



Universidad de Valladolid

PROGRAMA DE DOCTORADO EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL

TESIS DOCTORAL:

**EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE
SISTEMAS DE ENERGÍAS RENOVABLES
APLICADOS A EDIFICIOS PRÓXIMOS A
CERO ENERGÍA**

Gloria Yaneth Palacios Jaimes

Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica
Escuela de Ingenierías Industriales
Universidad de Valladolid

Septiembre 2016

Documento maquetado con T_EX¹S v.1.0+.



Universidad de Valladolid

PROGRAMA DE DOCTORADO EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL

**EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE
SISTEMAS DE ENERGÍAS RENOVABLES
APLICADOS A EDIFICIOS PRÓXIMOS A
CERO ENERGÍA**

Presentada por Gloria Yaneth Palacios Jaimes para optar
al grado de
Doctora por la Universidad de Valladolid

Dirigida por los Doctores
Francisco Javier Rey Martínez y Pablo Martín Ramos

Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica
Escuela de Ingenierías Industriales
Universidad de Valladolid

Septiembre 2016

Copyright © Gloria Yaneth Palacios Jaimes

*A mis padres fallecidos, que siguen espiritualmente a mi lado
y
a toda mi familia*

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo económico del gobierno venezolano y su programa de ayuda a los estudiantes en el exterior.

También me gustaría agradecerle a los profesores Eloy Velasco Velasco, Francisco Javier Rey Martínez por su continua orientación.

A la profesora Simone Abram de Durham University, por su sugerencia para incorporar el muro Trombe como sistema de ventilación.

A los profesores Ignacio Alonso Fernández Coppel, Pablo Martín Ramos y Jesús Martín Gil por sus contribuciones para la finalización de la Tesis.

A mi familia, cuyo amor ha sido aliciente a lo largo de mis años fuera de casa. A mis difuntos padres, Carlos Palacios y Emelina Jaimes por su ejemplo de vida, sus enseñanzas que trascienden e inspiran y que se convierten en motor para seguir especialmente en momentos de dificultades. Agradezco también a mi marido Gonzalo por su amor y apoyo.

Y para terminar, agradezco a los creadores de la Plantilla TeXiS, Gómez y Gómez porque gracias al acceso público a su trabajo, ha sido posible la escritura de este documento en Latex.

Resumen

Considerando que el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de las instalaciones y procesos se ha constituido en uno de los referentes en los estudios medio-ambientales, el presente trabajo realiza la Evaluación del Ciclo de Vida de sistemas de energías renovables, como, fotovoltaica, solar térmica, geotermia y sistema pasivo con muro Trombe, a ser aplicados al edificio Aulario de la Universidad de Valladolid.

Se presentan los fundamentos básicos del ACV, las características constructivas del edificio Aulario y las características de los sistemas actualmente usados. Posteriormente, se implementan los sistemas de energías renovables y se realiza la evaluación comparativa de los impactos ambientales usando la metodología EPS2000. Se realiza el análisis de sensibilidad de la metodología usada, comparando los resultados con la metodología Eco-Indicador 99, ambas metodologías implementadas en el software SimaPro8.

El estudio permitirá entre otros, obtener un edificio NZEB, (esto es, un edificio cercano a energía cero), la evaluación del desempeño energético actual, el análisis de la eficiencia energética de los sistemas de energías renovables propuestos y la evaluación de los impactos ambientales comparativos de los diferentes sistemas.

El presente trabajo pretende ser un referente de estudios de eficiencia y ahorro energético en edificaciones, pudiéndose extrapolar su aplicación a otros sectores industriales y comerciales.

Palabras clave: ahorro energético en edificaciones, certificación de edificios, calificación energética, eficiencia energética, edificios NZEB.

ABSTRACT

As Life Cycle Assessment (LCA) of facilities and processes has become a referent in environmental studies, the work presented herein has used this technique to analyze the life-cycle of several renewable energy systems -namely photovoltaics, solar thermal, geothermal and passive Trombe wall systems- as regards their application to the Lecture Hall building at the University of Valladolid (Spain).

The fundamentals of LCA, the constructive features of the Lecture Hall building and the characteristics of the systems currently used are discussed first. Subsequently, the ad-hoc design of the renewable energy systems and a benchmark of their associated environmen-

tal impact using EPS2000 methodology are presented. A sensitivity analysis of the chosen methodology has also been conducted, by comparing the results with those obtained with Eco-Indicator 99, using SimaPro8 software for the implementation of both methodologies.

This study aims not only to achieve a nearly-zero energy (NZEB) building, but also to assess the energy performance of the systems currently in use, to analyze the energy efficiency of the proposed renewable systems and to evaluate the comparative environmental impacts of the various systems.

This paper aims to be a significant contribution to the studies on efficiency and energy savings in existing buildings, so that its application may be extrapolated to other industrial and commercial sectors.

