided previously, we can perform an evaluation of the environmental impact of the samples using SimaPro 8.30 software. Subsequently, we perform a Sensitivity Analysis [62] comparatively by at least two evaluation methods to verify possible differences in the results.

Tables 8–10 show the indicators of impacts on different categories of some of the proposed methods for the sensitivity impact analysis.

**Table 8.** Indicators of impacts according to ReCiPe Endpoint v1.12.

| Impact Category          | Category Indicator  | Measurement Units         |
|--------------------------|---------------------|---------------------------|
| Quality of the ecosystem | FDP *               | FDP/m <sup>2</sup> × year |
| Human health             | DALY **             | People/year               |
| Natural resources        | Damage to resources | MJ/Kg                     |
| Abiotic resources ***    | Exhaustion          | Kg                        |

\* Fraction of potential disappearance of the ecosystem per m<sup>2</sup> and year. \*\* Disability-adjusted life year. Reduction of years of life per person/year. \*\*\* Climatic, geological and geographical resources. Biodiversity.

**Table 9.** Indicators of impacts according to the EPS 2000 method.

| Impact Categories             | Unit                 |
|-------------------------------|----------------------|
| Ecosystem Production Capacity | PDFm <sup>2</sup> yr |
| Human Health                  | Persona/yr           |
| Damage Resources              | MJ/Kg                |
| Biodiversity depletion        | PDFm <sup>2</sup> yr |

**Table 10.** Indicators of impacts according to the CML 2001-IA baseline method.

| Impact categories                 | Unit                                   |
|-----------------------------------|--|
| Global warming/climate change     | Kg CO <sub>2</sub> equiv               |
| Ozone Depletion                   | Kg CFC-11 equiv                        |
| Water acidification               | Kg SO <sub>2</sub> equiv               |
| Creation of photochemical oxidant | Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> equiv |
| Water eutrophication              | Kg PO <sub>4</sub> equiv               |

### 2.2.19. Description of the Possible Improvements

Within the Specification of Technical Requirements that governs the procedure for contracting the supply and installation of LED technology luminaires and the support for improving the lighting of the Paseo Marítimo de Fuengirola (Málaga), it is considered appropriate to propose the following improvements to protect luminaires against high voltage or high voltage peaks:

- Improvement 1: Cirprotec NSB-10/230-C3-DD or similar surge protection equipment should be included in each luminaire (Table 11).
- Improvement 2: The installation of 13 control panels and lighting protection in the Pº Marítimo (see drawings), as well as 13 pieces of temporary and permanent surge protection equipment with automatic reconnection V - Check 4RC or similar (Table 12).

Table 11. Improvement 1: Protection of luminaires.

| Equipment NSB-10/230-C3-DD.<br>(Uds) | Unit Price € (Including Labor and Materials,<br>Fully Installed and Tested) | Total € (net) |
|--------------------------------------|---|---------------|
| 1.034                                | 20.16   | 20,845.44     |

Table 12. Improvement 2: Protection of electrical control panels.

| of Equipment. V-Check 4RC.<br>(Uds) | Unit Price € (Including Labor and Materials,<br>Fully Installed and Tested) | Total € (net) |
|-------------------------------------|---|---------------|
| 13                                  | 280.05  | 3,640.65      |

### 2.2.20. Quantifiable Valuation Criteria, Automatically Including Environmental Awards

The following will be an essential requirement for the evaluation of the offers:

- (a) Compliance with the minimum technical requirements required in this technical specification.
- (b) The delivery of the required documentation in this technical specification.
- (c) The presentation of the sample: this sample, at the time of delivery, will be evaluated, and under no circumstances may it be replaced by any other item with different characteristics than the one presented with the offer.
- (d) A justification of the environmental impact analysis must be presented in the different impact categories performed as LCA. The LCA environmental impact study will require an analysis of the life cycle using LCA SimaPro 8.30 software [56], or any other similar program that is widely used in the technical or scientific field with sufficient guarantees for its use [55]. Subsequently, a sensitivity analysis will be performed using the ReCiPe Endpoint v1.12 characterization method and/or the Impact 2002+ method, EPS2000 method and CML IA-baseline method, or any other two methods which have been duly technically and scientifically justified.

### 2.3. Applied Methodology

The evaluation of the proposals will be carried out in accordance with the documentation presented, regulated based on a total score of 100 points, according to the criteria listed in Table 13.

Table 13. Improvement 2: Protection of electrical control panels (Source: own elaboration).

| Damaged Categories                             | Weight (%) |
|--|------------|
| 1. Global economic valuation                   | 20         |
| 2. Economic evaluation of the best improvement | 20         |
| 3. Lighting valuation                          | 20         |
| 4. Technical assessment of samples             | 20         |
| 5. Assessment of environmental impacts         | 20         |

Once the different criteria have been defined, we will apply the PROMETHEE Method [43,63] to analyze and decide on the best of the proposals presented including the environmental criteria [37].

The PROMETHEE method is one of the most recent methods in this field. The first theoretical references to the method are from the mid-1980s, referencing its creator Jean-Pierre Brans—a professor at the University of Québec (Canada) [64]. It is based on the use of normal and pseudo-criteria of different types (linear, ladder, Gaussian) to establish the overarching relationships between two alternatives. The prescriptive approach, called Promethee, provides the decision maker with a complete and partial classification of actions. Promethee's applications to complex multi-criteria decision scenarios have produced extensive results in problems involving planning, resource allocation, priority setting and selection among alternatives. Other areas of its application have included forecasts, talent selection and tender analysis. The PROMETHEE method attempts to "model" a very complex structure of the problem, and by engaging a team of experts, it makes the evaluation procedure and the weight determination of each group of criteria which are evidently in conflict as objective as possible. The influence exerted by the parameters of each criterion's weight on the obtained solution was estimated by different scenarios of weight determination and by an analysis of the stability of criterion weights [65].

Using the different criteria mentioned, their weights were calculated and used in the PROMETHEE method (Visual Promethee 1.4 academic edition documentation, 2019) [66] and a multi-criteria decision tool was used to rank the 10 proposals presented in the public tender as will be explained in point 3 (Results). In general, the PROMETHEE method was designed to deal with multi-criteria problems and their associated evaluation tables. The additional information needed to run PROMETHEE is quite clear and understandable by both the analysts and the decision-makers. It consists of information regarding the criteria and information within each criterion. The weights represent the relative importance within the criteria—these weights are non-negative numbers which are independent of the measurement units of the criteria [63]. The higher the weight, the more important the criterion. In this research, all the weights for the energy performance indicators were equal and had the same influence on the ranking [37,43].

Multi-criteria analysis (PROMETHEE Method) can adequately address a variety of sustainable development dilemmas in decision-making, especially when applied to complex project evaluations involving multiple objectives and multiple stakeholder groups. Such evaluations are typically geared towards simultaneously satisfying private economic goals, broader social objectives and environmental targets. We show that, under specific conditions, a variety of stakeholder-oriented approaches may be able to contribute substantively to the resolution or improved governance of societal conflicts and the pursuit of the public good in the form of sustainable development [67,68].

To carry out this process, once the different criteria and the assigned weights have been defined, the preference indices between each two alternatives are calculated. The preference index ( $c_{ij}$ ) between two alternatives, ( $A_i$ ) and ( $A_j$ ), is the sum of the weights of the criteria in which the alternative ( $A_i$ ) exceeds ( $A_j$ ) (Tables 15 and 16 for our case study).

$$c_{ik} = \sum_j w_j S_j(a_i, a_j) \quad S_j(a_i, a_j) \text{ value "1" si } a_i > a_j \quad (1)$$

Subsequently, the incoming  $\phi_i^+$  (positives flows) and outgoing  $\phi_i^-$  (negative flows) flows of each alternative are calculated as the sum, respectively, of their preference indices over the others and of the others over it (Tables 17 and 18).

$$\phi_i^+ = \sum_k c_{ik} \quad \phi_i^- = \sum_k c_{ki} \quad (2)$$

Incoming flows express the extent to which one alternative dominates over the others, while outgoing flows express the extent to which this alternative is dominated by the others.

Finally, using the flows, each alternative is prioritized over the others, as follows:

$A_i$  exceeds  $A_k$ , if any of the following cases occur:

$$[\phi_i^+ > \phi_k^+ \text{ and } \phi_i^- < \phi_k^-] \quad (3)$$

$$[\phi_i^+ > \phi_k^+ \text{ and } \phi_i^- = \phi_k^-] \quad (4)$$

$$[\phi_i^+ = \phi_k^+ \text{ and } \phi_i^- < \phi_k^-] \quad (5)$$

See Figure 5 for an example or case study.

1. Global economic valuation: Points from 0 to 20 are awarded. The best economic offer will be valued with a maximum of 20 points.

The lowest price will be the one that presents the minimum economic offer and will be the one that obtains the highest score. The rest of the offers will be valued according to the following formula. The lowest bid with respect to the type of tender will get the highest score.

The score of each offer will be found by a simple rule of three according to the following formula: (6)

$$Px = \frac{P \times (TL - Ox)}{(TL - Om)} \quad (6)$$

where  $Px$  is the offer score,  $TL$  the type of tender,  $Ox$  the offer that is scored,  $Om$  the lowest offer, and  $PM$ , the maximum score.

The procedures provided for by article 85 of the RGLCAP [69] will be applied to assess and qualify disproportionate or reckless offers.

2. Economic evaluation of the best improvement: Points from 0 to 20 are awarded.

The improvements will be evaluated based on their technical, functional and economic value in accordance with this municipal technical specification. The improvements must be offered in full and for their total value. Thus, if any company does not complete the offer, it will be automatically rejected.

- Improvement 1: Including, in each luminaire, Cirprotec NSB-10/230-C3-DD or similar surge protection equipment: valued at 10 points.
  - Improvement 2: Installation in 13 control panels of lighting protection which exists in the P<sup>o</sup> Maritime (see drawings) and 13 pieces of temporary and permanent surge protection equipment with automatic reconnection V-Check 4RC or similar: Valued at 10 points.
3. Lighting valuation (Power and Efficiency): Points from 0 to 20 are awarded.
- Luminous efficiency of the equipment (lm/W): 10 points.

The highest score in this section will be awarded to the team that presents the best light efficiency or best ratio of lumens per watt (lm/W). The calculation of the points for this section that are assigned will be based on the following formula (taking into account that, within the formula, "X" represents the value of the light efficiency offered by the bidding company and "Y" represents the value of the highest of the light efficiencies presented by the competing companies):

$$\left(\frac{X}{Y}\right) \cdot 10 \quad (7)$$

- Lighting study with DIALUX software or similar: 10 points.  
Companies that present a light study will be awarded 10 points. Those who do not submit it will be given 0 points in this section.

4. Technical assessment of samples: Points from 0 to 20 are awarded.

The improvement of technical criteria up to a maximum of 20 points will be assessed, according to the attached distribution.

These characteristics will be measured by the City Council technicians and a CIRCUTOR AR6 or similar network analyzer, and Kyoritsu 2413R or similar clamp meters will be used.

Each technical characteristic will be assessed individually, according to Table 14 below, with the highest score given to the offer with the best technical value and with the points distributed in a linear manner to the rest of the offers.

**Table 14.** Quantified valuation of the technical characteristics of the luminaire.

| Technical characteristics                             | Punctuation |
|---|-------------|
| Starter peak (cold at 24 h)                           | 4           |
| Harmonic distortion                                   | 4           |
| Type of material                                      | 4           |
| Cooling system or justification of thermal dispersion | 4           |
| Luminaire adaptation plate anchoring system           | 4           |

5. Value of environmental impacts: Points from 0 to 20 are awarded.

The degree of environmental impact of the luminaires will be assessed in different impact categories during the manufacturing process, including transportation. The bidding companies will have to provide a study or scientific-technical report signed by a technical manager or expert in Life Cycle Analysis (LCA), with a justification for the Environmental Impact Analysis of the luminaire offered. The LCA study of environmental impact will require an analysis of the life cycle of the proposed LED luminaire, using Lima SimaPro 8.30 software [56], or any other similar program that is widely used in the technical or scientific field, providing sufficient guarantees for its use. Subsequently, an Impact Sensitivity Analysis will be performed on the LED luminaire proposed by the tenderer, using at least two of the following methods proposed to compare the results: the ReCiPe Endpoint v1.12 characterization method and/or the Impact 2002+ method, the EPS2000 method and CML IA-baseline method, or any other two methods that offer similar contrast guarantees and which are duly technically and scientifically justified. This is intended to contrast the results of the environmental impact obtained in a scientific way and incorporate them as an evaluation criterion.

### 3. Results

We will apply the practical results obtained in a tender for tenders (EI) to the proposed case study. We will analyze the results of the impact of the environmental criteria on the results of the Contest by applying, as a Valuation Criteria Method, the multicriteria analysis carried out with the PROMETHEE Method [37,40,41,63].

In Table 15, we show the criteria to be evaluated, the weights of the criteria and the proposals presented for the 10 companies evaluated for the proposed case study.

Subsequently homogenize the matrix (Table 16) and we apply the PROMETHEE method (Table 17) to clause the positive flows ( $\phi^+$ ) and the negative flows ( $\phi^-$ ) (Table 18).

Table 15. Matrix of criteria, weights and evaluations made to the 10 bidding companies who submitted to the public tender.

| Criteria                 | 1. Global Economic Valuation Euros | 2. Economic Evaluation of the Best Improvement 0–20 points | 3. Lighting Valuation 0–20 Points | 4. Technical Assessment of Samples 0–20 Points | 5. Assessment of Environmental Impacts 0–20 Points |
|--------------------------|------------------------------------|--|-----------------------------------|--|--|
| Weight (%)               | 20                                 | 20   | 20                                | 20   | 20   |
| <b>Bidding Companies</b> |                                    |  |                                   |  |  |
| E1                       | 236,287.15                         | 20   | 20                                | 20   | 10   |
| E2                       | 246,278.12                         | 20   | 20                                | 16   | 20   |
| E3                       | 239,498.90                         | 10   | 20                                | 12   | 10   |
| E4                       | 240,453.24                         | 0  | 10                                | 20   | 15   |
| E5                       | 230,954.13                         | 10   | 20                                | 16   | 10   |
| E6                       | 238,556.29                         | 10   | 20                                | 16   | 10   |
| E7                       | 245,328.97                         | 10   | 20                                | 20   | 20   |
| E8                       | 228,429.78                         | 5  | 10                                | 16   | 10   |
| E9                       | 233,720.10                         | 5  | 20                                | 12   | 20   |
| E10                      | 236,574.56                         | 10   | 20                                | 16   | 10   |

Table 16. Matrix of weights and criteria homogenized.

| Criteria                 | Global Economic Valuation | Economic Evaluation of the Best Improvement | Lighting Valuation | Technical Assessment of Samples | Assessment of Environmental Impacts |
|--------------------------|---------------------------|---|--------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Weight                   | 0.20                      | 0.20  | 0.20               | 0.20                            | 0.20                                |
| <b>Bidding Companies</b> |                           |   |                    |                                 |                                     |
| E1                       | 0.96                      | 2.00  | 0.67               | 1.00                            | 0.50                                |
| E2                       | 1.00                      | 2.00  | 0.67               | 0.80                            | 1.00                                |
| E3                       | 0.97                      | 1.00  | 0.67               | 0.60                            | 0.50                                |
| E4                       | 0.98                      | 0.00  | 0.33               | 1.00                            | 0.75                                |
| E5                       | 0.94                      | 1.00  | 0.67               | 0.80                            | 0.50                                |
| E6                       | 0.97                      | 1.00  | 0.67               | 0.80                            | 0.50                                |
| E7                       | 1.00                      | 1.00  | 0.67               | 1.00                            | 1.00                                |
| E8                       | 0.93                      | 0.00  | 0.33               | 0.80                            | 0.50                                |
| E9                       | 0.95                      | 1.00  | 0.67               | 0.60                            | 1.00                                |
| E10                      | 0.96                      | 1.00  | 0.67               | 0.80                            | 0.50                                |

Table 17. Matrix of positive ( $\phi^+$ ) and negative ( $\phi^-$ ) flows.

|          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | Flow (+) |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
|          | E1   | E2   | E3   | E4   | E5   | E6   | E7   | E8   | E9   | E10  |          |
| E1       | 0.00 | 0.20 | 0.40 | 0.40 | 0.60 | 0.40 | 0.20 | 0.80 | 0.60 | 0.40 | 4.00     |
| E2       | 0.40 | 0.00 | 0.80 | 0.80 | 0.60 | 0.60 | 0.40 | 0.80 | 0.60 | 0.60 | 5.60     |
| E3       | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.40 | 0.20 | 0.20 | 0.00 | 0.60 | 0.20 | 0.20 | 2.00     |
| E4       | 0.40 | 0.20 | 0.60 | 0.00 | 0.60 | 0.60 | 0.00 | 0.60 | 0.40 | 0.60 | 4.00     |
| E5       | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 0.20 | 0.00 | 1.40     |
| E6       | 0.20 | 0.00 | 0.20 | 0.40 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 0.40 | 0.20 | 2.20     |
| E7       | 0.40 | 0.20 | 0.60 | 0.80 | 0.60 | 0.60 | 0.00 | 1.00 | 0.40 | 0.60 | 5.20     |
| E8       | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | 0.40     |
| E9       | 0.20 | 0.00 | 0.20 | 0.60 | 0.40 | 0.20 | 0.00 | 0.80 | 0.00 | 0.20 | 2.60     |
| E10      | 0.20 | 0.00 | 0.20 | 0.40 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 0.40 | 0.00 | 2.00     |
| Flow (+) | 2.00 | 0.60 | 3.40 | 4.20 | 3.40 | 2.60 | 0.60 | 6.40 | 3.40 | 2.80 |          |

Table 18. Positive ( $\phi^+$ ) and negative ( $\phi^-$ ) flows.

|     | Flow (-) | Flow (+) |
|-----|----------|----------|
| E1  | 2.00     | 4.00     |
| E2  | 0.60     | 5.60     |
| E3  | 3.40     | 2.00     |
| E4  | 4.20     | 4.00     |
| E5  | 3.40     | 1.40     |
| E6  | 2.60     | 2.20     |
| E7  | 0.60     | 5.20     |
| E8  | 6.40     | 0.40     |
| E9  | 3.40     | 2.60     |
| E10 | 2.80     | 2.00     |

Once the positive and negative flows have been calculated, we will graphically represent the results; see Figure 5.

Graphing the results of the positive and negative flows for each bidding company, we find that companies with higher positive flows and smaller negative flows will be those represented in the upper right of the graph or Figure 6. These companies are the ones that would obtain the best results according to the criteria applied. In particular, the best would be the bidding company E2, followed by companies E7 and E1, which coincidentally are the ones that have presented the best results in the environmental criteria—see Figures 5 and 6.

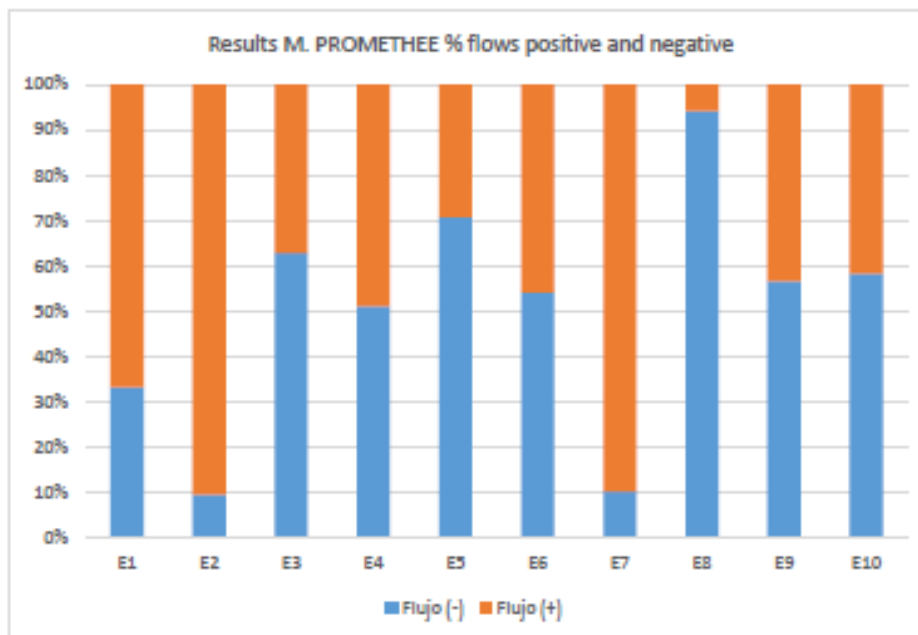


Figure 5. Graphical representation of the positive and negative flows for each of the bidding companies submitted to the Public Tender (E<sub>i</sub>) Source: Own elaboration.

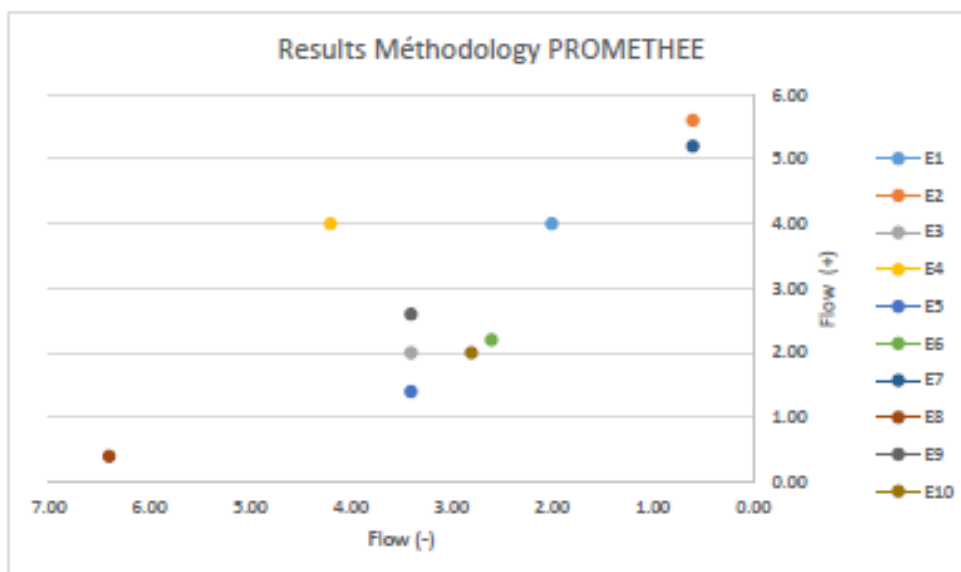


Figure 6. Graphical representation of the positive and negative flows for each of the bidding companies submitted to the Public Tender (E<sub>i</sub>) Source: Own elaboration.

#### 4. Discussion

The implementation of environmental criteria in the Public Tenders for the bidding for a change to LED technology on a large scale requires the environmental criteria to be given the sufficient importance they deserve.

LCA is shown to be an adequate solution to assess the environmental impacts incurred in the manufacture and transport of LED luminaires. Implementing the analysis of these impacts as an environmental criterion would contribute decisively to the massive substitutions with LEDs that are being carried out in the EU and around the world in the interests of environmental sustainability.

Multi-criteria analysis using the PROMETHEE Methodology has been demonstrated as a viable solution for application as an analysis method in public tender procedures, presenting itself as an effective means of valuing offers with objective criteria in terms of environmental sustainability [37,43].

Looking at the results, we see that it is not necessarily the companies that have the highest economic casualties that are best positioned for an award. In our case study, companies E7 and E2 were two of the companies that had practically not carried out an economic withdrawal; they presented an economic offer practically at the type of tender. However, they opted for LED luminaires with a very low environmental impact and so, in the end, they were two of the best placed companies when applying the PROMETHEE multicriteria analysis method.

This demonstrates that both the LCA and the environmental impact assessment criteria and the PROMETHEE methodology can be perfectly applied as a selection model in public bidding contests for massive changes to LED in our cities.

## 5. Conclusions

Energy efficiency and sustainability are strategic lines promoted by public administrations. In particular, in the field of lighting, LED technology is a reality that is increasingly implemented to illuminate our cities.

In the public administrations promoted by the EU, every day, more projects oriented to the large-scale replacement of LED discharge lamps are promoted through public competitions supported by technical specifications, which allow their legal processing and subsequent execution.

In most of these technical specifications, only technical aspects (lighting, electricity, economic or energy efficiency) associated with the characteristics of the luminaires are addressed— aspects that are valued in the form of technical criteria. In general, these competitions proceed without objectively addressing, as a selection criterion, aspects of environmental impacts generated in the manufacturing processes of LED luminaires.

In this work, we present, as a case study, a technical specification and environmental specifications model, which jointly evaluate both aspects and allow us to guarantee with greater security the proper functioning, efficiency and sustainability of the selected LED luminaires, supporting this selection in the PROMETHEE multi-criteria advanced evaluation methodology applied by different scientific studies [37,39,43,44].

This model of technical specifications for public tenders that we propose is intended as an ambitious attempt to evaluate a case of massive LED replacement. On the one hand, we evaluate economic aspects or delivery (term), and on the other hand, the technical and electrical aspects (peaks of current at startup, harmonics distortion, thermal dissipation) and lighting techniques (photometry, light efficiency, uniformity, medium and extreme lighting) are included. Furthermore, as an innovative criterion, we include the environmental impacts produced in the manufacture and transport of the chosen LED luminaire, analyzing with LCA techniques the environmental impacts incurred in the manufacture of LED luminaires.

This methodology and the technical specifications model proposed are presented as a novelty that addresses environmental criteria focused on environmental impacts. To do this, bidders must present the LCA of their LED luminaires using specialized LCA software—SimaPro 8.30 or similar—with sufficient scientific–technical guarantees.

In addition, another novel contribution consists in applying the PROMETHEE Methodology in the selection process as a model base for the elaboration of the Technical Specifications for the tendering of public lighting works and installations backed by eco-efficient environmental criteria [37,41,68,69].

On the other hand, taking into account both general sustainable development and the regulations of energy efficiency, it can be deduced that the development of new materials in the manufacture of equipment manufactured with LED, SSL, OLED [70] or third-generation LED technology based on TADF emitters for lighting [71] should be analyzed with LCA techniques to assess their impacts, and based on the results, the decision to opt for these new LED developments in the immediate future can be supported [72].

In addition to measuring the LCA of the luminaires, we evaluate the use of by-products or waste and their recycled incorporation into the industrial life cycle [55,58]. Consequently, the products with the lowest impact will allow a reduction in CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions, as well as a reduction in the consumption of energy and resources.

In this way, the use of low-cost recycled materials with a low environmental impact, which are also close to the production centers, and their return to manufacturing processes through recovery, would be encouraged by the public administrations, allowing the promotion of circular economic strategies. In this regard, it is noteworthy that tests are already being carried out regarding the use of electrical plastic waste to produce syn-gas or gasification gas [73–75] or as a material for sustainable construction [35]. It is possible to reuse the metal base, which is of great value mainly as aluminum for industrial reuse, as an electrical conductor, or as electrodes in the hydrolysis processes for the production of H<sub>2</sub> [76–78].

**Author Contributions:** Conceptualization, M.J.H.-O. and J.A.L.-M.; methodology, M.J.H.-O.; software, M.J.H.-O. and J.A.L.-M.; validation, H.-O.M.J. and P.B.; formal analysis, M.J.H.-O. and P.B.; investigation, M.J.H.-O.; resources, M.J.H.-O. and P.B.; data curation, M.J.H.-O.; writing—original draft preparation, M.J.H.-O.; writing—review and editing, M.J.H.-O.; visualization, M.J.H.-O. and R.L.-G.; supervision, P.B.; project administration, M.J.H.-O. and P.B.; funding acquisition, P.B.

**Funding:** This research received no external funding directly; however, in this work, PhD Hermoso-Orzáez Manuel Jesús participated as a main researcher in the external research at the Center Instituto Politécnico de Portalegre (Portugal) within the ECO2CIR INTERNATIONAL PROJECT-PROJECT OF CROSS-BORDER COOPERATION FOR THE INTRODUCTION OF THE ECOLOGICAL AND CIRCULAR ECONOMY THROUGH THE PREVENTION OF IMPROVEMENT OF RECYCLING, THE MANAGEMENT AND VALORIZATION OF RESIDUES IN THE REGIONS CENTRO, EXTREMADURA AND ALENTEJO.- INTERREG ESPAÑA-PORTUGAL supervised by PhD Brito Paulo, with the aim of looking for Models of Specifications that serve as a reference for the massive LED replacements that are expected to be carried out in the short and medium-term in the Alentejo (Portugal) and Extremadura (Spain) regions.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Marimuthu, C.; Kirubakaran, V. Carbon and energy pay back period for the solar street light using life cycle assessment. *Int. J. Chem. Technol. Res.* **2015**, *8*, 1125–1130.
2. De Almeida, A.; Santos, B.; Bertoldi, P.; Quicheron, M. Solid state lighting review—Potential and challenges in Europe. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2014**, *34*, 30–48. [CrossRef]
3. Lobão, J.A.; Devezas, T.; Catalão, J.P.S. Energy efficiency of lighting installations: Software application and experimental validation. *Energy Rep.* **2015**, *1*, 110–115. [CrossRef]
4. Ozadowicz, A.; Grela, J. The street lighting integrated system case study, control scenarios, energy efficiency. In Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA, Barcelona, Spain, 16–19 September 2014.
5. Fiaschi, D.; Bandinelli, R.; Conti, S. A case study for energy issues of public buildings and utilities in a small municipality: Investigation of possible improvements and integration with renewables. *Appl. Energy* **2012**, *97*, 101–114. [CrossRef]
6. Traverso, M.; Donatello, S.; Moons, H.; Quintero, R.; Gama Caldas, M.; Wolf, O. Revision of the EU green public procurement criteria for street lighting and traffic signals—Preliminary report. *Eur. J. Risk Regulat. EJRR* **2018**, *9*, 316–328.
7. UE. European Commission. Lighting the Cities Accelerating the Deployment of Innovative Lighting in European Cities. 2013. Available online: <http://www.ibe-biv.be/media/pdf/Andere/Lighting%20the%20Cities%20-%20EN%20final.pdf> (accessed on 22 October 2019). [CrossRef]

8. IDAE. Instituto para la Diversificación y ahorro de la energía. Ministerio de Transición ecológica Second Call for the Aid Program for the Renewal of Municipal External Lighting Facilities (Fnee). Available online: <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-la-renovacion-de-alumbrado-exterior-fnee/segunda-convocatoria-del-programa-de-ayudas-para-la-renovacion-de-las-instalaciones-de-alumbrado-0> (accessed on 22 October 2019).
9. Sun, W.S.; Tsuei, C.H.; Huang, Y.H. Simulating the illuminance and efficiency of the LEDs used in general household lighting. *Phys. Procedia* **2011**, *19*, 244–248. [[CrossRef](#)]
10. Valentová, M.; Quicheron, M.; Bertoldi, P. LED projects and economic test cases in Europe. *Int. J. Green Energy* **2015**, *12*, 843–851. [[CrossRef](#)]
11. Rode, I.; Moriarty, M.; Beattie, C.; McIntosh, J.; Hargroves, K. Technologies and Processes to Reduce Carbon Intensity of “Main Road Projects”, a research report and annotated bibliography for the Sustainable Built Environment National Research Centre (SBEsrc) by the Curtin University Sustainability Policy Institute. In *A Sustainable Built Environment National Research Centre (SBEsrc) Research Report and Annotated Bibliography*; Curtin University Sustainability Policy Institute: Perth, Australia, 2014.
12. C.C.L.R. *CDP Cities: InFocus Report | 2016 - City of Sydney*; Driving Sustainable Economic: London, UK, 2016.
13. Djuretic, A.; Kostic, M. Actual energy savings when replacing high-pressure sodium with LED luminaires in street lighting. *Energy* **2018**, *157*, 367–378. [[CrossRef](#)]
14. Jiang, Y.; Li, S.; Guan, B.; Zhao, G.; Boruff, D.; Garg, L.; Patel, P. Field evaluation of selected light sources for roadway lighting. *J. Traffic Transp. Eng.* **2018**, *5*, 372–385. [[CrossRef](#)]
15. Yoomak, S.; Ngaopitakkul, A. Optimisation of lighting quality and energy efficiency of LED luminaires in roadway lighting systems on different road surfaces. *Sustain. Cities Soc.* **2018**, *38*, 333–347. [[CrossRef](#)]
16. International Energy Agency, IEA. *Energy Efficiency Market Report*. IEA Publications, 9, rue de la Fédération, 75739 Paris cedex 15 2016. Available online: [www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm](http://www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm) (accessed on 22 October 2019).
17. Ryckaert, W.R.; Smet, K.A.G.; Roelandts, L.A.A.; Van Gils, M.; Hanselaer, P. Linear LED tubes versus fluorescent lamps: An evaluation. *Energy Build.* **2012**, *49*, 429–436. [[CrossRef](#)]
18. Hermoso Orzáez, M.J.; De Andrés Díaz, J.R. Comparative study of energy-efficiency and conservation systems for ceramic metal-halide discharge lamps. *Energy* **2013**, *52*, 258–264. [[CrossRef](#)]
19. Gil-De-Castro, A.; Moreno-Munoz, A.; Larsson, A.; De La Rosa, J.J.G.; Bollen, M.H.J. LED street lighting: A power quality comparison among street light technologies. *Light. Res. Technol.* **2013**, *45*, 710–728. [[CrossRef](#)]
20. Pipattanasomporn, M.; Rahman, S.; Flory, L.; Teklu, Y. Engineering design and assessment of a demand-sensitive LED streetlighting system. *Sustain. Energy Technol. Assess.* **2014**, *7*, 136–146. [[CrossRef](#)]
21. Hermoso-Orzáez, M.J.; Rojas-Sola, J.I.; Gago-Calderón, A. Electrical consequences of large-scale replacement of metal halide by LED luminaires. *Light. Res. Technol.* **2018**, *50*, 282–293. [[CrossRef](#)]
22. Kirzey, B. *Restoring Detroit's Street Lighting System*; Pacific Northwest National Lab: Richland, WA, USA, 2015.
23. Northeast Group. *Global LED and Smart Street Lighting: Market Forecast (2016–2026)*; Northeast Group: Washington, DC, USA, 2016.
24. Blanco, A.M.; Stiegler, R.; Meyer, J. Power quality disturbances caused by modern lighting equipment (CFL and LED). In Proceedings of the IEEE Grenoble Conference PowerTech, POWERTECH, Grenoble, France, 16–20 June 2013; pp. 1–6.
25. Djuretic, A.; Skerovic, V.; Arsic, N.; Kostic, M. Luminous flux to input power ratio, power factor and harmonics when dimming high-pressure sodium and LED luminaires used in road lighting. *Light. Res. Technol.* **2019**, *51*, 304–323. [[CrossRef](#)]
26. Arias, M.; Vasquez, A.; Sebastián, J. An overview of the AC-DC and DC-DC converters for LED lighting applications. *Automatika* **2012**, *53*, 156–172. [[CrossRef](#)]
27. Fan, S.; Wang, Y.; Wang, Y.; Geng, L. Minimized start-up transient and initial inrush current of boost converter for LED lighting. In Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Taipei, Taiwan, 28–31 May 2013; pp. 1–6.
28. El-Moniem, M.S.A.; Azazi, H.Z.; Mahmoud, S.A. A current sensorless power factor correction control for LED lamp driver. *Alex. Eng. J.* **2014**, *53*, 69–79. [[CrossRef](#)]
29. Hermoso-Orzáez, M.J.; Gago-Calderón, A.; Rojas-Sola, J.I. Power quality and energy efficiency in the pre-evaluation of an outdoor lighting renewal with light-emitting diode technology: Experimental study and amortization analysis. *Energies* **2017**, *10*, 836. [[CrossRef](#)]

30. Edwards, B. *Rough Guide to Sustainability: A Design Primer*, 4th ed.; Publishing, R., Ed.; RIBA Publishing: London, UK, 2014; ISBN 9781859465073.
31. Pittau, F.; Krause, F.; Lumia, G.; Habert, G. Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls. *Build. Environ.* **2018**, *129*, 117–129. [[CrossRef](#)]
32. Dong, L.; Wang, Y.; Li, H.X.; Jiang, B.; Al-Hussein, M. Carbon reduction measures-based LCA of prefabricated temporary housing with renewable energy systems. *Sustainability* **2018**, *10*, 718. [[CrossRef](#)]
33. United Nations Environment Programme. *UNEP Frontiers: 2016 Report: Emerging Issues of Environmental Concern*; United Nations Environment Programme: Nairobi, Kenya, 2016.
34. Monteiro, H.; Freire, E. Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods. *Energy Build.* **2012**, *47*, 572–583. [[CrossRef](#)]
35. Pargana, N.; Pinheiro, M.D.; Silvestre, J.D.; De Brito, J. Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings. *Energy Build.* **2014**, *82*, 466–481. [[CrossRef](#)]
36. Donatello, S.; Rodriguez Quintero, R.; Gama Caldas, M.; Wolf, O.; Van Tichelen, P.; Van Hoof, V.; Geerken, T. (VIPO) *Revision of the EU Green Public Procurement Criteria for Road Lighting and Traffic Signals*; Technical Report and Criteria Proposal; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2019.
37. Doulos, L.T.; Sioutis, I.; Kontaxis, P.; Zissis, G.; Faidas, K. A decision support system for assessment of street lighting tenders based on energy performance indicators and environmental criteria: Overview, methodology and case study. *Sustain. Cities Soc.* **2019**, *51*, 101759. [[CrossRef](#)]
38. Richter, J.L.; Tahkämö, L.; Dalhammar, C. Trade-offs with longer lifetimes? The case of LED lamps considering product development and energy contexts. *J. Clean. Prod.* **2019**, *226*, 195–209. [[CrossRef](#)]
39. Doulos, L.; Tsangrassoulis, A.; Topalis, E.V. Multi-criteria decision analysis to select the optimum position and proper field of view of a photosensor. *Energy Convers. Manag.* **2014**, *86*, 1069–1077. [[CrossRef](#)]
40. Madias, E.-N.D.; Doulos, L.T.; Kontaxis, P.A.; Topalis, E.V. A decision support system for techno-economic evaluation of indoor lighting systems with LED luminaires. *Oper. Res.* **2019**, *1*, 1–20. [[CrossRef](#)]
41. Carli, R.; Dotoli, M.; Pellegrino, R. A decision-making tool for energy efficiency optimization of street lighting. *Comp. Oper. Res.* **2018**, *96*, 223–235. [[CrossRef](#)]
42. Carli, R.; Dotoli, M.; Cianci, E. An optimization tool for energy efficiency of street lighting systems in smart cities. *IFAC-PapersOnLine* **2017**, *50*, 14460–14464. [[CrossRef](#)]
43. Sun, Z.; Han, M. Multi-criteria decision making based on Promethee method. In *Proceedings of the International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering, CCIE, Wuhan, China, 5–6 June 2010*; pp. 416–418.
44. Ministry of Industry Tourism and Commerce, Government Spain. *Energy Efficiency Regulation in Outdoor Lighting Installations and Its Complementary Technical Instructions EA-01 to EA-07*; Royal Decree 1890/2008, of November 14, which approves the Regulation of energy efficiency in outdoor lighting installations and its complementary technical instructions EA-01 to EA-07.; Ministry of Industry Tourism and Commerce: Madrid, Spain, 2008; p. 70.
45. CIE, Spanish Lighting Committee. *Mixed Supply and Services Contract for the Provision of the Integral Outdoor Lighting Service of the Municipality of (AYTO) Specification sheet IDAE Contract Models*. Available online: <https://www.ceisp.com/el-cei/biblioteca/documentacion-eses/>. Madrid (accessed on 22 October 2019).
46. CIE, Spanish Lighting Committee. *Required Technical Requirements for Luminaires with Led Outdoor Lighting Technology*; CIE, Spanish Lighting Committee: Madrid, Spain, 2015.
47. Navarro, R.; Nieto, J. The mayors bought LEDs that are not regulatory nor do they comply with the specifications. *El Mundo* **2014**, *1*.
48. Dialux DIALUX EVO 8.2. Available online: <https://www.dial.de/es/dialux-desktop/download/> (accessed on 22 October 2019).
49. Lozano-Miralles, J.; Hermoso-Orzáez, M.; Martínez-García, C.; Rojas-Sola, J. Comparative study on the environmental impact of traditional clay bricks mixed with organic waste using life cycle analysis. *Sustainability* **2018**, *10*, 2917. [[CrossRef](#)]
50. Bories, C.; Vedrenne, E.; Paulhe-Massol, A.; Vilarem, G.; Sablayrolles, C. Development of porous fired clay bricks with bio-based additives: Study of the environmental impacts by Life Cycle Assessment (LCA). *Constr. Build. Mater.* **2016**, *125*, 1142–1151. [[CrossRef](#)]

51. Electrotechnical, C.I. IEC 62717: 2014; IEC 62722-1: 2014; IEC 62722-2-1: 2014. Available online: <https://webstore.iec.ch/publication/7397> (accessed on 22 October 2019).
52. UNE-EN. UNE-EN 13032-4:2016. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0057192> (accessed on 22 October 2019).
53. British Standards Institution (BSI). *Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework*; ISO 14040:2006; BSI: London, UK, 2006.
54. Fraile-García, E.; Ferreiro-Cabello, J.; López-Ochoa, L.M.; López-González, L.M. Study of the technical feasibility of increasing the amount of recycled concrete waste used in ready-mix concrete production. *Materials* **2017**, *10*, 817. [CrossRef] [PubMed]
55. Laso, J.; García-Herrero, I.; Margallo, M.; Vázquez-Rowe, I.; Fullana, P.; Bala, A.; Gazulla, C.; Irabien, Á.; Aldaco, R. Finding an economic and environmental balance in value chains based on circular economy thinking: An eco-efficiency methodology applied to the fish canning industry. *Resour. Conserv. Recycl.* **2018**, *133*, 428–437. [CrossRef]
56. Goedkoop, M.; Oele, M.; Leijting, J.; Ponsioen, E.M.T. *Introduction to LCA with SimaPro*; Version 7; PRé Consultants: Amersfoort, The Netherlands, 2010.
57. Pieragostini, C.; Mussati, M.C.; Aguirre, P. On process optimization considering LCA methodology. *J. Environ. Manag.* **2012**, *96*, 43–54. [CrossRef] [PubMed]
58. Pons, J.J.; Penadés-Plà, V.; Yepes, V.; Martí, J.V. Life cycle assessment of earth-retaining walls: An environmental comparison. *J. Clean. Prod.* **2018**, *192*, 411–420. [CrossRef]
59. Jolliet, O.; Margni, M.; Charles, R.; Humbert, S.; Payet, J.; Rebitzer, G.; Rosenbaum, R. Impact 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2003**, *8*, 324. [CrossRef]
60. Abin, R.; Laca, A.; Laca, A.; Díaz, M. Environmental assessment of intensive egg production: A Spanish case study. *J. Clean. Prod.* **2018**, *179*, 160–168. [CrossRef]
61. Huijbregts, M.A.; Steinmann, Z.J.; Elshout, P.M.; Stam, G.; Verones, E.; Vieira, M.; Zijp, M.; Hollander, A.; van Zelm, R. ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2017**, *2*, 138–147.
62. Dong, Y.H.; Ng, S.T. Comparing the midpoint and endpoint approaches based on ReCiPe - A study of commercial buildings in Hong Kong. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2014**, *19*, 1409–1423. [CrossRef]
63. De Almeida Filho, A.T.; Clemente, T.R.N.; Morais, D.C.; De Almeida, A.T. Preference modeling experiments with surrogate weighting procedures for the Promethee method. *Eur. J. Oper. Res.* **2018**, *264*, 453–461. [CrossRef]
64. Sergio Barba-Romero, J.-C.P. *Multicriteria Decisions Theoretical Foundations and Practical Use*; Alcalá de Henar; Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alcalá: Madrid, Spain, 1997; ISBN 978-84-8138-180-1.
65. Mladineo, N.; Lozić, I.; Stojić, S.; Mlinarić, D.; Radica, T. An evaluation of multicriteria analysis for DSS in public policy decision. *Eur. J. Oper. Res.* **1992**, *61*, 219–229. [CrossRef]
66. Promethee, V. 64. Visual Promethee 1.4 Academic Edition Documentation. Available online: <http://www.promethee-gaia.net/softwam.htm> (accessed on 22 October 2019).
67. De Brucker, K.; MacHaris, C.; Verbeke, A. Multi-criteria analysis and the resolution of sustainable development dilemmas: A stakeholder management approach. *Eur. J. Oper. Res.* **2013**, *224*, 122–131. [CrossRef]
68. Akgün, A.A.; Van Leeuwen, E.; Nijkamp, P. A multi-actor multi-criteria scenario analysis of regional sustainable resource policy. *Ecol. Econ.* **2012**, *78*, 19–28. [CrossRef]
69. Spain Ministerio de Hacienda. *Govern of Spain. RGLCAP-Royal Decree 1098/2001, of October 12, which Approves the General Regulations of the Law of Contracts of Public Administrations*; Spain Ministerio de Hacienda: Madrid, Spain, 2001; p. 111.
70. De Sa Pereira, D.; Monkman, A.P.; Data, P. Production and characterization of vacuum deposited organic light emitting diodes. *J. Vis. Exp.* **2018**, *2018*, 1–6. [CrossRef] [PubMed]
71. Vybornyi, O.; Findlay, N.J.; Skabara, P.J. Scale-up chemical synthesis of thermally-activated delayed fluorescence emitters based on the dibenzothioephene-S,S-dioxide core. *J. Vis. Exp.* **2017**, *2017*, 3–7. [CrossRef]
72. Mewes, J. Modeling TADF in organic emitters requires a careful consideration of the environment and going beyond the Franck-Condon approximation. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2018**, *20*, 12454–12469. [CrossRef]
73. Panizio, R.M.; Brito, P.L.F.C.; Calado, O.; Alves, S.M.S. Effect of the incorporation of biomass in the carbonization of waste electrical and electronic equipment. In Proceedings of the Bioenergy International Conference, Portalegre, Portugal, 11–13 September 2019; p. 23.