Keywords: building certification; energy rating; energy savings in buildings; energy efficiency, NZEB buildings.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----------|
| Agradecimientos | VII |
| Resumen | IX |
| I MARCO TEÓRICO | 1 |
| 1. Introducción | 3 |
| 1.1. La problemática de la gestión sostenible de los edificios | 3 |
| 1.1.1. Consumo energético en los edificios | 3 |
| 1.1.2. Fuentes de contaminación de los edificios | 4 |
| 1.1.3. Certificación energética de edificios | 4 |
| 1.1.4. ¿Es posible alcanzar edificios cercanos a cero energía? | 5 |
| 1.1.5. Tecnologías convencionales y de nueva aparición | 5 |
| 1.2. Problemática social de la energía | 6 |
| 1.3. Análisis de ciclo de vida | 6 |
| 1.4. Conclusiones a la disertación sobre la gestión sostenible de los edificios | 7 |
| 1.5. Objetivos del estudio | 7 |
| 1.5.1. Objetivos específicos | 8 |
| 1.5.2. Alcance del estudio | 8 |
| 1.5.3. Metodología | 8 |
| 2. Análisis de Ciclo de Vida | 11 |
| 2.1. Análisis de ciclo de vida. Definición | 11 |
| 2.2. Análisis de ciclo de vida. Orígenes y evolución | 13 |
| 2.3. Metodología del análisis de ciclo de vida según Normas ISO | 15 |
| 2.4. ISO 14040. ACV. Principios y marco de referencia | 16 |
| 2.4.1. Descripción general del análisis de ciclo de Vida | 16 |
| 2.5. ISO 14044. Gestión ambiental. ACV. Requisitos y directrices | 20 |
| 2.5.1. Definición del objetivo y del alcance | 20 |
| 2.5.2. Análisis de inventario del ciclo de vida (ICV) | 21 |
| 2.5.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) | 21 |
| 2.6. Categorías de impacto medioambiental | 24 |
| 2.7. Herramientas informáticas para el ACV | 25 |
| 2.7.1. Elección de la herramienta informática para el ACV | 29 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 2.8. | Metodología para la evaluación de los impactos ambientales | 31 |
| 2.8.1. | La metodología EPS o estrategias de prioridad ambiental | 32 |
| 3. | Edificios Próximos a Cero Energía | 35 |
| 3.1. | Edificios próximos a cero energía. Definición | 35 |
| 3.2. | Reducción de la demanda energética en los edificios | 37 |
| 3.2.1. | Eficiencia energética | 37 |
| 3.3. | Suministro de energía para edificios NZEB | 38 |
| 3.4. | Análisis de ciclo de vida en edificios | 41 |
| 3.4.1. | La energía primaria y secundaria | 41 |
| 3.5. | Huella de carbono | 43 |
| 3.5.1. | ACV en edificios cercanos a cero energía | 44 |
| II SITUACIÓN ACTUAL DE LAS INSTALACIONES DEL EDIFICIO BASE Y MEJORAS USANDO INSTALACIONES CON ENERGÍAS RENOVABLES | | 49 |
| 4. | Sistema de Iluminación Actual: Electricidad de la Red | 51 |
| 4.1. | Consumo eléctrico del edificio Aulario | 52 |
| 4.2. | Caso de estudio | 53 |
| 4.3. | Análisis de ciclo de vida del sistema de iluminación con electricidad de la red | 53 |
| 4.3.1. | Desempeño ambiental del sistema de iluminación con electricidad de la red | 53 |
| 4.3.2. | Impactos ambientales del sistema de iluminación con electricidad de la red | 53 |
| 4.4. | Apendice 1. Sistema iluminación edificio Aulario. Características | 56 |
| 5. | Mejoras con Energía Solar Fotovoltaica para Iluminación | 57 |
| 5.1. | Energía solar fotovoltaica. Definición | 57 |
| 5.2. | Situación actual de los espacios del edificio Aulario | 58 |
| 5.2.1. | Habitabilidad y localización del sistema fotovoltaico | 60 |
| 5.2.2. | Módulos fotovoltaicos del edificio Aulario. Características | 61 |
| 5.2.3. | Energía generada | 62 |
| 5.2.4. | Desempeño ambiental del sistema de iluminación con parasoles fotovoltaicos | 63 |
| 5.2.5. | Análisis de ciclo de vida del sistema de iluminación con paneles fotovoltaicos | 63 |
| 6. | Sistema de Ventilación. Situación actual | 65 |
| 6.1. | Sistema de ventilación | 65 |
| 6.2. | Calidad de aire en los edificios | 66 |
| 6.2.1. | Calidad del aire interior | 67 |
| 6.2.2. | Calidad del aire exterior | 67 |
| 6.2.3. | Filtración del aire exterior | 67 |
| 6.2.4. | Aire de extracción | 68 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 6.2.5. | Recuperación de calor del aire de extracción | 68 |
| 6.2.6. | Condiciones interiores | 69 |
| 6.3. | Sistema de ventilación mecánica | 70 |
| 6.3.1. | Ventilador mecánico convencional. Características | 71 |
| 6.3.2. | Sistema de ventilación mecánica. Dimensionamiento | 72 |
| 6.3.3. | Desempeño energético del sistema de ventilación mecánica | 73 |
| 6.3.4. | Desempeño ambiental del sistema de ventilación mecánica | 74 |
| 6.4. | Apéndice 1. Diseño de los conductos de aire del edificio Aulario | 80 |
| 6.4.1. | Características geométricas del edificio Aulario | 80 |
| 6.4.2. | Caudal de ventilación del edificio Aulario | 82 |
| 6.4.3. | Caudales de ventilación en cada tramo | 84 |
| 6.4.4. | Diseño del conducto principal | 87 |
| 6.4.5. | Diseño de las derivaciones | 93 |
| 6.4.6. | Dimensiones de las derivaciones y subderivaciones | 95 |
| 6.5. | Apéndice 2. Dimensionamiento de la unidad de tratamiento de aire | 99 |
| 6.5.1. | Elección de la unidad de tratamiento de aire | 102 |
| 6.5.2. | Elección de difusores y compuertas | 103 |
| 7. | Mejoras con Energía Solar para Ventilación | 105 |
| 7.1. | Sistemas de ventilación con ventilador solar | 105 |
| 7.1.1. | Ventilador solar. Características | 107 |
| 7.1.2. | Sistema de ventilación con ventilador solar. Dimensionamiento | 108 |
| 7.1.3. | Desempeño energético del sistema de ventilación con ventilador solar | 109 |
| 7.1.4. | Desempeño ambiental del sistema de ventilación con ventilador solar | 110 |
| 7.2. | Sistema de ventilación con colector solar de aire | 116 |
| 7.2.1. | Colector solar de aire. Características | 116 |
| 7.2.2. | Dimensionamiento del sistema de ventilación con colector solar de aire. Tamaño de la instalación | 118 |
| 7.2.3. | Desempeño energético del sistema de ventilación con colector solar de aire | 119 |
| 7.2.4. | Desempeño ambiental del sistema de ventilación con colector solar de aire | 120 |
| 8. | Mejora con Sistema Bio-climático para Ventilación. Muro Trombe | 127 |
| 8.1. | Sistema de ventilación bioclimático con muro Trombe | 127 |
| 8.1.1. | Diseño y desarrollo térmico de un muro Trombe | 127 |
| 8.1.2. | Características del sistema de ventilación con muro Trombe | 136 |
| 8.1.3. | Propuestas de mejoras en el sistema con muro Trombe | 138 |
| 8.1.4. | Impactos ambientales comparativos de diferentes clases de muro Trombe | 138 |
| 8.1.5. | Dimensionamiento. Tamaño del sistema bioclimático | 140 |
| 8.1.6. | Desempeño energético del sistema de ventilación bioclimático con muro Trombe | 141 |
| 8.1.7. | Desempeño ambiental del sistema de ventilación bioclimático con muro Trombe | 142 |
| 8.2. | Nomenclatura y Abreviaciones | 149 |

| | |
|--|------------|
| 9. Sistema de Calefacción con Caldera de Gasóleo | 151 |
| 9.1. Sistema de calefacción actual con caldera de gasóleo | 151 |
| 9.1.1. Instalación térmica | 151 |
| 9.1.2. Red de distribución y consumo | 158 |
| 9.2. Fase de montaje del sistema de calefacción con caldera de gasóleo | 165 |
| 9.2.1. Características del sistema de calefacción con caldera de gasóleo | 165 |
| 9.3. Fase de uso del sistema de calefacción con caldera de gasóleo | 168 |
| 9.3.1. Evaluación energética del edificio Aulario. Situación actual | 168 |
| 9.3.2. Calificación energética del edificio Aulario. Situación actual | 170 |
| 9.3.3. Consumo térmico del edificio Aulario | 172 |
| 9.4. Fase de disposición final del sistema de calefacción con caldera de gasóleo . . | 173 |
| 9.5. Análisis de ciclo de vida del sistema de calefacción con caldera de gasóleo . . | 174 |
| 9.5.1. Impactos ambientales del sistema de calefacción con caldera de gasóleo | 174 |
| | |
| 10. Mejoras con Bomba de Calor Geotérmica para Calefacción | 179 |
| 10.1. Energía Geotérmica. Definición | 179 |
| 10.1.1. Clasificación de los yacimientos geotérmicos | 179 |
| 10.1.2. Temperatura del terreno | 181 |
| 10.1.3. Potencial geotérmico mundial | 183 |
| 10.1.4. Energía geotérmica en España | 185 |
| 10.2. Bomba de Calor | 186 |
| 10.2.1. Rendimiento de la bomba de calor | 187 |
| 10.2.2. Bomba de calor y avances tecnológicos | 187 |
| 10.3. Bomba de calor geotérmica | 188 |
| 10.3.1. Principales componentes de un sistema de calefacción geotérmico . . . | 189 |
| 10.4. Diseño del sistema de calefacción geotérmico | 192 |
| 10.4.1. Elección de la bomba de calor geotérmica | 194 |
| 10.4.2. Diseño del intercambiador geotérmico | 196 |
| 10.4.3. Herramientas informáticas para el diseño del intercambiador geotérmico | 202 |
| 10.4.4. Software Earth Energy Designer | 203 |
| 10.4.5. Radiadores. Elementos adicionales | 228 |
| 10.4.6. Elección de la bomba de circulación | 230 |
| 10.4.7. Depósito de acumulación | 231 |
| 10.5. Fase de montaje del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica . . | 233 |
| 10.5.1. Características del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica | 233 |
| 10.6. Fase de uso del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica | 235 |
| 10.6.1. Bomba de calor geotérmica. Energía consumida. | 235 |
| 10.6.2. Bomba de circulación. Energía consumida. | 236 |
| 10.6.3. Sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica. Energía consu- | |
| mida durante la fase de uso | 236 |
| 10.6.4. Sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica. Energía generada | 237 |
| 10.7. Fase de disposición final del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica | 237 |
| 10.7.1. Disposición final de los materiales | 237 |
| 10.8. Análisis de ciclo de vida del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica | 240 |

| | |
|---|------------|
| 10.9. Nomenclatura y abreviaturas | 244 |
| III IMPACTOS AMBIENTALES COMPARATIVOS DEL EDIFICIO BASE Y EL EDIFICIO MEJORADO CON APORTE DE ENERGÍAS RENOVABLES | 245 |
| 11. Consideraciones finales. Impactos Ambientales Comparativos: Edificios Ba- se y Mejorado | 247 |
| 11.1. Resumen de la Tesis | 247 |
| 11.2. Objetivos generales alcanzados | 249 |
| 11.3. Objetivos específicos alcanzados | 251 |
| 11.4. Desempeño energético y ambiental de los sistemas de ventilación | 257 |
| 11.4.1. Desempeño energético de los sistemas de ventilación. Fase de uso . . . | 257 |
| 11.4.2. Desempeño ambiental de los sistemas de ventilación. Fase de uso . . . | 260 |
| 11.4.3. Análisis de sensibilidad del método usado en los sistemas de ventilación | 264 |
| 11.5. Desempeño energético y ambiental de los sistemas de calefacción | 266 |
| 11.5.1. Desempeño energético de los sistemas de calefacción | 266 |
| 11.6. Impactos ambientales comparativos de los sistemas de calefacción | 269 |
| 11.6.1. Análisis de sensibilidad del método usado en los sistemas de calefacción | 271 |
| 11.6.2. Impactos ambientales comparativos de los sistema de iluminación . . . | 273 |
| 11.6.3. Análisis de sensibilidad del método usado en los sistemas de iluminación | 275 |
| 11.7. Contribuciones científicas de la Tesis | 277 |
| 11.8. Perspectivas y trabajos futuros | 281 |
| IV CONCLUSIONES | 283 |
| 12. CONCLUSIONES | 285 |
| Bibliografía | 289 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| 1.1. Metodología seguida para la evaluación de los impactos ambientales comparativos del ciclo de vida de los sistemas de energías renovables. | 9 |
| 2.1. Fases de un ACV, según SETAC. Fuente:(Fullana y Puig, 1997) | 12 |
| 2.2. Fases de un ACV. Fuente:(ISO14040, 2006) | 12 |
| 2.3. Evolución histórica del ACV | 14 |
| 2.4. Ejemplo de un sistema del producto para el ACV. Fuente (ISO14040, 2006). . | 19 |
| 2.5. Ejemplo de un conjunto de procesos unitarios dentro de un sistema del producto. Fuente (ISO14040, 2006). | 19 |
| 2.6. Procedimientos simplificados para el análisis de inventario. Fuente (ISO14044, 2006). | 22 |
| 3.1. Estrategias pasivas y de eficiencia energética NZEB. Fuente:(Marszal, 2011). . | 37 |
| 3.2. Información general de las fuentes de suministro de energía renovable. Fuente:(Marszal, 2011). | 39 |
| 3.3. Posibles opciones de suministro de energía renovables y su integración en la red. Fuente:(Marszal, 2011). | 40 |
| 3.4. Acciones tendientes hacia los edificios de energía cero. Fuente:(Marszal, 2011). | 40 |
| 3.5. Ciclo de vida de la energía de un edificio. Fuente: (Cabeza et al., 2014). . . . | 45 |
| 4.1. Impactos ambientales del sistema de iluminación con electricidad de la red. Ponderación. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 54 |
| 5.1. Ubicación de paneles en el edificio Aulario. | 59 |
| 5.2. Módulos fotovoltaicos Glass-TEDLAR. | 61 |
| 5.3. Impactos ambientales del sistema de iluminación con electricidad generada por paneles fotovoltaicos. Ponderación. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 64 |
| 6.1. Esquema del sistema de ventilación mecánica. | 70 |
| 6.2. Ventilador mecánico. | 71 |
| 6.3. Impactos ambientales del sistema de ventilación mecánica. Fase de uso. Ponderación. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 75 |
| 6.4. Impactos ambientales de los equipos usados por el sistema de ventilación mecánica. Puntuación única.Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. . | 76 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.5. | Impactos ambientales debidos a la disposición final de los equipos usados por el sistema de ventilación mecánica. Puntuación única. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 77 |
| 6.6. | Impactos ambientales del sistema de ventilación mecánica. Ciclo de vida. Puntuación única. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 78 |
| 6.7. | Plano de la primera planta del edificio Aulario. | 80 |
| 6.8. | Plano de la planta baja del edificio Aulario. | 81 |
| 6.9. | Esquema de la red de conductos de ventilación del edificio Aulario. Por espacios. | 85 |
| 6.10. | Abaco. Rozamiento de conductos. | 89 |
| 6.11. | Esquema del proceso de tratamiento del aire de ventilación del edificio Aulario. | 101 |
| 6.12. | Unidad de tratamiento de aire. Marca DV Danvent. | 102 |
| 6.13. | Difusores de aire. Marca Innesa. | 103 |
| 6.14. | Compuerta Innesa CBAD. | 104 |
| 6.15. | Curva característica de la compuerta Innesa CBAD. | 104 |
| 7.1. | Esquema del sistema de ventilación con ventilador solar. | 106 |
| 7.2. | Ventilador solar compacto. | 107 |
| 7.3. | Impactos ambientales del ciclo de vida del sistema de ventilación con ventiladores solares. Fase de uso. Ponderación. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 111 |
| 7.4. | Impactos ambientales de los equipos usados por el sistema de ventilación con ventiladores solares. Puntuación única. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 112 |
| 7.5. | Impactos ambientales de la unidad de tratamiento de aire. Puntuación única. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 113 |
| 7.6. | Impactos ambientales del sistema de ventilación con ventiladores solares. Fase de disposición final. Puntuación única. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 113 |
| 7.7. | Impactos ambientales del sistema de ventilación con ventiladores solares. Ciclo de Vida. Puntuación única. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 114 |
| 7.8. | Esquema del sistema de ventilación con colector solar de aire. | 116 |
| 7.9. | Colector solar de aire SolarVenti. Fuente: (SolarVenti, 2011). | 117 |
| 7.10. | Impactos ambientales del sistema de ventilación con colectores solares de aire. Fase de uso. Ponderación. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 121 |
| 7.11. | Impactos ambientales de los equipos del sistema de ventilación con colectores solares de aire. Ponderación. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 122 |
| 7.12. | Impactos ambientales debidos a los materiales del colector solar de aire. Puntuación única. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 123 |
| 7.13. | Impactos ambientales debidos a la disposición final el sistema de ventilación con colectores solares de aire. Puntuación única. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 123 |
| 7.14. | Impactos ambientales del ciclo de vida del sistema de ventilación con colectores solares de aire. Puntuación única. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 124 |
| 8.1. | Muro Trombe (modelo clásico) (BrigaSà et al., 2014) | 128 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 8.2. | Ganancia solar del muro Trombe, Q_{gains} , dependiendo del espesor de la pared. | 134 |
| 8.3. | Valores de la contribución de la transmisión de calor Q_{gains} . | 135 |
| 8.4. | Integración del muro Trombe en la envolvente del edificio. Operación en la temporada de calefacción | 136 |
| 8.5. | Impactos ambientales comparativos de diferentes tipos de muro Trombe. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 139 |
| 8.6. | Impactos ambientales del sistema de ventilación con muro Trombe. Fase de uso. Evaluación del daño. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 143 |
| 8.7. | Impactos ambientales debido a los materiales del sistema de ventilación con muro Trombe. Puntuación única. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 144 |
| 8.8. | Impactos ambientales del sistema de ventilación con muro Trombe. Fase de disposición final. Puntuación única. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 145 |
| 8.9. | Impactos ambientales del sistema de ventilación con muro Trombe. Ciclo de vida. Puntuación única. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 146 |
| 9.1. | Circuito de calor del edificio aulario. Fuente:(EREN, 2007). | 153 |
| 9.2. | Equipos de los grupos térmicos. | 154 |
| 9.3. | Calderas. Fuente:(Torres, 2009) | 155 |
| 9.4. | Sistema de distribución y consumo | 159 |
| 9.5. | Radiador. Fuente:(Torres, 2009). | 164 |
| 9.6. | Esquema de la instalación de calefacción con caldera de gasóleo. | 165 |
| 9.7. | Edificio Aulario. Demanda energética para los edificios objeto y de referencia. Fuente: (Blázquez, 2011). | 169 |
| 9.8. | Emisiones de CO ₂ . Fuente: (Blázquez, 2011). | 171 |
| 9.9. | Calificación energética. Fuente. (Blázquez, 2011). | 171 |
| 9.10. | Impactos ambientales el sistema de calefacción con caldera de gasóleo. Ciclo de vida. Diagrama usando el <i>software</i> SimaPro8. | 175 |
| 9.11. | Impactos ambientales del sistema de calefacción con caldera de gasóleo. Fase de montaje. Ponderación. Diagrama usando el <i>software</i> SimaPro8. | 175 |
| 9.12. | Impactos ambientales del sistema de calefacción con caldera de gasóleo. Fase de uso. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 176 |
| 9.13. | Impactos ambientales del sistema de calefacción con caldera de gasóleo. Fase de disposición final. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 176 |
| 10.1. | Tipos de yacimientos geotérmicos. Fuente: (González, 2013a) | 180 |
| 10.2. | Evolución de la temperatura del suelo. Curva embudo. Fuente:(IDAE, 2010). | 182 |
| 10.3. | Potencial geotérmico mundial por continente. Fuente:(IDAE, 2008). | 183 |
| 10.4. | Potencia mundial instalada de energía geotérmica. Fuente: (IDAE, 2008). | 184 |
| 10.5. | Componentes de un sistema de calefacción geotérmico. Fuente: Modificado de (Dimplex, 2008). | 190 |
| 10.6. | Funcionamiento de una bomba de calor geotérmica. Fuente: (IDAE, 2010). | 191 |
| 10.7. | Etapas para el dimensionamiento de un sistema de climatización geotérmico. Fuente: (Llopis y Rodrigo, 2008). | 193 |