74. Ahmaruzzaman, M. Proximate analyses and predicting HHV of chars obtained from cocracking of petroleum vacuum residue with coal, plastics and biomass. *Bioresour. Technol.* **2008**, *99*, 5043–5050. [CrossRef]
75. Luz, F.C.; Rocha, M.H.; Lora, E.E.S.; Venturini, O.J.; Andrade, R.V.; Leme, M.M.V.; Del Olmo, O.A. Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil. *Energy Convers. Manag.* **2015**, *103*, 321–337. [CrossRef]
76. Prasertcharoensuk, P.; Hernandez, D.A.; Bull, S.J.; Phan, A.N. Optimisation of a throat downdraft gasifier for hydrogen production. *Biomass Bioenergy* **2018**, *116*, 216–226. [CrossRef]
77. Cirocka, A.; Zarzeckańska, D.; Wcisło, A.; Ryl, J.; Bogdanowicz, R.; Finke, B.; Ossowski, T. Tuning of the electrochemical properties of transparent fluorine-doped tin oxide electrodes by microwave pulsed-plasma polymerized allylamine. *Electrochim. Acta* **2019**, *313*, 432–440. [CrossRef]
78. Lin, J.Y.; Raharjo, A.; Hsu, L.H.; Shah, Y.J.; Huang, Y.H. Electrocoagulation of tetrafluoroborate (BF<sub>4</sub><sup>-</sup>) and the derived boron and fluorine using aluminum electrodes. *Water Res.* **2019**, *155*, 362–371. [CrossRef] [PubMed]



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### 7.3. Artículos en trámite de publicación.

#### 7.3.1. Aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) a un sistema de caldera de Pellets en un edificio terciario.

Article

### Life Cycle Assessment (LCA) methodology of pellets boiler application to a tertiary building to renewable energy contribution.

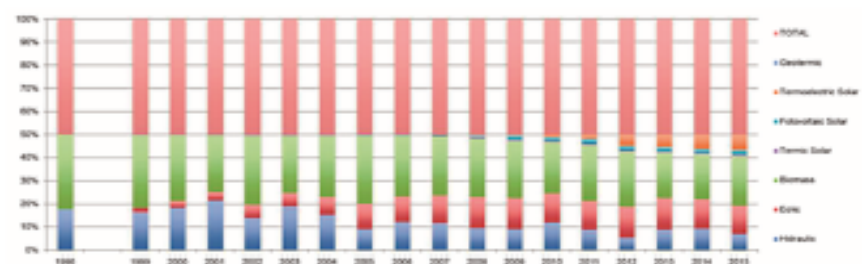
**Abstract:** Traditionally buildings, public and private, residential or industrial, are the most responsible for the consumption of materials and energy. This leads to a long list of impacts and emissions to the environment, which is very bad, very negative for life. The construction of public buildings is responsible for 40% to 45% of primary energy consumption in Europe. And the most important aspect of these buildings is the manufacture and use of energy generation systems for the well-being of their occupants. The energy production facilities that are designed and installed in tertiary buildings are of great importance in global energy consumption. In an area such as the services sector, which is one of the main drivers of a country's economy, it is essential to establish guidelines for energy savings and efficiency. Several studies have been carried out on new ways to take advantage of waste from agricultural activities, for sectors such as energy generation. Within this field we can find biological products as the raw material for other processes. But this does not guarantee that they are more efficient or more sustainable. With the present study and the support in the methodology of life cycle analysis (LCA), we can determine and justify the environmental impacts that occur throughout all stages of the life cycle of a biomass boiler system fed by Pellets, with the main objective of performing the analysis of the results, to reduce them. The data has been introduced in the software Simapro 8.3 and for the most advanced study and credibility a comparison between the EPS 2000 method and the Impact 2002+ method has been made. The results of the LCA study show that the pellet boiler system is favourable in some indicators, from the environmental point of view. On the other hand, there is a need to develop new designs to improve important aspects such as the depletion of resources, which needs an alternative approach. In spite of being a system considered as renewable, it was confirmed the need to improve its efficiency and sustainability, reducing the environmental impact.

**Keywords:** Life-cycle analysis (LCA); Pellets boiler; sustainability; renewable; energy system;

#### 1. Introduction

The buildings throughout their life cycle are responsible for almost half of the consumption of raw materials, as well as half of the consumption of energy consumed throughout the planet. They are in consequence the world's largest extraction and generation of resources sector [1] [2] [3]. Renewable energies already play a role of national and international importance as a result of the need to replace traditional energy sources and to fulfil the commitments endorsed as part of the Renewable energies are beginning to assume a prominent role at the national and international level, given the need to look for new technologies that replace traditional sources, as can be seen in Figure 1.

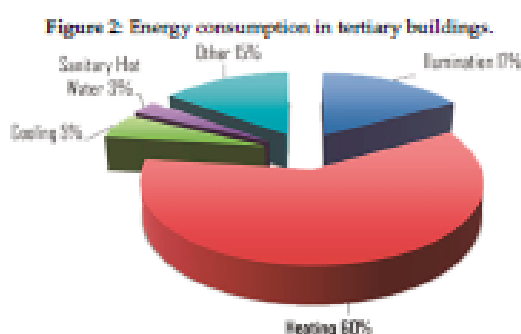
Figure 1: Evolution of the consumption of Renewable Energies in Spain.



According to this, in Spain there has been a diversification in the generation of renewable energies, starting from 57% generated by biomass to a more balanced distribution, towards wind and geothermal energy.

Despite this, biomass marks the production ceiling and remains the one with the highest proportion of consumption available, including the energy generated by urban solid waste, biogas and biofuels [5].

Encouraged by a weak international agreement, such as the Kyoto Protocol, and the challenges demanded, these renewable sources have undergone a boost. Climate change is becoming more and more obvious and despite this, it is almost impossible to reach the agreements known as 20-20-20 and that so much hope produced in their day. [4] If we focus on buildings, they are public buildings and the highest percentages of consumption. Using the data provided by the Institute for the Diversification and Saving of Energy (IDAE) [5] we can conclude that conditioning of the buildings comes to suppose a high percentage of the consumptions becoming the greater energetic cost the produced by the systems of heat production with 60% with respect to the total, as described in Figure 2. To focus our efforts when applying measures to reduce the environmental impact of energy production systems, we must conduct a study of the energy consumption we have in tertiary buildings. There has been an increase of 2.5% in the primary consumption of renewable energies, with respect to the decade of the 90s, with a clear upward trend in the associated resources. In Spain public buildings are responsible of 60 % energy consumption of total.



Short supply routes in biofuels are short benefits in proximity to places of consumption and in energy production. From an environmental point of view, it is advantageous, since it reduces emissions. From an economic point of view, the number of people or companies that increase the cost is reduced, and it brings greater equality and profitability to the producers, and lastly socially, it is necessary to highlight the creation of locally created jobs. [6]. Focusing on our study, the use of biomass as a resource has some environmental advantages, such as the reduction of Sulfur and particulate emissions, the reduction of emissions such as CO<sub>2</sub>, HC and NO<sub>x</sub>, the non-contribution to the greenhouse effect of the reduction of dangers derived from the escape of toxic gases, and some others. But we do not know the impacts generated to the environment that are generated during the entire life cycle of systems that use this biomass as fuel for energy production.

The pelletizing processes by which a mechanical densification of the raw lignocellulosic resources are generated, allow these to be transformed, obtaining a uniform biofuel that has superior calorific properties necessary for combustion. In addition to improved performance in the rest of its life cycle: handling, transport, storage and use [7].

Currently, forest resources such as trunks and branches of tree pruning, form the bulk of the biomass generation for the manufacture of pellets. Within these resources, there is a wide variety of species such as pine, poplar, eucalyptus, oak beech or poplar, and agriculture or the remains of industrial activities, such as sawdust left over in the processing of wood [8]. In our study, the origin of this waste is very focused on a very local activity such as olive harvesting. This activity generates waste, both in the remains of the olive tree and in the residues of the olive stone. This is an important point to take into account, especially in the transport of such raw material to the point of consumption and that will affect the impacts generated with respect to other energy generation systems.

The new models of Sustainable Circular Economy are based on the improvement of industrial activities through the use of local, traditional and sustainable resources. Looking for a lower environmental impact throughout its life cycle, as is the case of the fuel used in the system studied. In this sense, there are already numerous studies carried out applying the LCA methodology for pellets [9] [10]. In our study, we incorporated the local conditions, manufacturing, transport, use and waste in our own LCA, to determine the environmental impacts caused by wood pellet and it is in this sense that the main objective of this

work, which consists of quantifying the environmental behaviour through the LCA, of a heat production system by means of a boiler using wood granules and installed in a tertiary building, is developed.

## 2. Materials and Methods

The use of biomass instead of fossil fuels for heating contributes to the reduction of CO<sub>2</sub> emissions, since the CO<sub>2</sub> throughout the life cycle of the boiler is negligible with respect to the CO<sub>2</sub> emissions produced by the fuel boilers fossils. The support of European policies towards the use of renewable energies is causing an increase in the consumption of biomass of all types for heating. But this does not mean that they stop emitting substances harmful to the environment. There are numerous other environmental aspects that must be considered when designing, planning or installing an energy production system.

This study intends to perform an LCA, and to determine all the environmental impacts caused by a system of heat production used in a tertiary building, to later analyze in which phases the greatest and most negative impacts are derived with the ultimate goal of being able to reduce them. The system studied is located at the University of Jaén, and the products and resources, such as the pellets, come from the nearby geographical area. The data have been contrasted with other similar studies and have been updated with the data of local industrial activities.

It is necessary, therefore, that LCA studies determine the environmental impacts in any phase of the life cycle of the product, service or process, taking into account that some phases may affect others, independently of the fact that it can also be determined the impact in a specific phase. Obtaining in this way the necessary information that allows us to carry out actions that reduce the negative impacts to the environment [11].

### 2.1. Life-cycle analysis (LCA)

The life cycle analysis was carried out using the ISO 14040 standards defining the principles and framework, and according to ISO 14044 describing the different stages of the analysis [12-13].

Table 1. ISO 14040. Recourse AENOR.es

| Standard          | Description   | Edition |
|-------------------|---|---------|
| ISO 14040:2006    | Environmental management. Life Cycle Assessment. Principles and framework.  | 2006    |
| ISO 14044:2006    | Environmental management. Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines.   | 2006    |
| ISO/TR 14047:2012 | Environmental management. Life Cycle Assessment. Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations. | 2006    |

#### 2.1.1. Definition of objective and scope

For the evaluation of the life cycle the system was decomposed into two subsystems, one the process of obtaining raw materials, processing, production and transport of the pellets and on the other hand the analysis of the life cycle of the boiler system. Once the data of the inventory of all the relevant components were obtained, they were introduced in the Simapro program to analyze and compare the environmental impact by means of two methods. These methods are the EPS 2000 and Impact 2002+.

In order to build the inventory of production and establish the scope of the study, the functional unit is defined as the production of 1 ud. Pellets boiler system.

The LCA methodology allows the determination of the environmental impact of the processes, products or systems analysed in different ways. That is, you can analyse certain stages of the life cycle, or analyse the entire cycle. The present investigation determinate the impact associated with the production of this system, thus performing the "cradle to grave" studies.

The system studied uses raw materials and quantities that we have determined from the bibliography and takes into account the energy consumed throughout the life cycle of the components, as well as transport to the place of installation. To overcome some potential limitations, the initial hypotheses are defined as follows:

- The electricity used considers that the production mix corresponds to the Spanish system of energy production.
- The cleaning of the different devices used in the process is discarded, since it is not a considerable percentage.
- The transport of material has been considered. For each component material from the point of processing or extraction of the quarry to the University of Jaén, for calculation purposes.

The evaluation of the impact of the life cycle of the system was carried out using the LCA SimaPro software 8.30 [14], which is widely used [15].

### 2.1.2. Equipment

The biomass boiler selected has the following characteristics, according to the thermal requirements demanded by four classrooms of 93.90 m<sup>2</sup> located in a building of the University of Jaén. The analysis was made to a biomass boiler of Pellets of the brand DOMUSA, model BioClass HM, composed of a main body, where the burner, the expansion vessel, the recirculation pump, an accumulator for hot water and a fuel storage silo. The technical specifications of these components are those shown in Table 2.

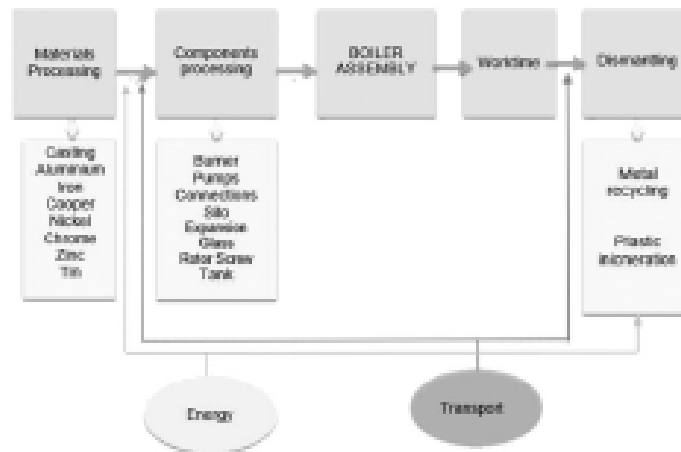
Table 2. Technical specifications of the biomass boiler. [16]

|                      | Modelo | BioClass HM |
|----------------------|--------|-------------|
| Useful power         | Kw     | 91,4        |
| Nominal power        | Kw     | 25,3        |
| Performance          | %      | 95          |
| Power partial load   | Kw     | 6,9         |
| Electric power       | W      | 485         |
| Minimum return       | °C     | 25          |
| Minimum chimney shot | Pa     | 10          |
| Minimum chimney shot | Pa     | 20          |
| Water chamber volume | L      | 73          |
| Fuel 100%            | Kg     | 5           |
| Pellet fuel capacity | Kg     | 180         |
| Weight               | Kg     | 300         |

### Life-cycle inventory

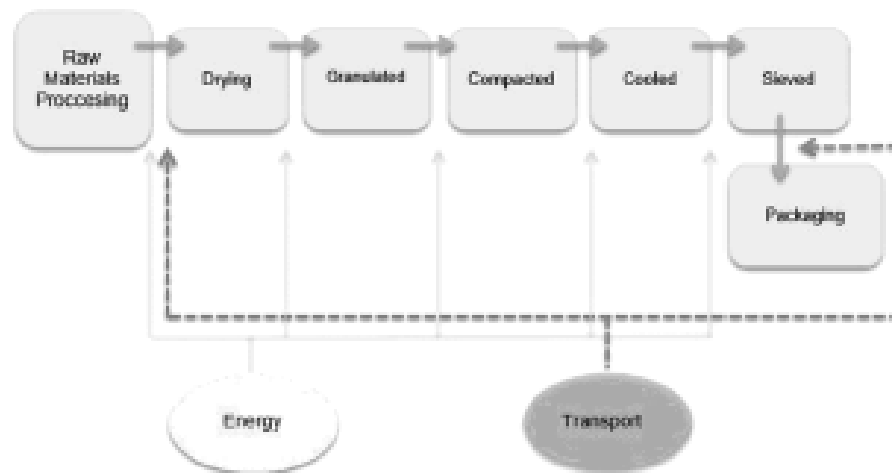
To understand in a simple way the life cycle of the biomass boiler, we have made the following representative diagram, as shown in Figure 3. Here you can see the material and energy flows that are usually needed for this type of systems. The data for the realization of the inventory were obtained from the corresponding catalogs of the manufacturing company, and adapted to the units and characteristics of the database used. Likewise, for the calculation of distances for the transport of the apparatuses already manufactured, it has been considered that the factory is in Errezil (Guipúzcoa) Spain, which have been transported by truck by road, with a load of 100% of its capacity and that for its assembly in the building, the distribution has been made by van, with a load of 80% of the capacity of the vehicle.

Figure 3: Life cycle of boiler. (Own preparation).



Within the life cycle of the process, and in its use stage, the life cycle of pellets as fuel used by the system is described in figure 3.

Figure 4: Life cycle of pellets. (Own preparation).



Below we describe the most significant parts and materials of which the system studied is composed, expressing the quantities of each element and the whole of the set, as we can see in Table 3. These data have been obtained from the information provided by the manufacturer, by estimating the consumption during its life cycle and the databases of the Simapro software. In this way we obtain all the necessary data that we will need for the subsequent introduction in the calculation software.

**Table 3. Inventory of the biomass boiler system.**

| Inventory                         |                       |                 |               |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------|---------------|
| Concept                           | Boiler + Accumulator  | Silo            | TOTAL         |
| <b>RAW MATERIALS (kg)</b>         |                       |                 |               |
|                                   | <b>BIOCLASS NG 25</b> | <b>tipo S</b>   |               |
| Dimensions                        | 670 x 670 x 120       | 405 x 665 x 625 |               |
| Iron                              | 140.4                 | 68.93           | 209.33        |
| Aluminium                         | 72.88                 | 5.39            | 78.27         |
| Copper                            | 30.8                  | 16.72           | 47.52         |
| Niquel                            | 0.88                  |                 | 0.88          |
| Chrome                            | 10.24                 |                 | 10.24         |
| Polyethylene                      | 8.43                  | 2.1             | 10.53         |
| Zinc                              | 5.85                  |                 | 5.85          |
| Tin                               | 3.44                  | 2.68            | 6.12          |
| Lead                              | 1.47                  |                 | 1.47          |
| PVC                               | 0.99                  |                 | 0.99          |
| Rubber                            | 0.87                  | 0.43            | 1.3           |
| <b>Total</b>                      | <b>300</b>            | <b>94.67</b>    | <b>394.67</b> |
| <b>Energy</b>                     |                       |                 |               |
|                                   |                       |                 | <b>MJ</b>     |
| D1 (Boiler, 1MW)                  | 2,045.35              | 830.52          | 2,875.87      |
| Industrial Natural gas (>100 kW)  | 1,850.07              | 875.55          | 2,725.62      |
| Medium Voltage Electricity        | 242.2                 | 55.98           | 298.18        |
| <b>Transport</b>                  |                       |                 |               |
|                                   |                       |                 | <b>tKm*</b>   |
| Truck (40 t)                      | 25.9                  | 2.25            | 28.15         |
| Van (<3.5 t)                      | 32.75                 | 3.1             | 35.85         |
| Train                             |                       |                 |               |
| <b>Waste (public incinerator)</b> |                       |                 |               |
|                                   |                       |                 | <b>KG</b>     |
| Polypropylene                     | 7.84                  | 1.92            | 9.76          |
| PVC (Polychloride)                | 0.92                  |                 | 0.92          |
| Rubber                            | 0.85                  | 0.29            | 1.14          |
| <b>Atmosphere emissions</b>       |                       |                 |               |
|                                   |                       |                 | <b>MJ</b>     |
| Residual Heat                     | 724.05                | 87.9            | 811.95        |

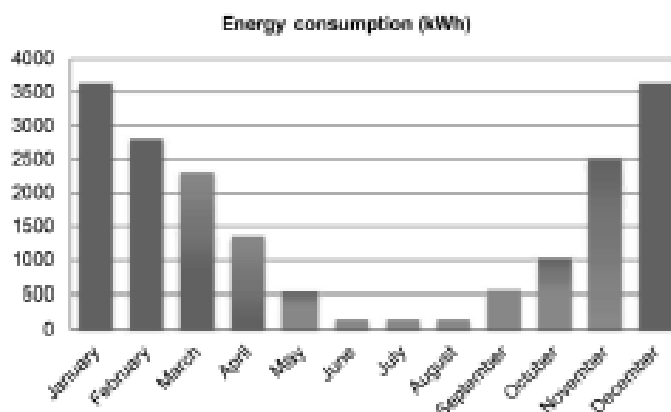
tKm \*. This unit is transporting 1 ton of material in 1 km.