| | |
|--|-----|
| 10.8. Componentes de un sistema de calefacción geotérmico. Fuente: (Llopis y Rodrigo, 2008). | 193 |
| 10.9. Bomba de calor geotérmica. Fuente:(Immosolar, 2011). | 195 |
| 10.10 Instalación de bomba de calor geotérmica. Fuente: (Caleffi, 2011). | 200 |
| 10.11 Bomba de calor geotérmica con captadores verticales. Fuente: (Caleffi, 2011). | 201 |
| 10.12 Tipos de tubos captadores verticales. Fuente: (ClimateMaster, 2006). | 201 |
| 10.13 Menú archivo del <i>software</i> Earth Energy Designer. Fuente:(Blomberg et al., 2008) | 204 |
| 10.14 Menú entrar. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 209 |
| 10.15 Menú propiedades del suelo. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 209 |
| 10.16 Variables de la configuración horizontal. Fuente: (Ciatesa, 1998). | 210 |
| 10.17 Variables de la configuración vertical. Fuente: (Ciatesa, 1998). | 210 |
| 10.18 Influencia de la configuración. Fuente: (Ciatesa, 1998). | 211 |
| 10.19 Pestaña con las características de los pozos. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 211 |
| 10.20 Pestaña con la resistencia térmica. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 212 |
| 10.21 Propiedades del fluido caloportador. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 212 |
| 10.22 Propiedades físicas de los fluidos. Fuente: (Atecyr, 2008). | 213 |
| 10.23 Factores de ponderación. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 213 |
| 10.24 Pestaña con carga base del edificio Aulario. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 214 |
| 10.25 Pestaña con la carga pico del edificio Aulario. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 214 |
| 10.26 Ventana datos de coste. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 215 |
| 10.27 Ventana hallar. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 216 |
| 10.28 Pestaña con las temperaturas fijas medias mínima y máxima del fluido. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 217 |
| 10.29 Menú salida de resultados. Características del suelo. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 219 |
| 10.30 Menú salida de resultados. Características del pozo. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008) | 220 |
| 10.31 Menú salida de resultados. Carga base. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 220 |
| 10.32 Menú salida de resultados. Carga pico. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 221 |
| 10.33 Menú salida de resultados. Longitud del pozo. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 221 |
| 10.34 Menú salida de resultados. Tasa de extracción. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 222 |
| 10.35 Ventana salida de resultados. Temperatura media. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 222 |
| 10.36 Ventana salida de resultados. Temperatura media (continuación). Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 223 |
| 10.37 Ventana salida de resultados. Temperatura media (continuación). Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 223 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 10.38 | Ventana salida de resultados. Configuración elegida. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 224 |
| 10.39 | Arreglo del intercambiador geotérmico. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 224 |
| 10.40 | Menú configuracion. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008) | 225 |
| 10.41 | Menú ayuda. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008) | 226 |
| 10.42 | Curva característica de la bomba de circulación. Fuente: (Saci, 2013). | 230 |
| 10.43 | Especificaciones técnicas de la bomba de circulación. Fuente: (Saci, 2013). | 230 |
| 10.44 | Volumen del vaso de expansión. Fuente: (Saci, 2013). | 231 |
| 10.45 | Características del vaso de expansión. Fuente: (Ibaiondo, 2012). | 232 |
| 10.46 | Esquema de la instalación de calefacción con bomba de calor geotérmica | 233 |
| 10.47 | Duración en vida de algunos refrigerantes. Fuente: (Contreras, 2013). | 239 |
| 10.48 | Impactos ambientales del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica. Ciclo de vida. Puntuación única. Diagrama usando el <i>software</i> SimaPro8. | 240 |
| 10.49 | Impactos ambientales debido a los materiales usados por los equipos del sistema de calefacción geotérmico. Ponderación. Diagrama usando el <i>software</i> SimaPro8. | 241 |
| 10.50 | Impactos ambientales del sistema de calefacción geotérmico. Fase de uso. Ponderación. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 242 |
| 10.51 | Impactos ambientales del sistema de calefacción geotérmico. Fase de disposición final. Ponderación. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 242 |
| 11.1. | Alcance del estudio del análisis de ciclo de vida de edificios de consumo de energía casi cero, NZEB. Diagrama. | 250 |
| 11.2. | Diagrama de bloques del sistema de ventilación con ventilador mecánico convencional. | 252 |
| 11.3. | Diagrama de bloques del sistema de ventilación con ventilador solar. | 253 |
| 11.4. | Diagrama de bloques del sistema de ventilación con colector solar de aire. | 253 |
| 11.5. | Diagrama de bloques del sistema de ventilación con muro Trombe. | 254 |
| 11.6. | Diagrama de bloques del sistema de calefacción con caldera de gasóleo. | 254 |
| 11.7. | Diagrama de bloques del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica. | 255 |
| 11.8. | Desempeño energético de los sistemas de ventilación. Energía final. | 258 |
| 11.9. | Desempeño energético de los sistemas de ventilación. Energía primaria. | 259 |
| 11.10 | Impactos ambientales comparativos de los sistemas de ventilación. Ciclo de Vida. Metodología EPS2000. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 261 |
| 11.11 | Impactos ambientales comparativos de los sistemas de ventilación. Ciclo de vida. Metodología EPS2000 Ponderación. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 261 |
| 11.12 | Impactos ambientales comparativos de los sistemas de ventilación. Fase de uso. Metodología EPS2000. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 262 |
| 11.13 | Impactos ambientales comparativos de los sistemas de ventilación. Ciclo de vida. Metodología Ecoindicador99. Puntuación única. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 264 |
| 11.14 | Impactos ambientales comparativos de los sistemas de ventilación. Ciclo de vida. Metodología Ecoindicador99. Ponderación. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 265 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 11.15 | Desempeño energético de los sistemas de calefacción. Energía final. | 267 |
| 11.16 | Desempeño energético de los sistemas de calefacción. Energía primaria. | 268 |
| 11.17 | Comparación de los impactos ambientales de los sistemas de calefacción: con caldera de gasoil y geotérmico. Ciclo de vida. Puntuación única. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 270 |
| 11.18 | Impactos ambientales comparativos de los sistemas de calefacción. Fase de ciclo de vida. Metodología EPS2000. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 271 |
| 11.19 | Impactos ambientales comparativos del uso de los sistemas de iluminación: Paneles fotovoltaicos y red eléctrica. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 273 |
| 11.20 | Impactos ambientales comparativos de los sistemas de iluminación. Fase de uso. Metodología Ecoindicador99. Diagrama generado usando el <i>software</i> SimaPro8. | 275 |
| 11.21 | Reducción de emisiones de CO ₂ en la fase de uso de los sistemas de energías renovables | 280 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| 2.1. Evolución y desarrollo del ACV según la norma ISO 14040. Fuente: Modificado de (Segura, 2013). | 15 |
| 2.2. Categorías de impacto medioambiental de evaluación del impacto ambiental. Fuente (Segura, 2013). | 24 |
| 2.3. Herramientas informáticas para el desarrollo del análisis de ciclo de vida. Fuente (Segura, 2013). | 26 |
| 2.4. Herramientas informáticas para el desarrollo del análisis de ciclo de vida. Fuente (Segura, 2013). | 27 |
| 2.5. Principales bases de datos de ACV. Fuente (Segura, 2013). | 28 |
| 3.1. Factores de conversión de energía final a primaria en España. Fuente:(IDAE, 2014). | 42 |
| 3.2. Factores de emisiones de CO ₂ para España. Fuente: (IDAE, 2014). | 43 |
| 4.1. Consumo eléctrico durante los años 2007 a 2013. Fuente: (González, 2013b; EREN, 2007). | 52 |
| 4.2. Consumo eléctrico y emisiones de CO ₂ totales del edificio Aulario. Fase de uso. | 52 |
| 4.3. Impactos ambientales del sistema de iluminación con electricidad de la red. Evaluación del daño. Datos calculados usando el <i>software</i> SimaPro8. | 55 |
| 4.4. Características de las luminarias del edificio Aulario. Fuente:(EREN, 2007). | 56 |
| 5.1. Características geográficas de la ciudad de Valladolid. Fuente:(UVa, 2014). | 60 |
| 5.2. Características de los lucernarios fotovoltaicos Glass-TEDLAR a integrar en el edificio Aulario. | 61 |
| 5.3. Potencia generada por el sistema fotovoltaico. Fuente:(UVa, 2014). | 62 |
| 5.4. Impactos ambientales del sistema de iluminación con electricidad generada por paneles fotovoltaicos. Evaluación de daño. Datos calculados usando el <i>software</i> SimaPro8. | 64 |
| 6.1. Calidad del aire interior. Fuente:(AENOR, 2008b). | 67 |
| 6.2. Calidad del aire exterior. Fuente:(RITE, 2013). | 67 |
| 6.3. Clases de filtración. Fuente:(RITE, 2013). | 68 |
| 6.4. Calidad del aire de extracción. Fuente:(RITE, 2007). | 68 |
| 6.5. Condiciones interiores. Fuente:(RITE, 2007). | 69 |
| 6.6. Ventilador mecánico. Especificaciones técnicas. | 71 |
| 6.7. Características del sistema de ventilación mecánica. | 72 |