For the calculation of transport, the factory in Gaipúzcoa has been considered. Spain

#### 2.1.4. Annual energy consumption

To calculate the annual energy consumption, the following limits have been considered: the operating temperature selected for the interior of tertiary buildings is 22°C in winter and 24°C in summer, considering the Spanish regulations on the design of thermal machines [17]. The work schedule (teaching rooms), is from 09.00 h to 20.00 h. The calculation of the school days is developed as follows: 2 semesters of 22 days / month, we obtain a use of 176 days. So the total working hours of the system is 3,096 hours / year. Considering a life expectancy of the Pellets Caldera for 10 years, we obtain a total of 19,360 hours. Therefore, the energy consumption in this period would be 115,772.80 kW, or what is the same, 0.4167 TJ.

**Figure 4: Seasonality of consumption (Own preparation).**



### 2.1.5 Impact evaluation

To compare the results obtained using two methods of analysis, will be one of the objectives of our work. The first method will be the EPS 2000 method (Environmental Priority Strategies) [18, 19], which is oriented towards the sustainable development of products [33]. This method evaluates the damage caused in four impact categories and 13 mid-point categories whose characteristics are described in Table 4 [20, 21, 22, 23, 24].

Table 4. Indicators of impacts according to EPS 2000 v2.08.

| Impact category               | Category indicator  | Measurement units           |
|-------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Human health                  | DALY**              | People / year               |
| Ecosystem Production capacity | FDP*                | FDP / m <sup>2</sup> x year |
| Abiotic stock recourses       | Exhaustion          | Kg                          |
| Biodiversity                  | Damage to resources | Mj/Kg                       |

\* Fraction of potential disappearance of the ecosystem per m<sup>2</sup> and year.

\*\* Disability-adjusted life year: Reduction of years of life per person / year

The second method of analysis, the Impact 2002+ method, proposes a feasible implementation of a combined midpoint / damage approach, linking all types of life cycle inventory, whose characteristics are described in Table 5 [25,26] and considers four endpoint categories (quality of three ecosystems, human health, natural resources and abiotic resources) and in addition to 15 mid-point categories with a focus on providing characterization factors that are representative on the global scale in line with the global nature of the life of many products. Impact 2002+ provides a state-of-the-art method to convert life cycle inventories to a limited number of life cycle impact scores on midpoint and endpoint level. [27]

Table 5. Indicators of impacts according to Impact 2002+.

| Impact category          | Category indicator  | Measurement units           |
|--------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Quality of the ecosystem | FDP*                | FDP / m <sup>2</sup> x year |
| Human health             | DALY**              | People / year               |
| Natural resources        | Damage to resources | Mj/Kg                       |
| Abiotic resources ***    | Exhaustion          | Kg                          |

\* Fraction of potential disappearance of the ecosystem per m<sup>2</sup> and year.

\*\* Disability-adjusted life year: Reduction of years of life per person / year

\*\*\* Climatic, geological and geographical resources. Biodiversity

By making an analysis in the scientific literature between the different existing LCIA software tools, we have selected the Simapro 8.30 software. With the data previously provided, an evaluation of the environmental impact of the samples is carried out. We will carry out a comparative study using two evaluation methods to check for possible deviation in the results.

The following describes the results of each of the methods examined, the categories of impact included in the study, the impacts and effects of pellet boiler recycling at the end of their useful lives and a sensitivity analysis for the case in question to determine the impact of variations in the parameters used.

### 3. Results.

Through table 6 we can see how each method used provides different impact categories, because not all analysis tools use the same categories. To perform the analysis using both methods, so we used the weighting and the single score. For the sake of readability, this document uses abbreviations for see the impact categories examined. The table shows the total names of the various impact categories together with the units and the total of the values obtained in which they are measured. To facilitate the presentation of

the data, the units of measurement for the various impact categories are omitted in the rest of the tables on paper.

Table 6. Name of impacts categories, units and measurement.

| EPS 2000                    |          |              | IMPACT 2002+            |               |             |
|-----------------------------|----------|--------------|-------------------------|---------------|-------------|
| Impact category             | Unit     | Total        | Impact category         | Unit          | Total       |
| Life expectancy             | PersonYr | 0.00040035   | Carcinogens             | kg C2H3Cl eq  | 0.015460616 |
| Severe morbidity            | PersonYr | 5.94757E-05  | Non-carcinogens         | kg C2H3Cl eq  | 0.04889066  |
| Morbidity                   | PersonYr | 0.0001835    | Respiratory inorganics  | kg PM2.5 eq   | 0.012538074 |
| Severe nuisance             | PersonYr | 4.88899E-07  | Ionizing radiation      | Bq C-14 eq    | 49.96762015 |
| Nuisance                    | PersonYr | 0.000536775  | Ozone layer depletion   | kg CFC-II eq  | 4.48257E-07 |
| Crop growth capacity        | kg       | 0.24846371   | Respiratory organics    | kg C2H4 eq    | 0.018218691 |
| Wood growth capacity        | kg       | -6.596902865 | Aquatic ecotoxicity     | kg TEG water  | 39.0761122  |
| Fish and most production    | kg       | -0.001891946 | Terrestrial ecotoxicity | kg TEG soil   | 40.016283   |
| Soil acidification          | H+ eq    | 0.157750703  | Terrestrial acid/nutri  | kg SO2 eq     | 0.316355596 |
| Prod. cap. irrigation Water | kg       | 0            | Land occupation         | m2org. arable | 0           |
| Prod. cap. drinking water   | kg       | 0            | Aquatic acidification   | kg SO2 eq     | 0.099982538 |
| Depletion of reserves       | ELU      | 74.09406877  | Aquatic eutrophication  | kg PO4 P-lim  | 0.002396149 |
| Species extinction          | NEX      | 2.1881E-12   | Global warming          | kg CO2 eq     | 161.249185  |
|                             |          |              | Non-renewable energy    | NJ primary    | 2697.290044 |
|                             |          |              | Mineral extraction      | NJ surplus    | 0.755345297 |

Once the inventory data has been entered, the program provides us with the results shown in Table 7, where we can analyze the contribution percentages contributed by the different parts of the pellet boiler system to each category of impact. These data have been provided by the program, based on the calculation of the annual energy consumption produced by the system throughout the estimated useful life of the system.

Table 7. Life cycle analysis of the heat pump using TJ as a reference unit.

| Nonrenewable resources |          | Energetic resources         |          |
|------------------------|----------|-----------------------------|----------|
| Baryte (g)             | 32.6     | Wood (g)                    | 3.9      |
| Bauxite (kg)           | 109      | Water energy (MJ)           | 1.19     |
| Calcite (g)            | 0.04     | Lignite (kg)                | 12.7     |
| Cr (g)                 | 188      | Natural Gas (MJ)            | 48.1     |
| Mn (g)                 | 0.78     | Petroleum (kg)              | 33.6     |
| Mg (kg)                | 1.78     | Uranium (g)                 | 0.0008   |
| Zinc (g)               | 0.68     |                             |          |
| Sn (mg)                | 7.32     |                             |          |
| Emissions to the water |          | Emissions to the Atmosphere |          |
| Sulphates (mg)         | 625      | CO <sub>2</sub> (kg)        | 67.93    |
| MP <sub>5</sub> (kg)   | 27.01    | SO <sub>2</sub> (kg)        | 23.4     |
| Fats and Oils (kg)     | 0.0405   | CH <sub>4</sub> (kg)        | 0.44     |
| Al (g)                 | 6.26     | CFC (g)                     | 3.9      |
| Ba (mg)                | 360      | Particulates (kg)           | 644.13   |
| Pb (mg)                | 18.3     | Cd (kg)                     | 1.54     |
| Ca (g)                 | 0.0007   | Pb (kg)                     | 298      |
| Cr(VI) (kg)            | 2.28     | Other metals (kg)           | 12.8     |
| K (mg)                 | 1.31     | Waste Heat (MJ)             | 1.205.06 |
| Na (kg)                | 3.72     |                             |          |
| Waste/heat (MJ)        | 2.368.76 |                             |          |

### 3.1. Method EPS 2000

From the graphs obtained, we can analyze the impacts produced by each part of the pellet boiler system, which are shown in Figure 6 below:

Figure 5 compares the general results of environmental impact for the pellet boiler, in which we can observe how the most important aspect is produced in the consumption of resources and in human health. These

are the results of the weighting phase of each LCA. No results are shown for the various normalizations and weights phases because not all LCAs examined include such phases.

Figure 5. Weighting of impact according to EPS 2000 Method

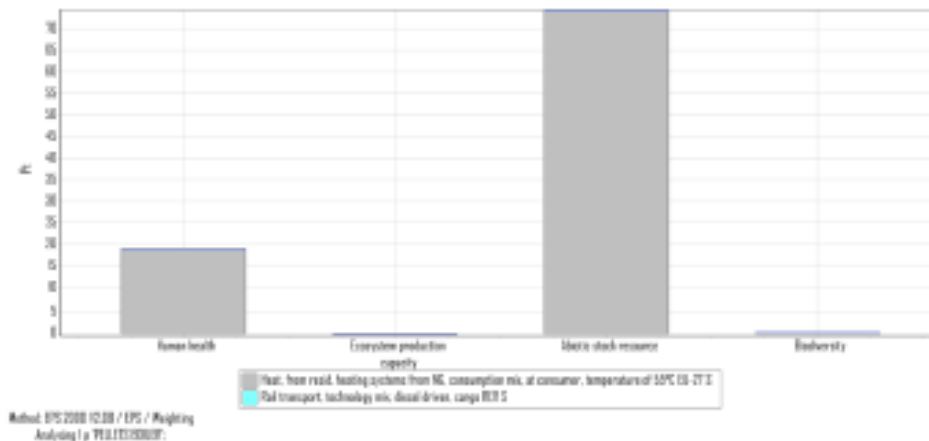
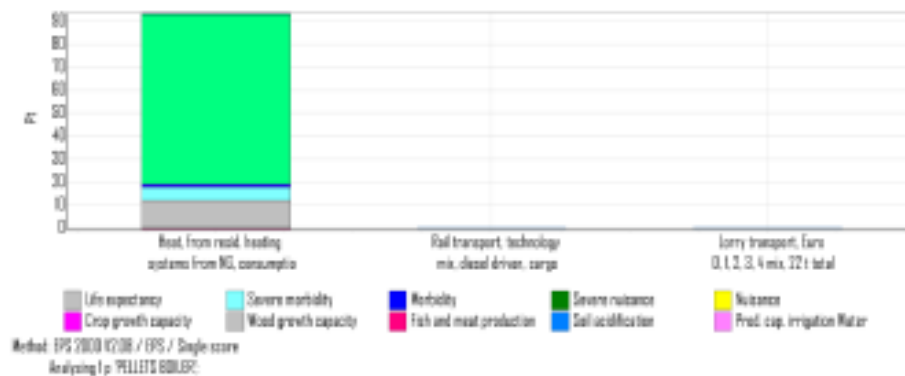
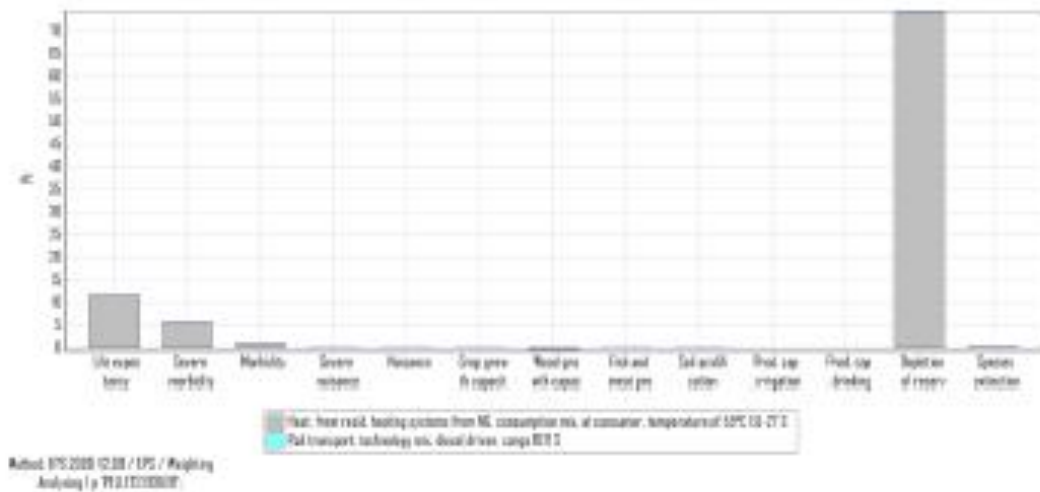


Figure 6 shows an analysis of the single score using the EPS 2000 method, we can see that the greatest impacts occur in the manufacturing phase, due to all the energy required to obtain the raw material. Compared to transport, this aspect represents a high percentage, being very low in the other areas. It is interesting to observe how the data reflect the impacts on resources and on human health, with life expectancy and severe nuisance being the two aspects of greatest impact.

Figure 6. Single score indicators of the Pellet boiler according to EPS 2000 method



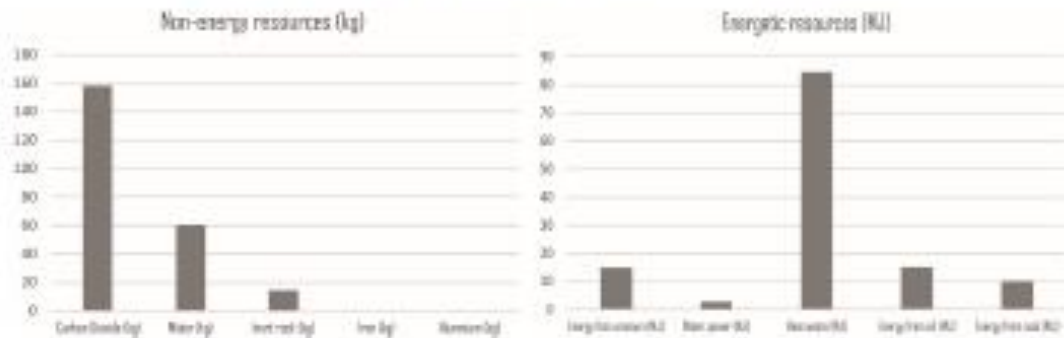
In this graph we can see how the most important impact occurs on the depletion of resources, motivated by the manufacture of copper elements that make up the boiler system, both in the emitting elements and in the elements that make up the circuit distribution. In the same way other elements of the system also influence to a lesser extent the depletion of resources. Making a study according to the categories, the EPS 2000 method shows us that during the manufacture of the pellet boiler, the depletion of resources is 94% of the total contribution. Likewise, the impact on life expectancy (Human Health) is also significant, which is 4%, mainly generated by CO<sub>2</sub> emissions during the generation stage of electricity for manufacturing, while the remaining percentage 2 % corresponds to the impact on ecosystems.



### 3.2. Method Impact 2002+

Once the inventory data has been entered using the second method, Impact 2002+, provides the results shown in Table 08 and Figure 08, where the contribution provided by the system boiler where it can be analyzed in each impact category. Impact 2002+ was used to calculate GHG emissions and energy depletion. The primary objective of the impact assessment stage is to transform the long list of Life Cycle Inventory results into a limited number of indicator scores. These indicator scores express the relative severity on an environmental impact category.

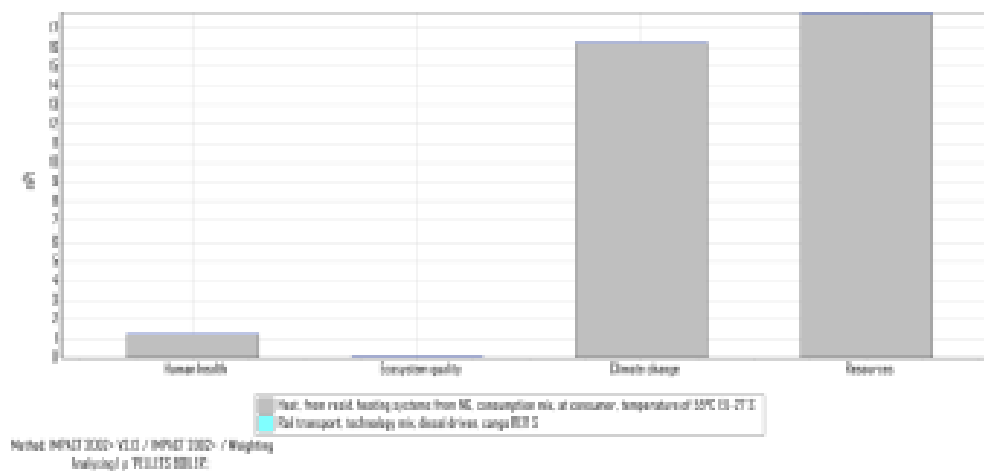
Table 8. Analysis of the energy and non-energy resources of the pellets boiler



As a verification of the results, we use another method of analysis. Through the analysis with the Impact 2002+ method, we obtain results that, as we can see in Figure 8, have a higher% in climate change and the reduction of resources. This is due to the fact that the consumption of electricity takes greater importance in this method, as well as with the resources, so they are affected in the final result. This shows us that the analysis shows similar results, which allows us to think of solutions to mitigate, reduce or eliminate the most relevant impacts.

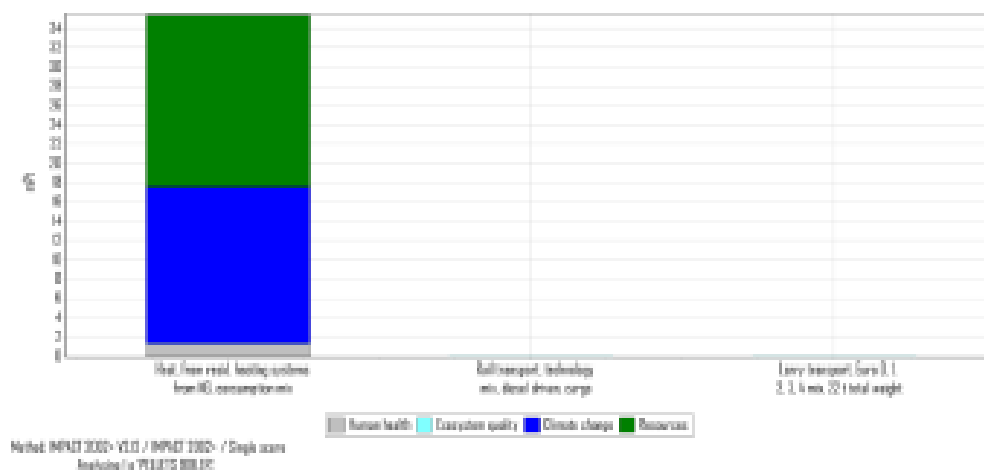
A point where the two methods agree is that there is no impact on the quality of the ecosystems. This is because the consumption of pellets coming from biological resources is considered as renewable energy, since it regenerates with time.

Figure 8. Weighting of impact according to Impact 2002+ Method



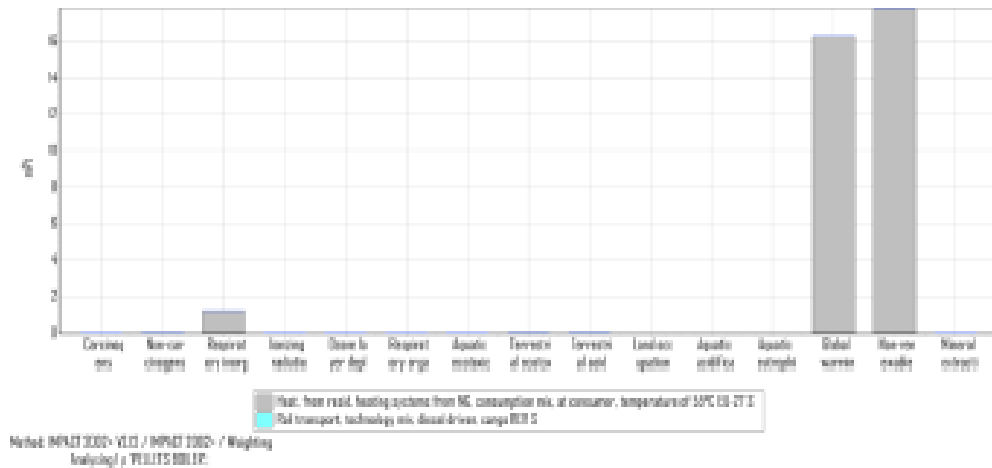
We include the single score of the analyzed method, where it reflects that the two aspects of greatest impact are produced in the phase of extraction and manufacture of the elements. The mix of energy necessary for processing increases the score with respect to the other aspects, as can be seen in Figure 9.

Figure 9. Single score of the Pellet boiler according Impact 2002+ Method



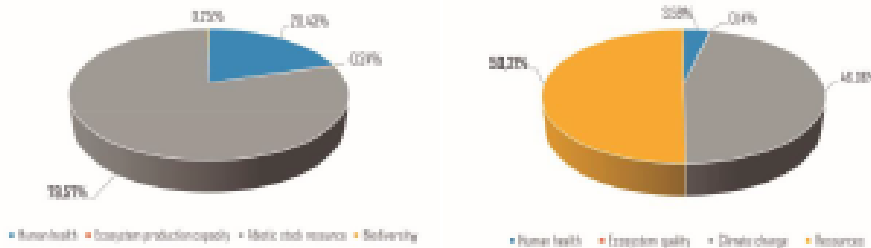
The information obtained from the software, has been treated in built-in, through fifteen indicators, with the quantities of different processes and raw materials [27]. Making a deeper study and weighting data, we see in Figure 10, how global warming and non-renewable resources are the two negative aspects that most highlight the pellet boiler system. In a residual way, the elements that are emitted to the environment constitute the main factor that collects the impacts on human health.

Other aspects that affect the quality of ecosystems are, in this case, residual, so they do not affect the general results obtained.



When performing a cleaner system analysis, we perform a conversion with the individual scores. In this way it is easy to determine the percentages that are produced for each impact and in which each method has the four aspects that are considered with the EPS 2000 method and the Impact 2002+. Figure 12. Percentage damage category to EPS 2000 Method.

Figure 11. % according method EPS 2000 and Impact 2002+ categories



#### 4. Discussion

In general, we can consider that the called systems renewable, do not cause impacts or are minor, but it is true that they can be reduced. For this, it is necessary to resort to the realization of complete LCA, with which all phases of the life cycle are analyzed [34]. For users who lack LCA experience or with little knowledge of LCA, it is possible that some software, perform shallow analysis or simply that the user does not finish with an adequate analysis of the results and only intend to generate an environmental impact report. This can be an attractive option, since it is fast and requires relatively little investment. However, it is important to realize that different methods selected for the examination. It can lead to different results. This is evidenced by the results obtained in this document for a case study involving a pellet boiler and two methods of analysis.

#### 5. Conclusions

In this research, the environmental of a pellet boiler system has been studied using life cycle analysis, as an alternative to other system of heat production in buildings. In addition, the results have been verified using two different methods. The study focuses on the environmental impact of Life Cycle Analysis through EPS 2000 characterization method and the Impact 2002+ method.

In general, we can agree that the use of LCA as a methodology to determine the impacts produced during the life cycle of the products, processes or systems analyzed, is satisfactory and provides us with information necessary for decision making. Also, the use of agricultural residues can be an environmental

and economic benefit, since it allows the use as raw material of some products that are currently considered as waste.

Specifically, the analysis of the results obtained indicates that the main impact of a pellet boiler system located in a tertiary building occurs during its manufacturing stage, and that it affects the depletion of resources. This indicates that the choice of materials with which the components are manufactured and the energy efficiency of the building are essential if we intend to reduce the impact they produce on the environment. Likewise, the choice decision on the life expectancy of the system are extremely important. To complete the analysis of the results, a comparison will be made between two heat production systems, which will allow us to detect the divergent points between one system and another. The two most important impacts to be reduced are the emission of CO<sub>2</sub> and methane into the atmosphere, that is, the reduction of the ozone layer is avoided. With damage assessment, we obtain data on the improvement in the quality of ecosystems, which is quite significant, and with the improvement of climate change.

Thus, according to the results obtained and taking into account both the general sustainable development and the regulations on energy efficiency [28, 29], it is deduced that it is necessary to develop new designs and new materials using by-products or residues that facilitate their incorporation into the cycle of industrial life, since it would constitute a reduction of emissions and a reduction of energy and resources. The use of materials located close to production centers of low cost and plant origin, and their reincorporation to manufacturing processes through the use of waste, in a circular economy environment, could in the future become an opportunity for improvement and sustainable development.

No significant differences are found in the results of the two methods, being in the section of Exhaustion resources similar results.

## References

1. Edwards, B. *Rough guide to sustainability*. 3rd ed. RIBA Enterprises, London, 2010.
2. IEA (International Energy Agency). *Energy Efficiency Market Report 2015*, OECD/IEA, 2015.
3. European Commission (EC). *On Resource Efficiency Opportunities in the Building Sector*, COM, Brussels, 2014. Available, <http://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/SustainableBuildingsCommunication.pdf>.
4. European Commission, *Communication from the Commission. Europe. 2020-A Strategy for Smart, Sustainable and Inclusive Growth*, Brussels, 3.3.2010 COM, 2010, 2020 final.
5. IDAE. (2016). Ministry of Industry, tourism and commerce. Technological map: renewable heat and cold. Technology area: biomass and waste. <http://www.idae.es/>
6. L. Paolotti, G. Martino, A. Marchini, A. Boggia. Economic and environmental assessment of agro-energy wood biomass supply chains. *Biomass and bioenergy*. 2017. 0961-9534 Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.020>.
7. D. Ruiz, G. San Miguel, B. Corona, F.R. López. LCA of a multifunctional bioenergy chain based on pellet production. 2017. 00167-2361. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.050>.
8. Diaz-Garcia, A.; Martinez-Garcia, C.; Cotes-Palomino, T. Properties of Residue from Olive Oil Extraction as a Raw Material for Sustainable Construction Materials. Part I: Physical Properties. *Materials*. 2017. 10, 2. 100. DOI: 10.3390/ma10020100.
9. M.C.McManus. Life cycle impacts of waste wood biomass heating systems: a case study of the three UK based systems. 2010. Elsevier. 0360-5442/\$. <https://10.1016/j.energy.2010.06.014>
10. B. Monteleone, M. Chessa, R. Marzulli, V.K.Verma, M. Schwarz, E. Carlon, C. Schmidt, A. Ballarin Dentì. Life cycle analysis of small scale boilers characterized by high efficiency and low emissions. 2015. Elsevier. 0306.2619/. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.080>.
11. Bories,C.; Vedrines,E.; Paulhe-Massol,A.; Vilarem,G.Development of porous fired clay bricks with bio-based additives: Study of the environmental impacts by Life Cycle Assessment (LCA).*Construction and Building Materials*. 2016, 125. 1142-1151. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.042.
12. British Standards Institution (BSI). *ISO 14044:2006 Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines*. United Kingdom, 2006.
13. Study of the Technical Feasibility of Increasing the Amount of Recycled Concrete Waste Used in Ready-Mix Concrete Production. Fratle-García, E.; Ferrero-Caballo, J. ; López-Ochoa, L.M.; López-González, L.M. *Materials*. 2018.10, 7, 817, DOI: 10.3390/ma10070817
14. PRé Consultants. *SimaPro LCA software Ver 7.2.3*. Amersfoort, The Netherlands, 2010.

15. Pieragostini, C.; Massati, M.C.; Aguirre, P. On process optimization considering LCA methodology. *Journal of Environmental Management* 2012, 96, 43-54. DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.10.014.
16. Technical documentation of manufacturer.  
<https://www.domusateknik.com/es/gestor/recursos/uploads/.../catalogos/.../bioclass.pdf>
17. RITE, 1988. Regulation of Thermal Installations of Buildings. Directive 1751/1998. 31 Julio
18. Bare JC (2010) Life cycle impact Assessment Research development and needs. *Clean Environ Policy* 12(4):341-351.
19. Bare JC, Hofstetter P, Pennington DW, de Haes HAU (2000) Midpoints versus endpoints: the sacrifices and benefits. *Int J Life Cycle Assess* 5(6):319-326.
20. Steen, B. (1999a). A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000. General system characteristics. Gothenburg, Chalmers University of Technology, p.67. Disponible en [http://pro.nl/simapro/impact\\_assessment.metods.htm](http://pro.nl/simapro/impact_assessment.metods.htm).
21. Steen, B. (1999b). A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000. General system characteristics. Gothenburg, Chalmers University of Technology, p.67. Disponible en [http://pro.nl/simapro/impact\\_assessment.metods.htm](http://pro.nl/simapro/impact_assessment.metods.htm).
22. Lamnatou, C.; Licosovara, B.; Chemisana, D.; Cristofari, C.; Canalotti, JI- Concentrating photovoltaic/thermal system with thermal and electricity storage: CO<sub>2</sub>eq emissions and multiple environmental indicators. *Journal of Cleaner Production*. 2018. 192, 376-389. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.205.
23. Laso, J.; García-Herrero, I.; Margallo, M.; Vazquez-Rowe, I.; Fullana, P.; Bala, A.; Gazulla, C.; Irabien, A.; Aldaco, R. Finding an economic and environmental balance in value chains based on circular economy thinking: An eco-efficiency methodology applied to the fish canning industry. *Resources Conservation and Recycling*. 2018. 133, 428-437. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.02.004.
24. Pons, J.J.; Penades-Pla, V.; Yepes, V.; Martí, J.V. Life cycle assessment of earth-retaining walls: An environmental comparison. *Journal of Cleaner Production*. 2018. 192, 411-420. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.268.
25. Ruiz Amador, Diego; Zúñiga López, Ignacio. Análisis de ciclo de vida y huella. UNED. ISBN-13: 978-8436265637.
26. Souliotis, Manolis; Arnaoutakis, Nektarios; Panaras, Giorgios; Kavga, Angeliki; Papasfthimiou, Spiros. Experimental study and Life Cycle Assessment (LCA) of hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) solar system for domestic applications. *Renewable Energy*. 2018. DOI: 0960-1481. [Hhttps://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.011](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.011).
27. Mariquez, Anne-Francoise; Rossi Barbara; Cradle-to-grave life-cycle assessment within the built environment: Comparison between the refurbishment and the complete reconstruction of an office building in Belgium. *Journal of Environmental Management*. 2018. DOI: 0301-4797. [Hhttps://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.055](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.055).
28. Joliet, O.; Margni, M.; Charles, R.; IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2003. 8, 324. DOI: 10.1007/BF02978505.
29. Humbert, S.; Schryver, A.D.; Margni, M.; Joliet, O.; IMPACT 2002+: User Guide. [http://www.quantis-inf.com/pdf/IMPACT2002\\_UserGuide\\_for\\_vQ2.2.pdf](http://www.quantis-inf.com/pdf/IMPACT2002_UserGuide_for_vQ2.2.pdf).
30. M.A.J. Huijbregts, Z. Steinmann, P. Elshout, G. Stam, F. Veronesi, M. Vieira, M. Zijp, A. Hollander, R. van Zelm. ReCiPe 2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. 2016. Doi: 10.1007/s11367-016-1246-y.
31. Kumbhar, S.; Kulkarni, N.; Rao, A.B.; Rao, B. 4<sup>th</sup> International Conference on Advances in Energy Research (ICAER 2013). Indian Inst Technol Bombay, Dept Energy Sci & Engr. 2014. Mumbai, INDIA. 54, 260-269. DOI: 10.1016/j.jegypro.2014.07.269.
32. Olajire-Abass, A. The brewing industry and environmental challenges. *Journal of Cleaner Production*, 2012. 1, 21. DOI:10.1016/j.jclepro.2012.03.003.
33. Oreopoulou, V., Russ W. Utilization of By-Products and Treatment of Waste in the Food Industry. 2007. P.111. Springer
34. Steen B. EPS a systematic approach to Environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000-general system characteristics. CPM Report 1999-4. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology; 1999.
35. E. Martínez, J. Blanco, E. Jiménez, J.C. Saenz-Díez, F. Sanz. Comparative evaluation of life cycle impact Assessment software tools through a wind turbine case study. *Renewable energy*. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.08.004>. 0960-1481. Elsevier.
36. Pons, Joaquin J; Penades-Pla, Vicent, Yepes, Victor, Martí José V.; Life cycle assessment of earth-retaining walls: An environmental comparison. *Journal of Cleaner Production*. 2018. DOI: 0959-6526. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.268>.
37. Lamnatou, Chr.; Motte F.; Notton G.; Chemisana D.;Cristofari C. Building-integrated solar thermal system with/without phase change material: Life cycle assessment based on ReCiPe, USEtox and Ecological footprint. *Journal of Cleaner Production*. 2018. DOI: 0959-6526. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.032>.

# Capítulo 08

## FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

### 8.1. Futuras líneas de investigación

#### **8.1 Futuras líneas de investigación.**

La presente tesis doctoral sobre la metodología de Análisis de Ciclo de Vida aplicada a un edificio terciario y sus sistemas de producción de energía, abre la puerta a otras líneas de investigación o trabajos científicos. Estas líneas de investigación mantienen su interés en el ámbito de la Eficiencia Energética y la Sostenibilidad en la Edificación y en la Industria y se relacionan a continuación:

- Incorporación en los análisis realizados el estudio del Coste de ciclo de vida (LCC) y gestión de ciclo de vida (LCM), como aporte de información complementaria a la toma de decisiones.
- Realización de ACV comparativos como base para la implantación de la llamada Economía Circular en todos aquellos sectores implicados en los procesos industriales de la construcción. El ecodiseño y su evaluación con materiales sostenibles son parte de este proceso. La incorporación del ecodiseño como herramienta para el diseño tanto a escala menor (productos) como a escala mayor (edificios o sistemas), es fundamental para el reducir los impactos ambientales generados por la industria y la edificación.
- Desarrollo de normativa sostenible para el control y aplicación de los principios de Sostenibilidad, teniendo como base la realización de ACVs que permiten la incorporación de las Declaraciones Ambientales de Producto a los materiales.
- Implantación de criterios medioambientales en los contratos de obras públicas y privadas, basados en estudios de ACV de los sistemas y de los materiales.
- Desarrollo de nuevos materiales que permitan soluciones arquitectónicas y constructivas sostenibles mediante la incorporación de materias primas locales, y con la incorporación de los procesos de fabricación aditiva.

Un nuevo edificio nunca de consumir energía, sino que genera nuevas necesidades energéticas. No podemos lanzar los materiales a la velocidad suficiente como para convertirlos en energía que se aproveche en nuestros edificios y conseguir así que sean cero emisiones. Si las materias primas se procesan cerca del lugar de extracción, su transporte representaría un coste insignificante. Incluso en los casos más extremos, la energía del transporte no parece que pueda superar nunca a la energía de transformación in situ. Cualquier escenario futuro para una construcción sostenible deberá contemplar el uso de materiales locales.

- Integración de energías renovables a los edificios.

El porcentaje de sistemas de energía renovables en el parque edificado es muy bajo en comparación con la energía que éstas pueden cubrir de su demanda. La integración de los sistemas actuales y de los futuros sistemas, necesita de un estudio pormenorizado en muchos de sus principios, y que deben tener como base los estudios de ACV.

- Aplicaciones BIM a las soluciones constructivas sostenibles.

Con la llegada de los nuevos modos de proyectar y diseñar con software 3D, la incorporación del entorno BIM a la sostenibilidad es algo necesario y por descubrir.

- Los sistemas industriales deben ser transformados profundamente para adaptarse a unos procesos que respeten el medioambiente. En este sentido la industria y la edificación requieren de activos que investiguen en nuevos sistemas constructivos y nuevos procesos industriales. En el ámbito de la eficiencia energética, nos encontramos con el desarrollo de los edificios nZEB. En el ámbito de la industria, tenemos los nuevos modelos de fabricación aditiva, y en el ámbito de la arquitectura, la construcción modular, prefabricada y ligera acaparan la máxima atención.

# Anexo 1

## DEFINICIONES TÉCNICAS

Conceptos de generales.  
Conceptos de Sostenibilidad.

**Análisis de Ciclo de Vida.** Balance ambiental. Estudia los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto. Considera toda la historia del producto, desde su origen como materia prima, hasta su final como residuo. Se tienen en cuenta todas las fases intermedias como transporte y preparación de materias primas, manufactura, transporte a mercados, distribución, uso, reutilización y mantenimiento, reciclado y disposición del residuo.

El ACV consiste por tanto en un tipo de contabilidad ambiental en la que se cargan a los productos los efectos ambientales adversos, debidamente cuantificados, generados a lo largo de su ciclo de vida.

**Autoabastecimiento energético.** Relación entre la producción propia de una fuente de energía o del conjunto de fuentes de energía para consumo interior de una región y el consumo total (producción + importaciones/exportaciones + variación de stock) de esa fuente energética o del conjunto de fuentes energéticas en la misma unidad territorial.

**Balance energético.** Relación detallada de los aportes energéticos de todas las fuentes de energía utilizadas, de sus pérdidas de transformación y de sus formas de utilización en un periodo de tiempo en una región específica.

**BIM.** Building Information Modeling. Es una metodología de trabajo colaborativa para la creación y gestión de un proyecto de construcción. Su objetivo es centralizar toda la información del proyecto en un modelo de información digital creado por todos sus agentes.

**Biomasa.** En el contexto energético, es el conjunto de la materia orgánica originada por los seres vivos y los productos procedentes de su transformación inmediata que pueden ser utilizados para la producción de energía.

**CALENER.** Programa informático que permite determinar la calificación energética de edificios.

**Calificación energética.** Expresión de la eficiencia energética de un edificio que se determina de acuerdo con una metodología de cálculo y se expresa con indicadores energéticos mediante la etiqueta energética.

**Cogeneración.** Producción simultánea de energía eléctrica y térmica.

**Combustible fósil.** Combustible de origen orgánico que se formó en edades geológicas pasadas y que se encuentra en los depósitos sedimentarios de la corteza terrestre. El carbón, el petróleo y el gas natural son los combustibles fósiles.

**CH<sub>4</sub> Metano.** Es una sustancia incolora y no polar, que se presenta en forma de gas a temperaturas y presiones ordinarias, y se caracteriza por su baja solubilidad en fase líquida y elevada persistencia en la atmósfera.

La emisión de metano se distribuye por sectores de la siguiente manera:

- Vertederos: Suponen la mayor fuente de emisión con un 33,9 % del total.
- Fermentación entérica: 29,7 %.
- Estiércol: 17,9 %.
- Petróleo y el gas natural: 6 %.
- Minería del carbón: 4 %.
- Aguas residuales un 2,6 %

Entre los focos de emisión de origen natural destacan:

- Descomposición de los residuos orgánicos: 30%
- Pantanos: 23%
- Extracción de combustibles fósiles: 20% (El metano tradicionalmente se quemaba y emitía directamente. Hoy día se intenta almacenar en lo posible para reaprovecharlo formando el llamado gas natural).
- Los procesos en la digestión y defecación de animales: 17% (Especialmente del ganado).

Se trata del segundo compuesto que más contribuye al calentamiento global de la tierra (efecto invernadero) con un 15 %, sólo superado por el dióxido de carbono con un 76%.

**CO<sub>2</sub>** Dióxido de carbono. Es un gas incoloro La quema de combustibles de carbono desde la Revolución Industrial ha aumentado rápidamente su concentración en la atmósfera, lo que ha llevado a un calentamiento global. Es además la principal causa de la acidificación del océano, ya que se disuelve en el agua formando ácido carbónico.

**Ecodiseño.** “Proceso de diseño que considera los impactos medioambientales en todas las etapas del proceso de diseño y desarrollo de productos, para lograr productos que generen el mínimo impacto medioambiental posible a lo largo de todo su ciclo de vida”.

**Edificio.** Construcción techada, con paredes, en la que se emplea energía para acondicionar el clima interior, puede referirse a un edificio en su conjunto o a partes del mismo que hayan sido diseñadas para ser utilizadas por separado.

**Edificio de energía casi nula.** Es aquel edificio que cubre sus demandas energéticas con energía procedentes de fuentes renovables o que son producidas in situ o en el entorno. La cantidad de energía requerida por el edificio tiende a ser casi nula o muy baja debido a que se han tenido en cuenta las medidas necesarias para su reducción. Se denominan edificios Net ZEB, (Net Zero Energy Building en inglés).

**Eficiencia energética.** “El conjunto de acciones que permiten optimizar la relación entre la cantidad de energía consumida y los productos y servicios finales obtenidos. Esto se puede lograr a través de la implementación de diversas medidas e inversiones a nivel tecnológico, de gestión y de hábitos culturales en la comunidad”. [3]. Es el consumo de energía que se estima necesario para satisfacer la demanda energética del edificio en unas condiciones normales de funcionamiento y ocupación.

**Ecoeficiencia.** “Cuando es capaz de ofrecer productos y servicios a un precio competitivo, que satisfacen necesidades humanas, incrementando su calidad de vida, reduciendo progresivamente el impacto medioambiental y la intensidad del uso de recursos a lo largo de su ciclo de vida, al menos hasta el nivel de capacidad de carga del planeta”.

**Etiqueta energética.** Dispositivo que señala el nivel de calificación de eficiencia energética obtenida mediante procedimientos considerados como documentos reconocidos.

**EPBD.** (Energy Performance of Buildings Directive)

**HULC.** Herramienta informática que unifica LIDER Y CALENER que permite verificar el cumplimiento del Documento Básico del Código Técnico de la Edificación y la Certificación Energética de los Edificios.

**IDEA.** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

**INE.** Instituto Nacional de Estadística.

**Instalaciones centralizadas.** Aquellas en que la producción de calor o frío es única para todo el edificio, realizándose su distribución desde la central generadora a las correspondientes viviendas o locales por medio de fluidos térmicos.

**IPCC.** International Panel on Change Climate. Es el organismo de las Naciones Unidas para evaluar la ciencia relacionada con el cambio climático. Fue creado para proporcionar a los encargados de formular las políticas medio ambientales, evaluaciones científicas periódicas sobre el cambio climático, sus implicaciones y posibles riesgos futuros, así como presentar opciones de adaptación y mitigación. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).

**Ktep.** Unidad de energía que significa tonelada equivalente de petróleo (en inglés toe). Su valor equivale a la energía que rinde una tonelada de petróleo, la cual, como varía según la composición química de éste, se ha tomado un valor convencional de: 41 868 000 000 J (julios) = 11 630 kWh (kilovatios-hora).

**LIDER.** Programa informático que permite calcular la Limitación de la Demanda Energética de los edificios.

**N<sub>2</sub>O Óxido nitroso.** Es un gas volátil, incoloro, con un olor dulce y ligeramente tóxico, que provoca alucinaciones y estado eufórico en la persona, por lo que ha sido comúnmente utilizado como droga en algunos casos.

Como fuentes principales de emisión de óxido nitroso cabe destacar:

- Procesos llevados a cabo en agricultura intensiva.

- Quema de biomasa y combustibles fósiles.
- Uso de fertilizantes nitrogenados.
- Deforestación

Con respecto a su incidencia sobre el medio ambiente, es un importante gas de efecto invernadero con una permanencia media de 100 años en la atmósfera. Actualmente se le atribuye el 5% del efecto invernadero artificial, además de atacar la capa de ozono, reduciéndolo a oxígeno molecular y liberando dos moléculas de monóxido de nitrógeno (NO).

**Sostenibilidad industrial y arquitectónica.** “Es una ingeniería y arquitectura ambientalmente consciente. Es un modo de concebir el diseño industrial y arquitectónico de manera sostenible, buscando optimizar los recursos naturales y sistemas tecnológicos y de edificación de tal modo que minimicen el impacto ambiental de los edificios y sus sistemas de producción de energía sobre el medio ambiente y sus habitantes”.