| | |
|---|-----|
| 6.8. Desempeño energético del sistema de ventilación mecánica. Consumo y producción de energía. Fase de uso. | 73 |
| 6.9. Escenario de reciclaje en España de los materiales que requieren los equipos del sistema de ventilación mecánica. | 74 |
| 6.10. Requerimiento energético para el reciclaje de los materiales del sistema de ventilación mecánica. | 74 |
| 6.11. Impactos ambientales del sistema de ventilación mecánica. Ciclo de vida. Evaluación del daño. Datos calculados usando el software SimaPro8. | 79 |
| 6.12. Caudales de aire exterior. Fuente:(RITE, 2013). | 83 |
| 6.13. Tasas de ventilación mínimas en zonas respirables. Fuente:(Ashrae, 2004). | 83 |
| 6.14. Criterios de diseño para los espacios en diferentes tipos de edificios. Fuente:(AENOR, 2008a). | 83 |
| 6.15. Caudales de ventilación por espacios de la primera planta del edificio Aulario. Ala izquierda. | 85 |
| 6.16. Caudales de ventilación por espacios de la primera planta del edificio Aulario. Ala derecha. | 85 |
| 6.17. Caudales de ventilación por espacios de la planta baja del edificio Aulario. Ala izquierda. | 86 |
| 6.18. Caudales de ventilación por espacios de la planta baja del edificio Aulario. Ala derecha. | 86 |
| 6.19. Planta primera. Longitud de los tramos (II-VI) y (II-VII). | 92 |
| 6.20. Planta baja. Longitud de los tramos (III-V) y (III-IV). | 92 |
| 6.21. Caída de presión en cada tramo del conducto principal. | 92 |
| 6.22. Presión en la boca de cada tramo del conducto principal. | 92 |
| 6.23. Características del conducto principal tramos (I-II), (II-III) y (III-IV). Método de cálculo: Caída de presión lineal constante. | 92 |
| 6.24. Caudales de ventilación de la derivación (II-VI). Igual a la derivación (II-VII). | 94 |
| 6.25. Caudales de ventilación en el tramo principal (III-IV) y sus derivaciones. Igual a la derivación (III-V). | 94 |
| 6.26. Compuertas requeridas por el sistema de conductos del edificio Aulario. | 96 |
| 6.27. Características de la derivación (II-VI) y sus subderivaciones. Igual a la derivación (II-VII). | 96 |
| 6.28. Características de tramo principal (III-IV) y sus derivaciones. Igual a la derivación (III-V). | 97 |
| 6.29. Conductos Climaver. Características. | 98 |
| 6.30. Conductos del edificio Aulario. Características. | 98 |
| 7.1. Características del ventilador solar compacto. | 107 |
| 7.2. Características del sistema de ventilación con ventilador solar. | 108 |
| 7.3. Desempeño energético del sistema de ventilación con ventilador solar. Consumo y producción de energía. Fase de uso. | 109 |
| 7.4. Escenario de reciclaje en España de los materiales que requieren los equipos del sistema de ventilación con ventilador solar. | 110 |
| 7.5. Requerimiento energético para el reciclaje de los materiales que requieren los equipos del sistema de ventilación con ventilador solar. | 110 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 7.6. | Impactos ambientales del ciclo de vida del sistema de ventilación con ventiladores solares. Evaluación del daño. Datos calculados usando el <i>software</i> SimaPro8. | 115 |
| 7.7. | Colector solar de aire SolarVenti. Características. Fuente: (SolarVenti, 2011). | 117 |
| 7.8. | Características del sistema de ventilación con colector solar de aire. | 118 |
| 7.9. | Desempeño energético del sistema de ventilación con colector solar de aire. Consumo y producción de energía. | 119 |
| 7.10. | Escenario de reciclaje en España de los materiales que requieren los equipos del sistema de ventilación con colector solar de aire. | 120 |
| 7.11. | Requerimiento energético para el reciclaje de los materiales que requieren los equipos del sistema de ventilación con colector solar de aire. | 120 |
| 7.12. | Impactos ambientales del sistema de ventilación con colectores solares de aire. Ciclo de vida. Evaluación del daño. Datos calculados usando el <i>software</i> SimaPro8. | 125 |
| 8.1. | Características del vidrio (BrigaSà et al., 2014). | 133 |
| 8.2. | Características de los materiales del muro Trombe (BrigaSà et al., 2014). | 133 |
| 8.3. | Temperaturas del sistema del muro Trombe usado en Valladolid, España | 133 |
| 8.4. | Ganancia solar del muro Trombe, Q_{gains} , dependiendo del espesor de la pared. Datos. | 134 |
| 8.5. | Hormigón convencional. Características (Turk et al., 2015). | 137 |
| 8.6. | Hormigón verde y convencional. Características. Fuente: (Turk et al., 2015). | 138 |
| 8.7. | Impactos ambientales de diferentes tipos de muros Trombe. Datos obtenidos usando el <i>software</i> SimaPro8. | 138 |
| 8.8. | Características del sistema de ventilación con muro Trombe | 140 |
| 8.9. | Desempeño energético del muro Trombe. Consumo y producción de energía. | 141 |
| 8.10. | Escenario de reciclaje en España de los materiales que requiere el sistema de ventilación con muro Trombe. | 142 |
| 8.11. | Requerimiento energético para el reciclaje de los materiales del sistema de ventilación con muro Trombe. | 142 |
| 8.12. | Impactos ambientales del sistema de ventilación. con muro Trombe. Datos calculados usando el <i>software</i> SimaPro8. | 147 |
| 9.1. | Características de la primera caldera de la instalación de calefacción. Fuente: (BaxiRoca, 2011a) y modificado de (Blanco, 1992; Torres, 2009). | 154 |
| 9.2. | Características de la segunda caldera de la instalación de calefacción. Fuente: (BaxiRoca, 2011a) y modificado de (Blanco, 1992; Torres, 2009). | 154 |
| 9.3. | Características del quemador de la primera caldera de la instalación de calefacción. Fuente: (BaxiRoca, 2011a) y modificado de (Blanco, 1992; Torres, 2009). | 155 |
| 9.4. | Características del quemador de la segunda caldera de la instalación de calefacción. Fuente: (BaxiRoca, 2011a) y modificado de (Blanco, 1992; Torres, 2009). | 155 |
| 9.5. | Características de la bomba de circulación de la primera caldera de la instalación de calefacción. Fuente: (Grundfos, 2011) y modificado de (Blanco, 1992; Torres, 2009). | 156 |