**OCDE.** Fundada en 1961, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) agrupa a 36 países miembros y su misión es promover políticas que mejoren el bienestar económico y social de las personas alrededor del mundo. La OCDE ofrece un foro donde los gobiernos puedan trabajar conjuntamente para compartir experiencias y buscar soluciones a los problemas comunes. Trabajamos para entender qué es lo que conduce al cambio económico, social y ambiental. Medimos la productividad y los flujos globales del comercio e inversión. Analizamos y comparamos datos para realizar pronósticos de tendencias. Fijamos estándares internacionales dentro de un amplio rango de temas de políticas públicas.

**Potencia nominal instalada.** Potencia máxima que, según determine y garantice el fabricante, puede suministrar un equipo en funcionamiento continuo, ajustándose a los rendimientos declarados por el fabricante.

**PFC** *Perfluorocarburos.* Son compuestos sintéticos, realizados por el hombre, que contienen solamente átomos de flúor y de carbono. Son generalmente gases incoloros e inodoros no inflamables a temperatura ambiente, y la mayoría de ellos no son reactivos con ningún elemento o compuesto químico. La mayor fuente de emisión de perfluorocarburos se origina durante la producción primaria de aluminio, y de la incineración de plásticos y cerámicas. Otros focos minoritarios de contaminación tienen lugar en los equipos de refrigeración, en el sector electrónico y en los sistemas de extinción de incendios. No obstante una exposición prolongada y a elevadas concentraciones, puede causar efectos significativos en el cerebro y el corazón.

El principal problema medioambiental que concierne a los PFC, es que una vez liberados, algunos de ellos son muy activos como agentes intensificadores del efecto invernadero. Como resultado de su larga vida en la atmósfera, las emisiones que se han producido en los últimos 20 ó 30 años continuarán teniendo un impacto ambiental significativo durante mucho tiempo.

**SF6** *Hexafluoruro de Sulfuro*. En condiciones normales de presión y temperatura es un gas incoloro, inodoro, no tóxico y no inflamable, con la peculiaridad de ser cinco veces más pesado que el aire. Es un gas causante de efecto invernadero, catalogado con un índice GWP de 1762 (unas 20 000 veces más que el CO<sub>2</sub>),<sup>3</sup> pero dada su gran densidad no asciende a las capas altas de la atmósfera. Sin embargo, dado que es un gas con una alta vida útil (3200 años), su contribución al calentamiento global se considera alta.

**Tecnosfera**. Capa artificial creada por el hombre a través de procesos de transformación de los recursos naturales.

**UNEP**. Siglas United Nations Environment Programme. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (ONU Medio Ambiente) es la principal autoridad ambiental mundial que establece la agenda ambiental global, promueve la implementación coherente de la dimensión ambiental del desarrollo sostenible dentro del sistema de las Naciones Unidas y sirve como un defensor autorizado del medio ambiente global.

# Anexo 2

## RELACIÓN DE DATOS BASE PARA LA TESIS

### Anexo 2.1. Datos estadísticos

- 2.1.1. Coordenadas del edificio en LIDER
- 2.1.2. Valores de consumos de Energía
- 2.1.3. Medidas de Ahorro y Eficiencia Energética.

#### a.1.1. Coordenadas del edificio

| COORDENADAS PARA LA INTRODUCCION DEL EDIFICIO |       |       |                           |       |       |               |       |       |               |             |
|---|-------|-------|---------------------------|-------|-------|---------------|-------|-------|---------------|-------------|
| PLANTA BAJA                                   |       |       |                           |       |       |               |       |       |               |             |
| SUPERFICIE PLANTA                             |       |       | X                         |       | Y     |               | X     |       | Y             |             |
| PTO   | X     | Y     |                           | X     | Y     |               | X     | Y     | X             | Y           |
| 1   | 1,95  | 0,35  | LABORATORIO CARTOGRAFIA   | 12,77 | 37,14 | CONSERJE      | 19,47 | 37,14 | LABORATORIO 3 | 36,99 37,14 |
| 2   | 12,77 | 0,35  |                           | 6,61  | 37,14 |               | 19,47 | 35,24 |               | 36,99 25,71 |
| 3   | 12,77 | 37,14 |                           | 6,61  | 31,76 |               | 23,97 | 35,24 |               | 41,49 25,71 |
| 4   | 19,47 | 37,14 |                           | 12,77 | 31,76 |               | 23,97 | 37,14 |               | 41,49 37,14 |
| 5   | 19,47 | 18,29 | LABORATORIO PALEONTOLOGIA | 6,61  | 31,61 | LABORATORIO 1 | 25,78 | 37,14 | LABORATORIO 4 | 42,47 22,86 |
| 6   | 24,96 | 18,29 |                           | 6,61  | 25,71 |               | 25,78 | 25,71 |               | 42,47 15,86 |
| 7   | 24,96 | 15,86 |                           | 12,77 | 25,71 |               | 30,29 | 25,71 |               | 47,81 15,86 |
| 8   | 30,29 | 15,86 |                           | 12,77 | 31,61 |               | 30,29 | 37,14 |               | 47,81 22,86 |
| 9   | 30,29 | 37,14 | LABORATORIO CERAMOLOGIA   | 1,95  | 23,01 | LABORATORIO 2 | 24,96 | 22,86 | ZONA COMUN    | 41,65 36,52 |
| 10  | 36,99 | 37,14 |                           | 1,95  | 15,51 |               | 24,96 | 15,86 |               | 41,65 25,56 |
| 11  | 36,99 | 18,29 |                           | 12,77 | 15,51 |               | 30,29 | 15,86 |               | 36,99 25,56 |
| 12  | 42,47 | 18,29 |                           | 12,77 | 23,01 |               | 30,29 | 22,86 |               | 36,99 23,01 |
| 13  | 42,47 | 15,86 | LABORATORIO MUESTRAS      | 1,95  | 15,51 | ZONA COMUN    | 24,13 | 34,71 |               | 45,19 23,01 |
| 14  | 47,81 | 15,86 |                           | 1,95  | 12,33 |               | 24,13 | 25,56 |               | 45,19 25,36 |
| 15  | 47,81 | 25,71 |                           | 8,73  | 12,33 |               | 19,47 | 25,56 |               | 43,19 25,36 |
| 16  | 48,90 | 25,71 |                           | 8,73  | 15,51 |               | 19,47 | 23,01 |               | 43,19 36,52 |
| 17  | 48,90 | 39,41 | AGORA                     | 9,20  | 39,41 |               | 27,63 | 23,01 |               |             |
| 18  | 47,81 | 39,41 |                           | 1,95  | 39,41 |               | 27,63 | 25,29 |               |             |
| 19  | 47,81 | 46,57 |                           | 1,95  | 23,01 |               | 25,67 | 25,29 |               |             |
| 20  | 43,39 | 46,57 |                           | 10,11 | 23,01 |               | 25,67 | 34,71 |               |             |
| 21  | 43,39 | 39,84 |                           | 10,11 | 25,71 |               |       |       |               |             |
| 22  | 36,01 | 39,84 |                           | 6,61  | 25,71 |               |       |       |               |             |
| 23  | 36,01 | 44,14 |                           | 6,61  | 37,14 |               |       |       |               |             |
| 24  | 7,20  | 44,14 |                           | 9,20  | 37,14 |               |       |       |               |             |
| 25  | 7,20  | 39,49 |                           |       |       |               |       |       |               |             |
| 26  | 1,95  | 39,49 |                           |       |       |               |       |       |               |             |

Estudio de la Eficiencia Energética y la Sostenibilidad de los sistemas de generación de energía en un edificio terciario de la Universidad de Jaén mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

| PLANTA1ª          |       |       |             |       |       |               |       |       |               |       |       |               |       |       |
|-------------------|-------|-------|-------------|-------|-------|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| SUPERFICIE PLANTA |       |       |             |       |       |               |       |       |               |       |       |               |       |       |
| PTO               | X     | Y     | X           | Y     | X     | Y             | X     | Y     | X             | Y     | X     | Y             |       |       |
| 1                 | 1,95  | 39,41 | SEMINARIO 1 | 1,95  | 15,76 | DESPACHO 1    | 1,95  | 37,14 | DESPACHO 9    | 19,47 | 37,14 | DESPACHO 17   | 36,99 | 37,14 |
| 2                 | 1,95  | 15,76 |             | 7,36  | 15,76 |               | 1,95  | 34,43 |               | 19,47 | 34,43 |               | 36,99 | 34,43 |
| 3                 | 12,77 | 15,76 |             | 7,36  | 22,86 |               | 6,60  | 34,43 |               | 24,13 | 34,43 |               | 41,65 | 34,43 |
| 4                 | 12,77 | 37,14 |             | 1,95  | 22,86 |               | 6,00  | 37,14 |               | 24,13 | 37,14 |               | 41,65 | 37,14 |
| 5                 | 19,47 | 37,14 | SEMINARIO 2 | 7,36  | 22,86 | DESPACHO 2    | 1,95  | 34,43 | DESPACHO 10   | 19,47 | 34,43 | DESPACHO 18   | 36,99 | 34,43 |
| 6                 | 19,47 | 15,76 |             | 7,36  | 15,76 |               | 1,95  | 31,56 |               | 19,47 | 31,56 |               | 36,99 | 31,56 |
| 7                 | 30,29 | 15,76 |             | 12,77 | 15,76 |               | 6,60  | 31,56 |               | 24,13 | 31,56 |               | 41,65 | 31,56 |
| 8                 | 30,29 | 37,14 |             | 12,77 | 22,86 |               | 6,00  | 34,43 |               | 24,13 | 34,43 |               | 41,65 | 34,43 |
| 9                 | 36,99 | 37,14 | SEMINARIO 3 | 19,47 | 22,86 | DESPACHO 3    | 1,95  | 31,56 | DESPACHO11    | 19,47 | 31,56 | DESPACHO19    | 36,99 | 31,56 |
| 10                | 36,99 | 15,76 |             | 19,47 | 15,76 |               | 1,95  | 28,70 |               | 19,47 | 28,70 |               | 36,99 | 28,70 |
| 11                | 47,81 | 15,76 |             | 24,88 | 15,76 |               | 6,60  | 28,70 |               | 24,13 | 28,70 |               | 41,65 | 28,70 |
| 12                | 47,81 | 46,57 |             | 24,88 | 22,86 |               | 6,00  | 31,56 |               | 24,13 | 31,56 |               | 41,65 | 31,56 |
| 13                | 43,39 | 46,57 | SEMINARIO 4 | 24,88 | 22,86 | DESPACHO 4    | 1,95  | 28,70 | DESPACHO 12   | 19,47 | 28,70 | DESPACHO 20   | 36,99 | 28,70 |
| 14                | 43,39 | 39,84 |             | 24,88 | 15,76 |               | 1,95  | 25,63 |               | 19,47 | 25,63 |               | 36,99 | 25,63 |
| 15                | 36,01 | 39,84 |             | 30,29 | 15,76 |               | 6,60  | 25,63 |               | 24,13 | 25,63 |               | 41,65 | 25,63 |
| 16                | 36,01 | 44,14 |             | 30,29 | 22,86 |               | 6,00  | 28,70 |               | 24,13 | 28,70 |               | 41,65 | 28,70 |
| 17                | 7,20  | 44,14 | SEMINARIO 5 | 36,99 | 22,86 | DESPACHO 5    | 8,26  | 37,14 | DESPACHO 13   | 25,78 | 37,14 | DESPACHO 21   | 43,30 | 37,14 |
| 18                | 7,20  | 39,49 |             | 36,99 | 15,76 |               | 8,26  | 34,43 |               | 25,78 | 34,43 |               | 43,30 | 34,43 |
|                   |       |       |             | 42,47 | 15,76 |               | 12,77 | 34,43 |               | 30,29 | 34,43 |               | 47,81 | 34,43 |
|                   |       |       |             | 42,47 | 22,86 |               | 12,77 | 37,14 |               | 30,29 | 37,14 |               | 47,81 | 37,14 |
|                   |       |       | SEMINARIO 6 | 42,40 | 22,86 | DESPACHO 6    | 8,26  | 34,43 | DESPACHO 14   | 25,78 | 34,43 | DESPACHO 22   | 43,30 | 34,43 |
|                   |       |       |             | 42,40 | 15,76 |               | 8,26  | 31,56 |               | 25,78 | 31,56 |               | 43,30 | 31,56 |
|                   |       |       |             | 47,81 | 15,76 |               | 12,77 | 31,56 |               | 30,29 | 31,56 |               | 47,81 | 31,56 |
|                   |       |       |             | 47,81 | 22,86 |               | 12,77 | 34,43 |               | 30,29 | 34,43 |               | 47,81 | 34,43 |
|                   |       |       |             |       |       | DESPACHO 7    | 8,26  | 31,56 | DESPACHO 15   | 25,78 | 31,56 | DESPACHO 23   | 43,30 | 31,56 |
|                   |       |       |             |       |       |               | 8,26  | 28,70 |               | 25,78 | 28,70 |               | 43,30 | 28,70 |
|                   |       |       |             |       |       |               | 12,77 | 28,70 |               | 30,29 | 28,70 |               | 47,81 | 28,70 |
|                   |       |       |             |       |       |               | 12,77 | 31,56 |               | 30,29 | 31,56 |               | 47,81 | 31,56 |
|                   |       |       |             |       |       | DESPACHO 8    | 8,26  | 28,70 | DESPACHO 16   | 25,78 | 28,70 | DESPACHO 24   | 43,30 | 28,70 |
|                   |       |       |             |       |       |               | 8,26  | 25,63 |               | 25,78 | 25,63 |               | 43,30 | 25,63 |
|                   |       |       |             |       |       |               | 12,77 | 25,63 |               | 30,29 | 25,63 |               | 47,81 | 25,63 |
|                   |       |       |             |       |       |               | 12,77 | 28,70 |               | 30,29 | 28,70 |               | 47,81 | 28,70 |
|                   |       |       |             |       |       | ZONA ESCALERA | 6,60  | 37,14 | ZONA ESCALERA | 24,13 | 37,14 | ZONA ESCALERA | 41,65 | 37,14 |
|                   |       |       |             |       |       |               | 6,60  | 25,63 |               | 24,13 | 25,63 |               | 41,65 | 25,63 |
|                   |       |       |             |       |       |               | 1,95  | 25,63 |               | 19,47 | 25,63 |               | 36,99 | 25,63 |
|                   |       |       |             |       |       |               | 1,95  | 22,86 |               | 19,47 | 22,86 |               | 36,99 | 22,86 |
|                   |       |       |             |       |       |               | 10,11 | 22,86 |               | 30,29 | 22,86 |               | 47,81 | 22,86 |
|                   |       |       |             |       |       |               | 10,11 | 25,63 |               | 30,29 | 25,63 |               | 47,81 | 25,63 |
|                   |       |       |             |       |       |               | 8,26  | 25,63 |               | 25,78 | 25,63 |               | 43,30 | 25,63 |
|                   |       |       |             |       |       |               | 8,26  | 37,14 |               | 25,78 | 37,14 |               | 43,30 | 37,14 |

| PLANTA2ª |       |       |                        |       |       |                        |       |       |                        |       |       |       |
|----------|-------|-------|------------------------|-------|-------|------------------------|-------|-------|------------------------|-------|-------|-------|
| PTO      | X     | Y     |                        |       |       |                        |       |       |                        |       |       |       |
| 1        | 1,95  | 39,41 | DESPACHO SUBDIRECTOR 1 | 1,95  | 39,41 | DESPACHO SUBDIRECTOR 2 | 19,47 | 37,14 | DESPACHO SUBDIRECTOR 3 | 36,99 | 37,14 |       |
| 2        | 1,95  | 18,29 |                        | 1,95  | 32,38 |                        | 19,47 | 32,38 |                        | 36,99 | 32,38 |       |
| 3        | 7,44  | 18,29 |                        | 7,20  | 32,38 |                        | 24,22 | 32,38 |                        | 41,69 | 32,38 |       |
| 4        | 7,44  | 15,76 |                        | 7,20  | 39,41 |                        | 24,22 | 37,14 |                        | 41,69 | 37,14 |       |
| 5        | 12,77 | 15,76 | ADMINISTRACION 1       | 1,95  | 32,38 | ADMINISTRACION 2       | 19,47 | 32,38 | ADMINISTRACION 3       | 36,99 | 32,38 |       |
| 6        | 12,77 | 37,14 |                        | 1,95  | 25,63 |                        | 19,47 | 25,63 |                        | 36,99 | 25,63 |       |
| 7        | 19,47 | 37,14 |                        | 7,20  | 25,63 |                        | 24,22 | 25,63 |                        | 41,69 | 25,63 |       |
| 8        | 19,47 | 18,29 |                        | 7,20  | 32,38 |                        | 24,22 | 32,38 |                        | 41,69 | 32,38 |       |
| 9        | 24,99 | 18,29 | DESPACHO DIRECTOR 1    | 1,95  | 22,86 | DESPACHO DIRECTOR 2    | 19,47 | 22,86 | DESPACHO DIRECTOR 3    | 36,99 | 22,86 |       |
| 10       | 24,99 | 15,76 |                        | 1,95  | 18,29 |                        | 19,47 | 18,29 |                        | 36,99 | 18,29 |       |
| 11       | 30,29 | 15,76 |                        | 7,47  | 18,29 |                        | 24,99 | 18,29 |                        | 42,52 | 18,29 |       |
| 12       | 30,29 | 37,14 |                        | 7,47  | 22,86 |                        | 24,99 | 22,86 |                        | 42,52 | 22,86 |       |
| 13       | 36,99 | 37,14 | SALA DE JUNTAS 1       | 7,47  | 22,86 | SALA DE JUNTAS 2       | 24,99 | 22,86 | SALA DE JUNTAS 3       | 42,52 | 22,86 |       |
| 14       | 36,99 | 18,29 |                        | 7,47  | 15,76 |                        | 24,99 | 15,76 |                        | 42,52 | 15,76 |       |
| 15       | 42,51 | 18,29 |                        | 12,77 | 15,76 |                        | 30,29 | 15,76 |                        | 47,81 | 15,76 |       |
| 16       | 42,51 | 15,76 |                        | 12,77 | 22,86 |                        | 30,29 | 22,86 |                        | 47,81 | 22,86 |       |
| 17       | 47,81 | 15,76 | BIBLIOTECA 1           | 8,30  | 37,14 | BIBLIOTECA 2           | 25,82 | 37,14 | BIBLIOTECA 3           | 43,28 | 37,14 |       |
| 18       | 47,81 | 46,57 |                        | 8,30  | 25,36 |                        | 25,82 | 25,36 |                        | 43,28 | 25,36 |       |
| 19       | 43,39 | 46,57 |                        | 12,77 | 25,36 |                        | 30,29 | 25,36 |                        | 47,81 | 25,36 |       |
| 20       | 43,39 | 39,84 |                        | 12,77 | 37,14 |                        | 30,29 | 37,14 |                        | 47,81 | 37,14 |       |
| 21       | 36,01 | 39,84 | ZONA ESCALERA 1        | 7,20  | 37,14 | ZONA ESCALERA 2        | 24,22 | 37,14 | ZONA ESCALERA 3        | 41,69 | 37,14 |       |
| 22       | 36,01 | 44,14 |                        | 7,20  | 25,56 |                        | 24,22 | 25,56 |                        | 41,69 | 25,56 |       |
| 23       | 7,20  | 44,14 |                        | 1,95  | 25,56 |                        | 19,47 | 25,56 |                        | 36,99 | 25,56 |       |
| 24       | 7,20  | 39,49 |                        | 1,95  | 22,86 |                        | 19,47 | 22,86 |                        | 36,99 | 22,86 |       |
|          |       |       |                        |       | 10,11 | 22,86                  |       | 27,67 | 22,86                  |       | 45,07 | 22,86 |
|          |       |       |                        |       | 10,11 | 25,36                  |       | 27,67 | 25,36                  |       | 45,07 | 25,36 |
|          |       |       |                        |       | 8,30  | 25,36                  |       | 25,82 | 25,36                  |       | 43,28 | 25,36 |
|          |       |       |                        |       | 8,30  | 37,14                  |       | 25,82 | 37,14                  |       | 43,28 | 37,14 |

### Anexo a.1.2. Datos estadísticos

| (KtEPS) | TOTAL CARBÓN | GLP | Gasóleo | TOTAL PRODUCTOS PETROLÍFEROS | TOTAL GASES | Solar térmica | Geotermia | Biomasa | TOTAL ENERGÍAS RENOVABLES | TOTAL ENERGÍA ELÉCTRICA | TOTAL |
|---------|--------------|-----|---------|------------------------------|-------------|---------------|-----------|---------|---------------------------|-------------------------|-------|
|---------|--------------|-----|---------|------------------------------|-------------|---------------|-----------|---------|---------------------------|-------------------------|-------|

|                         |       |            |            |              |              |           |          |           |            |              |               |
|-------------------------|-------|------------|------------|--------------|--------------|-----------|----------|-----------|------------|--------------|---------------|
| TOTAL ESPAÑA            | 1.515 | 1.457      | 27.101     | 40.323       | 13.218       | 277       | 19       | 3.925     | 5.290      | 19.955       | 80.303        |
| EDIFICACIÓN RESIDENCIAL | 89    | 1.045      | 1.941      | 3.001        | 3.017        | 221       | 11       | 2.489     | 2.749      | 6.025        | 14.881        |
| EDIFICACIÓN TERCIARIO   | -     | <b>181</b> | <b>842</b> | <b>1.052</b> | <b>2.640</b> | <b>52</b> | <b>4</b> | <b>80</b> | <b>153</b> | <b>6.192</b> | <b>10.039</b> |
| TOTAL EDIFICACIÓN       | 89    | 1.226      | 2.783      | 4.053        | 5.657        | 273       | 15       | 2.569     | 2.902      | 12.217       | 24.920        |
| % TOTAL EDIFICACIÓN     | 5,87  | 84,15      | 10,27      | 10,05        | 42,80        | 98,56     | 78,95    | 65,45     | 54,86      | 61,22        | 31,03         |