| | |
|--|-----|
| 9.6. Características de la bomba de circulación de la segunda caldera de la instalación de calefacción. Fuente:(Grundfos, 2011) y modificado de (Blanco, 1992; Torres, 2009). | 156 |
| 9.7. Características de la válvula de aislamiento de la instalación de calefacción. Fuente: (Sauter, 2010) y modificado de (Blanco, 1992). | 156 |
| 9.8. Características del servomotor de la instalación de calefacción. Fuente: (Sauter, 2010) y modificado de (Blanco, 1992). | 156 |
| 9.9. Características de la centralita de regulación de la instalación de calefacción. Fuente: (Testgut, 2002) y modificado de (Blanco, 1992). | 156 |
| 9.10. Características de la válvula de seguridad de la instalación de calefacción. Fuente: (Lupatech, 2013) y modificado de (Blanco, 1992). | 157 |
| 9.11. Características de los vasos de expansión de la instalación de calefacción. Fuente: (Ibaiondo, 2012) y modificado de (Blanco, 1992). | 157 |
| 9.12. Características de las válvula de corte de la instalación de calefacción. Fuente: (Sauter, 2010) y modificado de (Blanco, 1992). | 157 |
| 9.13. Características de la red de tuberías de la instalación de calefacción. Fuente: (Daunis, 2014) y modificado de (Blanco, 1992). | 157 |
| 9.14. Características de la chimenea de la instalación de calefacción. Fuente: (Dinak, 2014), modificado de (Blanco, 1992). | 157 |
| 9.15. Características de la bomba de circulación del circuito norte del sistema de distribución y consumo. Fuente: (Grundfos, 2011) y modificado de (Blanco, 1992). | 160 |
| 9.16. Características de la bomba de circulación de los circuitos centro y sur del sistema de distribución y consumo. Fuente: (Grundfos, 2011) y modificado de (Blanco, 1992). | 160 |
| 9.17. Características de la válvula de tres vías del sistema de distribución y consumo. Fuente: (Esbe, 2009-2010) y modificado de (Blanco, 1992). | 160 |
| 9.18. Características del servomotor del sistema de distribución y consumo. Fuente: (Sauter, 2010) y modificado de (Blanco, 1992). | 160 |
| 9.19. Características de la centralita de regulación del sistema de distribución y consumo. Fuente: (Testgut, 2002) y modificado de (Blanco, 1992). | 161 |
| 9.20. Características del depósito de gasóleo del sistema de distribución y consumo. Fuente: (BaxiRoca, 2011b) y modificado de (Blanco, 1992). | 161 |
| 9.21. Características de grupo gasóleo del sistema de distribución y consumo. Fuente: (Calpeda, 2007) y modificado de (Blanco, 1992). | 161 |
| 9.22. Características de la tuberías del sistema de distribución y consumo. Fuente: (Daunis, 2014) y modificado de (Blanco, 1992). | 161 |
| 9.23. Características del cuadro eléctrico del sistema de distribución y consumo. Fuente: Modificado de (Blanco, 1992). | 162 |
| 9.24. Inventario de equipos térmicos: sistema de calefacción. Red de radiadores en la planta baja. Fuente: (EREN, 2007). | 162 |
| 9.25. Inventario de equipos térmicos: sistema de calefacción. Red de radiadores en la primera planta. Fuente:(EREN, 2007). | 163 |
| 9.26. Características de los radiadores del sistema de calefacción. Fuente: (Ferroli, 2014) y modificado de (EREN, 2007). | 163 |
| 9.27. Características del sistema de calefacción con caldera de gasóleo. | 166 |