**Tabla 1.** Datos de consumo a partir de la Serie de Energía Final (1990-2015). IDEA-MINETAD

| (KtEPS)         | TOTAL SECTORES | EDIFICACIÓN RESIDENCIAL | EDIFICACIÓN TERCIARIO | TOTAL EDIFICACIÓN |
|-----------------|----------------|-------------------------|-----------------------|-------------------|
| 2010-2011       | -2.503         | -1.293                  | 405                   | -888              |
| 2011-2012       | -3.490         | -102                    | -162                  | -264              |
| 2012-2013       | -2.546         | -643                    | -426                  | -1.069            |
| 2013-2014       | -1.418         | -173                    | -770                  | -943              |
| ACUM. 2010-2014 | -9.957         | -2.211                  | -953                  | -3.164            |
| 2014-2015       | 1.253          | 168                     | 1.191                 | 1.359             |
| ACUM. 2010-2015 | -8.704         | -2.043                  | 238                   | -1.805            |

**Tabla 2.** Variación absoluta (1990-2015). IDEA-MINETAD

Estudio de la Eficiencia Energética y la Sostenibilidad de los sistemas de generación de energía en un edificio terciario de la Universidad de Jaén mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

| (KtEPS) | TOTAL PRODUCTOS PETROLIFEROS | TOTAL GASES | TOTAL RENOVABLES | TOTAL ELECTRICIDAD | TOTAL  |
|---------|------------------------------|-------------|------------------|--------------------|--------|
| 2010    | 1.422                        | 1.064       | 99               | 7.215              | 9.801  |
| 2011    | 1.355                        | 1.755       | 104              | 6.992              | 10.206 |
| 2012    | 1.414                        | 1.617       | 114              | 6.898              | 10.044 |
| 2013    | 1.490                        | 1.497       | 132              | 6.499              | 9.618  |
| 2014    | 1.208                        | 1.450       | 143              | 6.047              | 8.848  |
| 2015    | 1.052                        | 2.640       | 153              | 6.192              | 10.039 |

**Tabla 3.** Resumen del consumo de energía final (2010-2015). Sector terciario (ktEPS)

| (KtEPS)                   | TOTAL PRODUCTOS PETROLIFEROS | TOTAL GASES | ENERGÍA ELECTRICA | TOTAL RENOVABLES | TOTAL   |
|---------------------------|------------------------------|-------------|-------------------|------------------|---------|
| OFININAS                  | 411,5                        | 310,3       | 2.047,8           | 39,5             | 2.809,0 |
| HOSPITALES                | 109,1                        | 141,1       | 352,6             | 5,5              | 608,2   |
| COMERCIO                  | 307,4                        | 686,8       | 2.066,0           | 3,8              | 3.064,0 |
| RESTAURANTES ALOJAMIENTOS | 93,2                         | 75,8        | 510,10            | 18,8             | 697,9   |
| EDUCACIÓN                 | 178,5                        | 95,1        | 320,3             | 5,5              | 599,4   |
| OTROS SERVICIOS           | 108,1                        | 141,2       | 749,80            | 67,5             | 1.066,6 |
| CONSUMO TOTAL SERVICIOS   | 1.207,8                      | 1.450,20    | 6.046,6           | 143,0            | 8.847,6 |

**Tabla 4.** Consumo energético (ktEPS) del sector servicios en el año 2015

|   | Ahorros de energía final (ktep) |       | Ahorros de energía primaria (ktep) |       | Emisiones evitadas de CO <sub>2</sub> (ktCO <sub>2</sub> ) |        | Apoyos gestión pública (M€) |           |           | Inversiones (apoyo + aportación privada) (M€) |           |           |
|---|---------------------------------|-------|------------------------------------|-------|--|--------|-----------------------------|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
|   | 2016                            | 2020  | 2016                               | 2020  | 2016   | 2020   | 2011-2016                   | 2017-2020 | 2011-2020 | 2011-2016                                     | 2017-2020 | 2011-2020 |
| <b>Edificación y equipamiento</b>   | 2.674                           | 2.867 | 5.096                              | 5.567 | 11.116   | 12.120 | 1.730                       | 1.153     | 2.883     | 16.393  | 10.929    | 27.322    |
| Rehabilitación energética de la envolvente térmica de los edificios existentes                              | 775                             | 775   | 1.319                              | 1.329 | 2.921  | 2.943  | 665,7                       | 443,8     | 1.109,5   | 3.356,4                                       | 2.237,6   | 5.594,0   |
| Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones térmicas de los edificios existentes                | 908                             | 908   | 1.546                              | 1.558 | 3.424  | 3.449  | 169,8                       | 113,2     | 283,0     | 4.354,8                                       | 2.903,2   | 7.258,0   |
| Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones de iluminación interior en los edificios existentes | 674                             | 842   | 1.588                              | 1.986 | 3.400  | 4.251  | 115,2                       | 76,8      | 192,0     | 5.257,8                                       | 3.505,2   | 8.763,0   |
| Construcción de nuevos edificios y rehabilitación de existentes con alta calificación energética            | 224                             | 247   | 425                                | 473   | 901  | 1.002  | 472,8                       | 315,2     | 788,0     | 2.920,8                                       | 1.947,2   | 4.868,0   |
| Construcción o rehabilitación de edificios de consumo de energía casi nulo                                  | 0,4                             | 0,8   | 0,8                                | 1,5   | 1,6  | 3,2    | 3,0                         | 2,0       | 5,0       | 11,4  | 7,6       | 19,0      |
| Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones de frío comercial                                   | 0,8                             | 1,6   | 1,9                                | 3,8   | 4,0  | 8,1    | 3,0                         | 2,0       | 5,0       | 12,0  | 8,0       | 20,0      |
| Mejora de la eficiencia energética del parque de electrodomésticos  | 92                              | 92    | 216                                | 216   | 463  | 463    | 300,0                       | 200,0     | 500,0     | 480,0   | 320,0     | 800,0     |

Nota: los cálculos de emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas como resultado de las medidas de ahorro y eficiencia energética incorporadas en este Plan son cálculos efectuados *ad hoc* para el mismo y suponen una traducción de los ahorros calculados en diferentes bases (2004 y 2007), en términos de energía final y primaria, a emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas; este cálculo no tiene por qué coincidir, por tanto, con los realizados con enfoques o bases contables distintos como parte de los informes periódicos realizados en relación con la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Figura 11: Medidas de edificación del Plan de Ahorro y Eficiencia Energética IDEA

# ANEXO 3

## DOCUMENTOS TÉCNICOS

### Anexo 3.1. Datos técnicos de los sistemas de producción de energía.

#### 3.1.1. Fichas técnicas de los Sistemas

#### 3.1.2. Inventario de los sistemas

### Anexo 3.1. Datos técnicos de los sistemas de producción de energía.

#### 3.1.1. Fichas técnicas de los Sistemas.

### Model: FDCA224HKXE4

#### Technical data

|   |                |                 |
|---|----------------|-----------------|
| Nominal horse power [HP]:                         |                | 8               |
| Power supply [V/f/Hz]:                            |                | 380-415V/3/50Hz |
| Capacity [W]:                                     | <u>cooling</u> | <u>heating</u>  |
|   | 22400          | 25000           |
| Net Weight [kg]:                                  |                | 245             |
| Compressor motor power [kWxunits]:                |                | 3,88x1          |
| Air flow (cooling/heating) [m <sup>3</sup> /min]: |                | 220/180         |
| Refrigerating charge [kg]:                        |                | 14,2            |
| Noise level (cooling/heating) [dB]:               |                | 57/57           |
| Capacity control [%]:                             |                | 27-126          |

#### Electrical data

|                         |                |                |
|-------------------------|----------------|----------------|
| Starting current [A]:   |                | 5              |
| Power consumption [kW]: | <u>cooling</u> | <u>heating</u> |
|                         | 5,7            | 5,98           |
| Operating current [A]:  | 9,6/8,8        | 9,6/8,8        |

#### Connections

|              |                   |               |
|--------------|-------------------|---------------|
| Liquid line: | <u>milimeters</u> | <u>inches</u> |
|              | 9,52              | 3/8"          |
| Gas line:    | 19,05             | 3/4"          |

# Model: FDT36KXE6A

## Technical data

|                              |  |                |
|------------------------------|--|----------------|
|                              | <u>cooling</u>                               | <u>heating</u> |
| Capacity [W]:                | 3600   | 4000           |
| Power consumption [W]:       | 30-30  | 30-30          |
| Acoustic pressure [dB(A)]:   | Hi:33 Me:31 Lo:30                            |                |
| Air flow [m³/min]:           | Hi:18 Me:16 Lo:14                            |                |
| Power supply [V/f/Hz]:       | 220-240V/1/50Hz                              |                |
| Indoor unit net weight [kg]: | 22   |                |
| Panel net weight [kg]:       | 5,5  |                |
| Air filter:                  | Pocket Plastic net                           |                |
| Remote control:              | wired:RC-E4, RCH-E3,<br>wireless:RCN-T-36W-E |                |
| Outside air intake:          | Possible                                     |                |

## Connections

|              |                    |               |
|--------------|--------------------|---------------|
|              | <u>millimeters</u> | <u>inches</u> |
| Liquid line: | 6,35               | 1/4"          |
| Gas line:    | 12,7               | 1/2"          |

### 3.1.2. Inventario de los sistemas

| SISTEMAS DE AIRE ACONDICIONADO |                         |           |        |                           |                        |                         |                   |
|--------------------------------|-------------------------|-----------|--------|---------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------|
| EXTERIOR                       | Exterior bomba de calor | 3         |        | mitsubishi fdca 1360HKXE4 | 136                    | Cubierta                |                   |
|                                | Exterior bomba de calor | 1         |        | mitsubishi fdca 224HKXE4  | 22,4                   | Cubierta                |                   |
| SISTEMA 1                      | Denominación            | uds       | planta | modelo                    | Potencia (kw) proyecto | Potencia (kw) instalada | Situación         |
| <b>RAMA 1</b>                  |                         | <b>9</b>  |        |                           |                        |                         |                   |
| UD                             | Recuperador entalpico   | 1         | 2      | WOLF                      | 12,54                  |                         | CAAI              |
| UD                             | Recuperador entalpico   | 1         | 2      | WOLF                      | 6,27                   |                         | Vestibulo         |
| UD                             | Interior tipo techo     | 2         | 2      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 3,14                   | 3,6                     | Sala de juntas    |
| UD                             | Interior tipo techo     | 1         | 2      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 3,14                   | 3,6                     | Despacho director |
| UD                             | Interior tipo techo     | 2         | 2      | mitsubishi heavy FDT45KX  | 3,92                   | 4,5                     | Biblioteca        |
| UD                             | Interior tipo techo     | 1         | 2      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 3,14                   | 3,6                     | Administración    |
| UD                             | Interior tipo techo     | 1         | 2      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 3,14                   | 3,6                     | Sub-director      |
| <b>RAMA 2</b>                  |                         | <b>13</b> |        |                           |                        |                         |                   |
| UD                             | RECUPERADOR ENTALPICO   | 1         | 1      | WOLF                      | 12,54                  |                         | CAAI              |
| UD                             | Interior tipo techo     | 2         | 1      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 3,14                   | 3,6                     | Seminario 1       |
| UD                             | Interior tipo techo     | 2         | 1      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 3,14                   | 3,6                     | Seminario 2       |
| UD                             | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDK22KX  | 1,96                   | 2,22                    | Despacho 1        |
| UD                             | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDK22KX  | 1,96                   | 2,22                    | Despacho 2        |
| UD                             | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDK22KX  | 1,96                   | 2,22                    | Despacho 3        |
| UD                             | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDK22KX  | 1,96                   | 2,22                    | Despacho 4        |
| UD                             | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDK22KX  | 1,96                   | 2,22                    | Despacho 5        |
| UD                             | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDK22KX  | 1,96                   | 2,22                    | Despacho 6        |
| UD                             | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDK22KX  | 1,96                   | 2,22                    | Despacho 7        |
| UD                             | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDK22KX  | 1,96                   | 2,22                    | Despacho 8        |
| <b>RAMA 3</b>                  |                         | <b>13</b> |        |                           |                        |                         |                   |
| UD                             | RECUPERADOR ENTALPICO   | 1         | baja   | WOLF                      | 24,69                  |                         | CAAI              |
| UD                             | Recuperador entalpico   | 1         | baja   | WOLF                      | 12,54                  |                         | CAAI              |
| UD                             | Interior tipo techo     | 2         | baja   | mitsubishi heavy FDT36KX  | 3,14                   | 3,6                     | Paleoambiente     |
| UD                             | Interior tipo techo     | 2         | baja   | mitsubishi heavy FDT36KX  | 3,14                   | 3,6                     | Agora             |
| UD                             | Interior tipo techo     | 2         | baja   | mitsubishi heavy FDT36KX  | 3,14                   | 3,6                     | Cartografia       |
| UD                             | Interior tipo techo     | 4         | baja   | mitsubishi heavy FDT45KX  | 3,92                   | 4,5                     | Ceramologia       |
| UD                             | Interior tipo pared     | 1         | baja   | mitsubishi heavy FDK22KX  | 1,96                   | 2,22                    | Lavado muestras   |
|                                |                         | <b>38</b> |        |                           |                        |                         |                   |

Estudio de la Eficiencia Energética y la Sostenibilidad de los sistemas de generación de energía en un edificio terciario de la Universidad de Jaén mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

| EXTERIOR      | Exterior bomba de calor | 3         |        | mitsubishi fdca 1360HKXE4 | 136                    |                         | Cubierta       |
|---------------|-------------------------|-----------|--------|---------------------------|------------------------|-------------------------|----------------|
|               | Exterior bomba de calor | 1         |        | mitsubishi fdca 224HKXE4  | 22,4                   |                         | Cubierta       |
| SISTEMA 3     | Denominación            | uds       | planta | modelo                    | Potencia (kw) proyecto | Potencia (kw) instalada | Situación      |
| <b>RAMA 1</b> |                         | <b>8</b>  |        |                           |                        |                         |                |
| UD            | Recuperador entalpico   | 1         | 2      | WOLF                      | 23,19                  |                         | CI-2           |
| UD            | Interior tipo techo     | 2         | 2      | mitsubishi heavy FDT45KX  | 3,71                   | 4,5                     | Sala de juntas |
| UD            | Interior tipo techo     | 1         | 2      | mitsubishi heavy FDT45KX  | 3,71                   | 4,5                     | Director       |
| UD            | Interior tipo techo     | 2         | 2      | mitsubishi heavy FDT56KX  | 4,64                   | 5,6                     | Biblioteca     |
| UD            | Interior tipo techo     | 1         | 2      | mitsubishi heavy FDT45KX  | 3,71                   | 4,5                     | Administración |
| UD            | Interior tipo techo     | 1         | 2      | mitsubishi heavy FDT45KX  | 3,71                   | 4,5                     | Subdirector    |
| <b>RAMA 2</b> |                         | <b>13</b> |        |                           |                        |                         |                |
| UD            | RECUPERADOR ENTALPICO   | 1         | 1      | WOLF                      | 14,84                  |                         | CI-2           |
| UD            | Interior tipo techo     | 2         | 1      | mitsubishi heavy FDT45KX  | 3,71                   | 4,5                     | Seminario 3    |
| UD            | Interior tipo techo     | 2         | 1      | mitsubishi heavy FDT45KX  | 3,71                   | 4,5                     | Seminario 4    |
| UD            | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 2,32                   | 3,6                     | Despacho 17    |
| UD            | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 2,32                   | 3,6                     | Despacho 18    |
| UD            | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 2,32                   | 3,6                     | Despacho 19    |
| UD            | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 2,32                   | 3,6                     | Despacho 20    |
| UD            | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 2,32                   | 3,6                     | Despacho 21    |
| UD            | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 2,32                   | 3,6                     | Despacho 22    |
| UD            | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 2,32                   | 3,6                     | Despacho 23    |
| UD            | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 2,32                   | 3,6                     | Despacho 24    |
| <b>RAMA 3</b> |                         | <b>5</b>  |        |                           |                        |                         |                |
| UD            | RECUPERADOR ENTALPICO   | 1         | baja   | WOLF                      | 23,19                  |                         | CI-2           |
| UD            | Interior tipo techo     | 2         | baja   | mitsubishi heavy FDT56KX  | 5,84                   | 5,6                     | Laboratorio 1  |
| UD            | Interior tipo techo     | 2         | baja   | mitsubishi heavy FDT45KX  | 3,71                   | 4,5                     | Laboratorio 2  |
|               |                         | <b>26</b> |        |                           |                        |                         |                |

| EXTERIOR      | Exterior bomba de calor | 3         |        | mitsubishi fdca 1360HKXE4 | 136                    |                         | Cubierta       |
|---------------|-------------------------|-----------|--------|---------------------------|------------------------|-------------------------|----------------|
|               | Exterior bomba de calor | 1         |        | mitsubishi fdca 224HKXE4  | 22,4                   |                         | Cubierta       |
| SISTEMA 2     | Denominación            | uds       | planta | modelo                    | Potencia (kw) proyecto | Potencia (kw) instalada | Situación      |
| <b>RAMA 1</b> |                         | <b>8</b>  |        |                           |                        |                         |                |
| UD            | Recuperador entalpico   | 1         | 2      | WOLF                      | 23,19                  |                         | CI-1           |
| UD            | Interior tipo techo     | 2         | 2      | mitsubishi heavy FDT45KX  | 3,71                   | 4,5                     | Sala de juntas |
| UD            | Interior tipo techo     | 1         | 2      | mitsubishi heavy FDT45KX  | 3,71                   | 4,5                     | Director       |
| UD            | Interior tipo techo     | 2         | 2      | mitsubishi heavy FDT56KX  | 4,64                   | 5,6                     | Biblioteca     |
| UD            | Interior tipo techo     | 1         | 2      | mitsubishi heavy FDT45KX  | 3,71                   | 4,5                     | Administración |
| UD            | Interior tipo techo     | 1         | 2      | mitsubishi heavy FDT45KX  | 3,71                   | 4,5                     | Subdirector    |
| <b>RAMA 2</b> |                         | <b>13</b> |        |                           |                        |                         |                |
| UD            | RECUPERADOR ENTALPICO   | 1         | 1      | WOLF                      | 14,84                  |                         | CI-1           |
| UD            | Interior tipo techo     | 2         | 1      | mitsubishi heavy FDT45KX  | 3,71                   | 4,5                     | Seminario 3    |
| UD            | Interior tipo techo     | 2         | 1      | mitsubishi heavy FDT45KX  | 3,71                   | 4,5                     | Seminario 4    |
| UD            | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 2,32                   | 3,6                     | Despacho 9     |
| UD            | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 2,32                   | 3,6                     | Despacho 10    |
| UD            | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 2,32                   | 3,6                     | Despacho 11    |
| UD            | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 2,32                   | 3,6                     | Despacho 12    |
| UD            | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 2,32                   | 3,6                     | Despacho 13    |
| UD            | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 2,32                   | 3,6                     | Despacho 14    |
| UD            | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 2,32                   | 3,6                     | Despacho 15    |
| UD            | Interior tipo pared     | 1         | 1      | mitsubishi heavy FDT36KX  | 2,32                   | 3,6                     | Despacho 16    |
| <b>RAMA 3</b> |                         | <b>5</b>  |        |                           |                        |                         |                |
| UD            | RECUPERADOR ENTALPICO   | 1         | baja   | WOLF                      | 23,19                  |                         | CI-1           |
| UD            | Interior tipo techo     | 2         | baja   | mitsubishi heavy FDT56KX  | 5,84                   | 5,6                     | Laboratorio 1  |
| UD            | Interior tipo techo     | 2         | baja   | mitsubishi heavy FDT45KX  | 3,71                   | 4,5                     | Laboratorio 2  |
|               |                         | <b>26</b> |        |                           |                        |                         |                |

|                  |                         |            |               |  |                           |                               |                                |                  |
|------------------|-------------------------|------------|---------------|--|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------|
| <b>EXTERIOR</b>  | Exterior bomba de calor | 3          |               |  | mitsubishi fdca 1360HKXE4 | 136                           |                                | Cubierta         |
|                  | Exterior bomba de calor | 1          |               |  | mitsubishi fdca 224HKXE4  | 22,4                          |                                | Cubierta         |
| <b>SISTEMA 4</b> | <b>Denominación</b>     | <b>uds</b> | <b>planta</b> |  | <b>modelo</b>             | <b>Potencia (kw) proyecto</b> | <b>Potencia (kw) instalada</b> | <b>Situación</b> |
| <b>RAMA 1</b>    |                         | 4          |               |  |                           |                               |                                |                  |
| UD               | Interior tipo techo     | 4          | baja          |  | mitsubishi heavy FDT56KX  | 4,64                          | 5,6                            | Sala vigilancia  |

# ANEXO 4

## MÉRITOS ACADÉMICOS

- Anexo 4: Méritos académicos
  - 4.1. Jornadas doctorales
  - 4.2. Asistencia a Congresos
  - 4.3. Actividades docentes
    - 4.3.1. Cursos impartidos
    - 4.3.2. Clases impartidas

### **Anexo 4: Méritos académicos**

#### **4.1. Jornadas doctorales**

I Curso sobre Competencias transversales de los Doctorandos. Programa de Actividades de Formación Transversal. Universidad de Jaén. 2013.

I Jornada sobre Energías Renovables. 2018.

II Jornadas sobre Energías Renovables. 2019.



### CERTIFICADO DE APROVECHAMIENTO

Juan Jiménez Millán, Coordinador del "I Curso sobre Competencias Transversales de los Doctorados de la Universidad de Jaén", celebrado en Jaén del 19 al 28 de noviembre de 2013 e integrado por los contenidos que se indican en el anverso.

Certifica que:

**D. Jose Adolfo Lozano Miralles**

**ha superado las seis actividades formativas** que componen el curso organizado por la Escuela de Doctorado de la Universidad de Jaén con una duración total de **60 horas**.


Las actividades formativas fueron evaluadas y calificadas siguiendo los procedimientos de control establecidos por la Escuela de Doctorado para los Programas de Doctorado regulados por el R.D.99/2011. La calificación de cada una de estas actividades se indica en el anverso de este certificado.