| | |
|--|-----|
| 9.28. Montaje del sistema de calefacción actual con caldera de gasóleo. Fuente: modificado de (EREN, 2007). | 167 |
| 9.29. Edificio Aulario. Demanda energética para los edificios objeto y de referencia. Fuente: (Blázquez, 2011). | 168 |
| 9.30. Demanda térmica de calefacción del edificio Aulario. Fuente: modificado de (Blázquez, 2011). | 168 |
| 9.31. Demanda de refrigeración del edificio Aulario. Fuente: modificado de (Blázquez, 2011). | 169 |
| 9.32. Emisiones de CO ₂ . Fuente: (Blázquez, 2011). | 170 |
| 9.33. Consumo térmico edificio Aulario durante los años 2007 a 2012. Fuente: (González, 2013b; EREN, 2007). | 172 |
| 9.34. Consumo térmico y emisiones de CO ₂ totales del edificio Aulario durante la fase de uso. | 172 |
| 9.35. Escenario de reciclaje del sistema de calefacción con caldera de gasóleo. | 173 |
| 9.36. Impactos ambientales el sistema de calefacción con caldera de gasóleo. Ciclo de vida. Datos calculados usando el <i>software</i> SimaPro8. | 177 |
| 10.1. Clasificación de las áreas de energía geotérmica en España. Fuente: (Pomar, 2012). | 185 |
| 10.2. Factores de corrección. Fuente: <i>software</i> EED (Blomberg et al., 2008). | 209 |
| 10.3. Características del intercambiador geotérmico. | 227 |
| 10.4. Características del sistema de calefacción geotérmico. | 234 |
| 10.5. Energía final consumida por el sistema geotérmico. Vida útil 30 años. | 236 |
| 10.6. Entrada total de residuos LER 14 en Castilla y León. Modificado de (CYL, 2010). | 238 |
| 10.7. Disposición final de residuos LER 14 en Castilla y León. Modificado de (CYL, 2010). | 239 |
| 10.8. Impactos ambientales del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica. Ciclo de vida. Evaluación del daño. Datos calculados usando el <i>software</i> SimaPro8. | 243 |
| 11.1. Requerimiento energético para el reciclaje de los materiales que requieren los equipos de los sistemas analizados. | 255 |
| 11.2. Escenario de reciclaje en España de los materiales que requieren los equipos de los sistemas analizados. | 256 |
| 11.3. Desempeño energético de los sistemas de ventilación, expresado en energía final. 258 | |
| 11.4. Desempeño energético de los sistemas de ventilación, expresado en energía primaria. | 258 |
| 11.5. Impactos ambientales comparativos de los sistema de ventilación. Ciclo de Vida. Evaluación del daño. Metodología EPS2000. Datos calculados usando el <i>software</i> SimaPro8. | 262 |
| 11.6. Impactos ambientales comparativos de los sistema de ventilación. Fase de uso. Evaluación del daño. Metodología EPS2000. Datos calculados usando el <i>software</i> SimaPro8. | 263 |

| | |
|---|-----|
| 11.7. Impactos ambientales comparativos de los sistema de ventilación. Ciclo de vida. Puntuación única. Metodología Ecoindicador99. Datos calculados usando el <i>software</i> SimaPro8. | 265 |
| 11.8. Desempeño energético de los sistemas de calefacción. Fase de uso. | 266 |
| 11.9. Impactos ambientales comparativos de los sistema de calefacción. Ciclo de vida. Evaluación del daño. Metodología EPS2000. Datos calculados usando el <i>software</i> SimaPro8. | 269 |
| 11.10 Impactos ambientales comparativos de los sistemas de calefacción. Ciclo de vida. Metodología Ecoindicador 99. Puntuación única. Datos calculados usando el <i>software</i> SimaPro8. | 272 |
| 11.11 Impactos ambientales comparativos de los sistemas de iluminación: Paneles fotovoltaicos y red eléctrica. Fase de uso. Metodología EPS2000. Puntuación única. Datos calculados usando el <i>software</i> SimaPro8. | 274 |
| 11.12 Impactos ambientales comparativos de los sistemas de iluminación. Fase de uso. Metodología Ecoindicador 99. Puntuación única. Datos calculados usando el <i>software</i> SimaPro8. | 276 |

Parte I

MARCO TEÓRICO

En la primera parte del documento se desarrolla el marco teórico. En el Capítulo 1 se presenta la Introducción, donde se plantea la problemática de la gestión sostenible de los edificios; en el Capítulo 2 se aborda el concepto de edificios cercanos a cero energía y en el Capítulo 3 el Análisis de Ciclo de Vida.

CAPÍTULO 1

Introducción

RESUMEN: En el presente Capítulo se presentan los conceptos sobre la problemática de la gestión sostenible de los edificios, una breve introducción sobre la problemática social de la energía, el concepto de Análisis de Ciclo de Vida y los objetivos del estudio.

1.1. La problemática de la gestión sostenible de los edificios

1.1.1. Consumo energético en los edificios

Más del 40 % del consumo final de energía en la Unión Europea está ligado al sector residencial y terciario. Considerando el crecimiento previsto de la población, hasta 10 mil millones hasta 2050, es predecible la expansión del sector de los edificios (Visa et al., 2013). Por tanto, es evidente que el consumo, y en consecuencia las emisiones de CO₂, tenderán a aumentar (UE, 2010).

Los edificios tienen una gran incidencia en el consumo de energía a largo plazo, por lo que todos los edificios nuevos deberán cumplir unos requisitos mínimos de eficiencia energética adaptados a las condiciones climáticas locales. A este respecto, en el Plan de Eficiencia Energética 2011 se detallaba una serie de políticas y medidas de eficiencia energética que cubrían toda la cadena de la energía, y se refieren a la generación de energía, el transporte y la distribución, al papel ejemplarizante del sector público en la eficiencia energética, a los edificios y electrodomésticos, la industria, y la necesidad de poner a los consumidores finales en condiciones de gestionar su consumo de energía (UE, 2012).

En esta línea, el Informe Mundial de la Energía se realizó para alcanzar un consenso sobre el empleo más efectivo de la energía como herramienta que promueva el desarrollo sostenible y señala cómo se ha de actuar en la promoción de la eficiencia energética y las energías renovables, impulsando nuevas tecnologías y alternativas para el suministro y empleo de energías limpias y seguras (UE, 2010). Además ha de prestarse atención a los países actualmente en vías de desarrollo, con el fin de paliar las etapas de derroche y destrucción, características de la industrialización en el pasado.

El fomento de la eficiencia energética, ahorro de energía y uso de energías renovables constituyen una parte importante del conjunto de políticas y medidas necesarias para cumplir lo dispuesto en el Protocolo de Kyoto (ONU, 1998), y deben estar presentes en todas las medidas que se adopten con el fin de dar cumplimiento a los nuevos compromisos como los descritos en el Convenio Marco sobre el Cambio Climático para mantener el aumento de la temperatura media mundial del planeta muy por debajo de 2°C, esforzándose por limitar el aumento de la temperatura a 1.5°C, lo que requiere una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero mucho mayor que el que suponen las contribuciones previstas determinadas a nivel nacional (ONU, 2015).