Jaén, 3 de febrero de 2014



Juan Jiménez Millán  
Director de la Escuela de Doctorado  
Universidad de Jaén



|  <b>I Curso sobre Competencias Transversales de los Doctorados</b><br><b>Programa de Actividades de Formación Transversal</b><br><b>Universidad de Jaén, del 19 al 28 de noviembre de 2013.</b>   |       |      |
|--|-------|------|
| <b>CONTENIDOS, DURACIÓN Y CALIFICACIÓN</b>   |       |      |
| <b>Actividad formativa: Marco General del Doctorado.</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Legislación general que regula el Doctorado. M<sup>a</sup> Angeles Peinado Herreros.</li> <li>• Normativa específica de la Universidad de Jaén. Juan Jiménez Millán.</li> <li>• Ética de la investigación científica. Esther Martínez Lara.</li> <li>• Metodologías de investigación en los grandes áreas del conocimiento (Mesa redonda). Juan Peragón Sánchez (Ciencias), Juan Gómez (Ingenierías), Ventura Salazar García (Humanidades), Jorge Lozano (Sociales y Jurídicas).</li> </ul>  | 10 h. | APTO |
| <b>Actividad formativa: Estructura de la investigación. Políticas de fomento.</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estructura de la investigación en España. Plan Nacional de I+D+i; Planes Regionales. Políticas de fomento de incorporación y contratación de investigadores al sistema español de Ciencia, Tecnología e Innovación. Marina Pilar Vilegas Gracia. Subdirectora General de Proyectos Investigación. Ministerio de Economía y Competitividad.</li> <li>• Estructura de la investigación en la Universidad de Jaén. Plan Propio. M<sup>a</sup> Angeles Peinado Herreros. Eulogio Castro Gallano.</li> <li>• Estructura de investigación en Europa. Espacio Europeo de Investigación (European Research Area, ERA). Fuentes de financiación. Programa Marco y otros programas europeos. José Rodrigo.</li> <li>• Infraestructuras Científico-Técnicas. Presentación y visita al Centro de Instrumentación de la Universidad de Jaén. Magdalena Martínez Callanero. Natividad Quesada Parodes.</li> </ul>                                       | 10 h. | APTO |
| <b>Actividad formativa: Elaboración y seguimiento de proyectos de investigación</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesa Redonda: Planteamiento de un proyecto de I+D. Determinación, reparto programación y coordinación de las tareas a realizar. Elaboración del presupuesto. Seguimiento de los aspectos científico-técnicos del proyecto. Informes periódicos e informe final. Pedro A. Ruiz Ortiz. Carlos María López Espadafor. Manuel Molinos Molinos.</li> <li>• Estructura y funciones de la Agencia Andaluza del Conocimiento. Evaluación. Factores clave en la evaluación de proyectos de investigación. Relaciones Internacionales. Pedro Bisbal. Soledad Rubio. Nevea Pascual. Agencia Andaluza del Conocimiento.</li> <li>• Gestión para el desarrollo de actividades de investigación. Servicio de Gestión de la Investigación. Estructura y Competencias. Oportunidades de financiación. Ejecución científica y económica de las actividades investigadoras. Casos prácticos. Roberto Fornes de la Casa. Lourdes Castro Ortega.</li> </ul> | 10 h. | APTO |
| <b>Actividad formativa: Comunicación, difusión y divulgación de la investigación</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Redacción, revisión y publicación de artículos científicos. Juan Manuel Rosas Santos.</li> <li>• Indicadores de evaluación científica. Índices bibliométricos para la evaluación de publicaciones y productividad. Ana Bálzar Gómez.</li> <li>• Divulgación de las actividades científicas a la sociedad. Eva Murgado Amesteros. Alicia Bares Lara.</li> <li>• Presentación pública de resultados científicos: presentaciones orales y pósters. Juan Jiménez Millán. África Yebra Rodríguez. Taller práctico. África Yebra Rodríguez.</li> </ul>   | 10 h. | APTO |
| <b>Actividad formativa: Inserción profesional: orientación para el empleo.</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Contratos de doctores en el marco de la ley de la Ciencia. Juan Jiménez Millán.</li> <li>• La estructura académica e investigadora en España, procesos de acreditación. Juan Jiménez Millán. África Yebra Rodríguez.</li> <li>• Las competencias profesionales de los doctores. El Currículo. Incompatibilidades con otras carreras universitaria y profesional. Juan Jiménez Millán.</li> <li>• Incorporación de doctores a entidades no académicas. Salvador Ballesteros.</li> <li>• Preparación de un proyecto investigador para una empresa. Pedro P.</li> <li>• Creación de empresas. Fermín Lucena Muñoz.</li> </ul>   | 10 h. | APTO |
| <b>Actividad formativa: Transferencia de conocimiento.</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Colaboración en actividades de I+D+i con instituciones privadas y públicas. Legislación básica. Establecimiento de acuerdos de colaboración. Francisco Alcalá Olib. Rafael Jiménez.</li> <li>• Mesa Redonda sobre Transferencia. Antonio Ortiz. Antonio Caruz. M<sup>a</sup> José Campos Sañol.</li> <li>• Valorización de resultados de investigación. Propiedad Industrial e Intelectual. Protección de resultados de investigación. Legislación de aplicación. Estrategias de explotación y/o comercialización: spin offs, acuerdos de licencia... Fermín Lucena Muñoz.</li> </ul>  | 10 h. | APTO |







## CERTIFICATE OF ATTENDANCE

This is to certify that

*José Adolfo Lozano Miralles*

attended to the International Conference on GREEN CONSTRUCTION  
ICGC2019, held in University of Cordoba (Spain) from 8<sup>th</sup> to 9<sup>th</sup> of April  
2019.

Cordoba (Spain), 9<sup>th</sup> of April 2019.

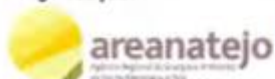


Enrique Fernández Ledesma  
Secretary of ICGC2019





Organização:



Financiamento:



Parceiros:



CIEMAT'19

### **4.3. Actividades docentes**

#### **4.3.1. Clases impartidas**

Clases prácticas en la Asignatura de Gestión del Mantenimiento industrial. 2017-18.

Clases prácticas en la Asignatura de Gestión del Mantenimiento industrial. 2018-19.

Clases prácticas en la Asignatura de Gestión del Mantenimiento industrial. 2019-20.

#### **4.3.2. Cursos impartidos**

Curso de construcción y fabricación sostenible. Análisis de Ciclo de Vida. Año 2019-20.

## BIBLIOGRAFÍA y REFERENCIAS

[1] Martí, I., Rague, X. (2010) Edificación Sostenible, X Congreso nacional de medioambiente CONAMA. Madrid.

[2] UNE 150301 (2003). Gestión ambiental del proceso de diseño y desarrollo, Ecodiseño. AENOR, Madrid.

[3] Parellada, Á. M. (2008) Eficiencia energética. Lámina 1. Relación entre Directivas Europeas e iniciativas de la Administración Española.

[4] World Business Council for Sustainable Development (1992). Changing Course: A Global Business Perspective on Development and the Environment". Congreso internacional de Río de Janeiro.

[5] Armiño, K. y Alberdi, J. Capital social. Agosto de 2017. [www.dicc.hegoa.ehu.es](http://www.dicc.hegoa.ehu.es)

[6] Biosfera y Tecnosfera: dos metabolismos en el mundo. [www.ecointeligencia.com](http://www.ecointeligencia.com)

[7] Furness, D. (2016). Earth's Technosphere is massive and could mean problems for the planet. [www.digitaltrends.com](http://www.digitaltrends.com)

[8] Humans and technology in the Anthropocene: six rules. [www.sagepub.com](http://www.sagepub.com)

[9] Zahara, A. y Peterson, J. (2016). Anthropocene adjustments: discarding the Technosphere.

[10] Directiva 2002/91/CE, relativa a la eficiencia energética en los edificios, también conocida como EPBD por sus siglas en inglés (Energy Performance of Buildings Directive), publicada el 4 de enero de 2003. Modificada y actualizada por la Directiva 2018/844 del 30 de Mayo de

2018, que modificaba las Directivas 2010/31/UE y la 2012/27/UE, relativas a la eficiencia energética de los edificios y a la eficiencia energética respectivamente.

[11] <https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/Paginas/procedimientos-certificacion-proyecto-terminados.aspx>.

[12] ISO/DIS 15392 (2008) Sostenibilidad en la construcción de edificios – Principios generales. Organización Internacional.

[13] Riezmik, N., Hernández, A. (2005) Análisis de Ciclo de Vida. Biblioteca Ciudades para un Futuro más sostenible.

[14] WWF (2013) Informe de emisiones de Gases de Efecto invernadero en España 1990-2012. [http://awsassets.wwf.es/downloads/informe\\_de\\_emisiones\\_de\\_gei\\_en\\_espana\\_1990\\_2012.pdf](http://awsassets.wwf.es/downloads/informe_de_emisiones_de_gei_en_espana_1990_2012.pdf).

[15] IDAE. Instituto para la diversificación y Ahorro de la Energía. Estudios, informes y estadísticas. Balances de energía final (1990-2015).

[16] Estudio de la Sostenibilidad energética en diferentes tipos de edificios de un campus universitario. Tesis doctoral. Cristina Cano Herrador. Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid. 2010.

[17] ISO 50001 (2011). Sistema de Gestión energética. Organización internacional.

[18] IDAE (2011) 2º Plan nacional de ahorro y eficiencia energética 2011-2020.

[19] RITE. (1998). Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios y sus instrucciones complementarias (ITE). Directiva 1751/1998. 31 Julio. <https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Paginas/IndexDocumentosReconocidos.aspx>.

- [20] <https://www.boe.es/doue/2012/315/L00001-00056.pdf>.
- [21] <https://www.ecointeligencia.com/2016/05/edificio-energia-cero-zeb/>.
- [22] Código Técnico de la Edificación. <https://www.codigotecnico.org/>. (2018). España.
- [23] Ministerio de Fomento Área de vivienda. <https://www.fomento.gob.es/vivienda>.
- [24] <https://www.cscae.com/index.php/conoce-cscae/area-tecnica/todas-las-noticias43/3543-edificios-de-consumo-de-energia-casi-nulo-nzeb-un-gran-reto-del-sector-de-la-construccion-en-europa>.
- [25] Lucas, I. B. (2008). Aportes de la Arquitectura Sustentable en el sector residencial sobre el balance energético-ambiental argentino. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12, p. 07-17.
- [26] Acosta, D., & Cilento, A. (2012). Edificaciones sostenibles: estrategias de investigación y desarrollo. *Tecnología y Construcción*, 21 (1).
- [27] Neila, F. J. (2004). *Arquitectura bioclimática: en un entorno sostenible*. Madrid: Munillalería.
- [28] BPIE (Building Performance Institute Europe). 2015 "Nearly Zero Energy Buildings Definitions across Europe". Disponible en [http://bpie.eu/uploads/lib/document/attachment/128/BPIE\\_factsheet\\_nZEB\\_definitions\\_across\\_Europe.pdf](http://bpie.eu/uploads/lib/document/attachment/128/BPIE_factsheet_nZEB_definitions_across_Europe.pdf).
- [29] <https://www.fomento.gob.es/arquitectura-vivienda-y-suelo/urbanismo-y-politica-de-suelo/actividad-internacional/union-europea/la-declaracion-de-toledo-2010-y-el-impulso-a-la-regeneracion-urbana-integrada>.
- [30] Datos energéticos de Andalucía para el año 2017. [https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/situacion\\_energetica\\_2017\\_0.pdf](https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/situacion_energetica_2017_0.pdf).

[31] Alavedra, P., Domínguez, J., Gonzalo, E., & Serra, J. (1997). La construcción sostenible: el estado de la cuestión. *Informes de la Construcción*, 49(451), p. 41- 47.

[32] Vázquez Espí, M. (2001). Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales. *Informes de la Construcción*, 52(471), p. 29-43.

[33] <https://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Havana/pdf/CAp3.pdf>.

[34] Ortiz, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the Construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, 23(1), p. 28-39.

[35] P. Alavedra, J. Domínguez, E. Gonzalo y J. Serra, «La construcción sostenible: el estado de la cuestión,» de *Informes de la Construcción*, 49, 1997, p. 41-47 (451).

[36] M. Vázquez, «Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales.,» *Tecnología y Construcción*, 21 (3), 2001.

[37] Chiminelli, A. (2009) *Ecodiseño en el contexto del desarrollo de productos*. Centro de simulación computacional. Instituto tecnológico de Aragón.

[38] *Systems Simulation: The art and Science*". R.E. Shannon. Prentice-Hall, Universidad de Michigan, 1975.

[39] Arana-Landín, G., Cilleruelo-Carrasco, E., & Aldasoro-Alustiza, J. C. (2012). ISO 14006. Experiencias previas de estudios de arquitectura que han adoptado el estándar de ecodiseño UNE 150301: 2003. *Informes de la Construcción*, 64(527), p. 319-330.

[40] <https://www.juntadeandalucia.es/organismos/haciendaindustriayenergia/areas/energia/datos-energeticos.html>

[41] «Declaración de Política en Sostenibilidad Ambiental de la Universidad de Jaén» Jaén, 2014.

[41] <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluación-ambiental/temas/economía-circular/estrategia/>

[42] Eurostat, SGE. Ministerio de Industria, Energía y Turismo

[43] Declaración de política en Sostenibilidad ambiental de la Universidad de Jaén. Jaén 23 de junio de 2014. D. Manuel Parras Rosa. Rector Magnífico de la Universidad de Jaén.

[44] <https://new.usgbc.org/leed>

[45] A. Sharma, A. Saxena, M. Sethi y V. Shree, «Life Cycle Assessment of buildings: a review» Renewable and Sustainable Reviews., 2011

[46] Manual Técnico de la empresa Mitsubishi Heavy industries, Ltd. Lumelco. Pág. 14. Coeficiente COP para calefacción 5,45 minorizado.

[47] Manual Técnico de la empresa Mitsubishi Heavy industries, Ltd. Lumelco.

[48] AENOR. Agencia para la Normalización. [www.aenor.es](http://www.aenor.es). Madrid: AENOR, 1996.

[49] [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_17\\_Guia\\_tecnica\\_instalaciones\\_de\\_climatizacion\\_con Equipos\\_autonomos\\_5bd3407b.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_17_Guia_tecnica_instalaciones_de_climatizacion_con Equipos_autonomos_5bd3407b.pdf)

[50] <https://www.codigotecnico.org/index.php/cheq4.html>

[51] <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-recursos/menu-aplicaciones/282-herramienta-unificada-lider-calener>

[52] <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-actualidad/362-actualizacion-hulc-marzo2017.html>

[53] P. Huedo y B. López-Mesa, «Revisión de herramientas de asistencia a la selección de soluciones constructivas sostenibles en edificación.» Informes de edificación, nº 69, pp. (529) 77-88, 2013.

[54] A. Sharma, A. Saxena, M. Sethi y V. Shree, «Life Cycle Assessment of buildings: a review Renewable and Sustainable Reviews. 2011.

[55] Udela, R. (2009). Análisis del ciclo de vida de los edificios. Taller de Construcción III. <http://www.monografias.com/trabajos88/analisis-del-ciclo-vida-edificios/analisis-del-ciclo-vida-edificios.shtml#ixzz2iAFC5g2A>.

[56] Zabalza Bribián, I., Aranda Usón, A., & Scarpellini, S. (2009). Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment*, 44(12), p. 2510-2520.

[57] Hu, S. C., Shiu, A., Chuang, H. C., & Xu, T. (2012). Life cycle assessment of high-technology buildings: Energy consumption and associated environmental impacts of wafer fabrication plants. *Energy and Buildings*.

[58] Basterra, L. A. (2009). Construcción de estructuras de madera. Universidad de Valladolid. Valladolid.

[59] Marín, T. (2013) Etiquetas ecológicas. Ecohabitar: Bioconstrucción, permacultura y transición. Recuperado de: <http://www.ecohabitar.org/etiquetas-ecologicas/>

[60] Villasuso, B. M. (1997). La Madera en la Arquitectura. Argentina: El Ateneo.

[61] Confederación Española de Empresarios de la Madera; Centro tecnológico de la Madera; Ministerio de Fomento (2011). La madera en construcción y Análisis de ciclo de vida.

[62] Llorente, I., Vignote, S. & Martínez Rojas, I. (2009). Análisis del Ciclo de vida de la madera como material alternativo. Madera y cambio climático. Gobierno Vasco. San Sebastián 128p. ISBN: 978-84-457-2879-5.

[63] Contreras, W., Cloquell, V. & Owen, ME. (2007). Alcances y limitaciones del uso del método de Análisis de ciclo de vida para la evaluación de impactos medioambientales en la industria forestal. *Boletín de información técnica* nº 249, p. 74-48.

[64] [https://es.wikipedia.org/wiki/ISO\\_14000](https://es.wikipedia.org/wiki/ISO_14000)

[65] Normas ISO. <https://www.iso.org/home.html>

- [66] Martínez, A. G., & Casas, J. N. (2012). Life cycle assessments of three dwellings in Andalusia (Spain): the significance of the regional context. *Science–Future of Lituania/Mokslas–Lietuvos Ateitis*, 4(2), p. 06-112
- [67] (Steen B. 1999a, 1999b). Steen, B. (1999a). A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000. General system characteristics. Gothenburg. Chalmers University of Technology, p. 67. Disponible en [http://pre.nl/simapro/impact\\_assessment.methods.htm](http://pre.nl/simapro/impact_assessment.methods.htm).
- [68] Huedo, P., & López-Mesa, B. (2013). Revisión de herramientas de asistencia en la selección de soluciones constructivas sostenibles de edificación. *Informes de la Construcción*, 65(529), p. 77-88.
- [69] Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. (2010). Life cycle energy Analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42(10), p. 1592-1600.
- [70] Steen, B. (1999b). A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000. General system characteristics. Gothenburg. Chalmers University of Technology, p.67. Disponible en [http://pre.nl/simapro/impact\\_assessment.methods.htm](http://pre.nl/simapro/impact_assessment.methods.htm).
- [71] PRÉ CONSULTANTS (2007): Introduction to LCA with SimaPro. Amersfoort, 2007.
- [72] Steen, B. (1999a). A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000. General system characteristics. Gothenburg. Chalmers University of Technology, p. 67. Disponible en [http://pre.nl/simapro/impact\\_assessment.methods.htm](http://pre.nl/simapro/impact_assessment.methods.htm).
- [73] Alias, H. M. (2003). Estudio de la eficiencia ambiental del uso de madera en la construcción de viviendas en el NEA en base al análisis energético y de Ciclo de Vida (Doctoral dissertation, Tesis Maestría en Gestión Ambiental. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Chaco, Argentina).
- [74] Scheuer, C., Keoleian, G. A., & Reppe, P. (2003). Life cycle energy and environmental performance of a new university building: Modeling challenges and design implications. *Energy and buildings*, 35(10), p. 1049-1064.
- [75] Categorías de impacto de la metodología EPS 2000 (Environmental Priority Strategies).

[76] J. Guinée, , M. Gorrée, R. Heijungs, R. Klein, A. de Koning y L. van Oers, Life Cycle Assessment. An operational guide to the ISO standards. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

[77] Analysis of pelletizing from cron cob waste. Journal of enviromental management. María Teresa Miranda García-Cuevas, Francisco José Sepúlveda Justo, José Ignacio Arranz Barriga, Irene Montero Puertas, Carmen Victoria Rojas Moreno. Volumen: 228, Páginas: desde 303 a 311. Elsevier. 2018. ISSN: 0301-4797.

[78] Physical-energy characterization of microalgae scenedesmus and experimental pellets. María Teresa Miranda García-Cuevas, Francisco José Sepúlveda Justo, José Ignacio Arranz Barriga, Irene Montero Puertas, Carmen Victoria Rojas Moreno. Volumen: 226, Páginas: desde 121 a 126. Elsevier. 2018. ISSN: 0016-2361.

[79] A review of pellets from different sources. María Teresa Miranda García-Cuevas, Irene Montero Puertas, Francisco José Sepúlveda Justo, José Ignacio Arranz Barriga, Carmen Victoria Rojas Moreno. Sergio Nogales-Delgado. Volumen: 8-4, Páginas: desde 1413 a 1427. MDPI AG. 2015. ISSN: 1996-1944.

[80] Eficiencia energética de edificios. Certificación energética F. Javier Rey, Eloy Velasco, Javier M. Rey Hernández. Edit. Paraninfo 2018

[81] Eficiencia energética de edificios. Gestión energética ISO 50001 F. Javier Rey, Eloy Velasco, Javier M. Rey Hernández. Edit. Paraninfo 2018

[82] Rey F.J., Martín-Gil J., Velasco E., Pérez D., Varela F., Palomar J.M., & Dorado, M.P. (2004). Life Cycle Assessment Environmental Cost Analysis of Heat Pumps. Volumen 21, p. 23-30.

[83] B. Steen, «A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Versión 2000-General system characteristics» p. 67-70.

[84] Marrero, M., Martínez-Escobar, L., Mercader, M. P., & Leiva, C. (2013). Minimización del impacto ambiental en la ejecución de fachadas mediante el empleo de materiales reciclados. Informes de la Construcción, 65(529), p. 89-97.

[85] Rivela, B., Cuerda, I., Olivieri, F., Bedoya, C., & Neila, J. (2012). Análisis de Ciclo de Vida para el ecodiseño del sistema Intemper TF de cubierta ecológica aljibe. *Materiales de Construcción*, p. 60-98.

[86] Idea. (2016). Ministerio de Industria, turismo y comercio. Mapa tecnológico: calor y frío renovables. Área de tecnología: biomasa y residuos.

[87] P. Fullana y R. Puig, Análisis de Ciclo de Vida, Barcelona, España: Rubes, 1997, p. 144.

[88] I. P. o. C. Change, *Climate Change*, Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.

[89] M. Goedkoop y R. Spriensma, «The eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment: Methodology annex. 17 April» p. 142, 2000a.