El disponer de energía asequible y abundante nos permite contar con un nivel de movilidad, productividad y confort muy elevado. El papel de la energía es vital para nuestro desarrollo sostenible, esto es, que la energía se produzca y emplee teniendo en cuenta el desarrollo humano en sus dimensiones social, económica y medioambiental. De no ser así, el deterioro del medio ambiente se verá acelerado, se incrementará la desigualdad y peligrará el crecimiento económico mundial.

1.1.2. Fuentes de contaminación de los edificios

Existen tres fuentes principales de contaminación durante el acondicionamiento de los edificios para su uso. En edificios no residenciales, las principales fuentes de contaminación son: el sistema de calefacción, el sistema de ventilación y el sistema de iluminación. En edificios residenciales se suma el consumo energético de los electrodomésticos.

La fase de operación del edificio es la principal causa de daños ambientales y puede alcanzar hasta el 52 % del total de los impactos ambientales, por encima de la fase de construcción y demolición (Cabeza et al., 2014). Por otro lado, el análisis del consumo de energía de un edificio señala que en la fase de operación del edificio se consume el 80-90 % del total de la energía usada, mientras que el 10-20 % restante es requerida durante la manufactura de los materiales empleados en la construcción (Cabeza et al., 2014).

1.1.3. Certificación energética de edificios

La Certificación Energética de Edificios se define como la descripción de las características energéticas de estos, que aporta información a los usuarios interesados en utilizar un edificio sobre la eficiencia energética del mismo. Dicha certificación surge a partir de la Directiva Europea 76/93/CEE, aprobada el 13 de septiembre de 1993, relativa a la limitación de las emisiones de CO₂ mediante la mejora de la eficiencia energética. En 1997 se suscribe un convenio de actualización de la norma Básica, NBE-CT-79, sobre condiciones térmicas en los edificios, y el desarrollo de un procedimiento técnico de calificación y certificación energética de edificios.

El desarrollo de edificios de energía casi nula (NZEB) va en la línea de mejorar la certificación energética de los edificios y representa un camino hacia comunidades sostenibles. Es por ello que se investigan medidas combinadas para reducir la demanda de energía y el aumento de la proporción de sistemas de energía renovable en los edificios (Visa et al., 2013). En el Capítulo 3 se amplía el concepto de edificios de energía casi nula (NZEB).

1.1.4. ¿Es posible alcanzar edificios cercanos a cero energía?

Es posible alcanzar edificios cercanos a cero energía reemplazando los sistemas actuales basados en combustibles fósiles por sistemas basados en energías renovables, utilizando equipos y sistemas eficientes energéticamente, y reduciendo el consumo a través de medidas de ahorro energético, ya que la mejor energía es aquella que no se consume.

En edificaciones, los recursos energéticos renovables más usados son la energía solar térmica para el agua caliente sanitaria (ACS) y calefacción, la energía solar fotovoltaica para iluminación y la energía geotérmica para calefacción. En las edificaciones ubicadas dentro de una ciudad o población no se usa la energía eólica por el impacto visual que causa, pero puede aprovecharse dicha fuente por medio de campos eólicos cercanos a la población o ciudad.

El consumo de energía depende de las condiciones climáticas, del comportamiento de los usuarios y del edificio como tal. La demanda de energía durante la vida útil de los edificios existentes se expresa en términos de uso primario de energía específica anual, que se encuentra en el rango de 150 a 400 kWh/m² por año para edificios residenciales convencionales y 250-550 kWh/m² por año para edificios de oficina, valores que son muy altos, considerando los estándares de 60-80 kWh/m² por año para edificios de baja energía (Visa et al., 2013).

La Universidad de Valladolid cuenta dentro de su Campus con el edificio Lucia, galardonado con el premio *Green Building Solutions* en la categoría de Edificios de Energía Cero.

En relación con la eficiencia energética de equipos y sistemas, ha habido considerables avances tecnológicos que han permitido que sistemas considerados en el pasado como no competitivos hoy en día hayan demostrado sus bondades. A continuación se citarán algunos ejemplos.

1.1.5. Tecnologías convencionales y de nueva aparición

En calefacción las tecnologías convencionales más usadas son las de calderas de gasoil, de gas y, en menor proporción, la calefacción con radiadores eléctricos. Las calderas de gasoil se usan en sistemas centralizados o individuales. Los sistemas centralizados son más eficientes energéticamente respecto a los sistemas individuales.

Dentro de las tecnologías de nueva aparición usadas en calefacción se tienen: la bomba de calor geotérmica, la bomba de calor aire-aire, el uso de energía solar térmica y las calderas de biomasa. Estas tecnologías pueden instalarse *in situ*, aprovechando una de las fortalezas de las energías renovables la cual es el uso eficiente de los recursos. Adicionalmente, para el caso de las bombas de calor y los sistemas solares pueden reducir y/o hasta eliminar el consumo de recursos y energía en el transporte de la misma (Scheer, 2009).

Los sistemas híbridos, esto es, que usan dos o más tecnologías convencionales y tecnologías de nueva aparición, han demostrado ser una alternativa hacia la era postfósil. Por ejemplo, el uso de bombas de calor geotérmicas con apoyo eléctrico (Cañada, 2008). En la medida en que la matriz energética de cada país aumente en energías renovables, los sistemas híbridos irán reduciendo sus impactos ambientales.

1.2. Problemática social de la energía

Solo desde hace 40 años se ha comenzado a reflexionar sobre el tema energético, específicamente sobre el uso de combustibles fósiles y nuclear, con los estudios sobre el cambio climático y las catástrofes de contaminación ocasionada por las plantas nucleares. A ello se añaden las razones que subyacen a los conflictos bélicos, como es el control y acceso a la energía fósil (Scheer, 2009).

Para evitar violentos conflictos de recursos, debe darse en las próximas dos décadas un cambio radical de opinión sobre la energía renovable (Scheer, 2009). Dicho cambio comportaría expandir el uso de la energía renovable y recortar el uso de energías nuclear y fósil. “Por tanto, es necesario activar las energías renovables mucho más rápidamente y de manera más forzada (tanto cuantitativa como cualitativamente) de lo que actualmente reflejan los programas gubernamentales” (Scheer, 2009). “*El leitmotiv* de todo esto es la autonomía energética” (Scheer, 2009). La autonomía energética puede ser posible si se emplea energía renovable y la implementación de estrategias prácticas con iniciativas autónomas llevadas a cabo por individuos, organizaciones, empresas, ciudades y estados. “Existe una predicción de la que ya podemos estar seguros: algún día las energías renovables serán la única manera de satisfacer las necesidades energéticas de la gente” (Scheer, 2009).

El acceso a la energía se ha convertido, junto con el acceso al agua, en uno de los recursos más preciados por el ser humano debido a que asegura la supervivencia de la especie en lugares con condiciones climáticas drásticas, pero también se ha convertido en un parámetro de medición del desarrollo de un país o región.

El acceso a la energía es un derecho que se está violando. Dentro de las medidas encaminadas a asegurar el acceso a la energía se encuentran: mejorar la eficiencia de las viviendas, reducir los precios de la energía y aumentar los ingresos de la población. Es indispensable que a estas medidas se sumen: asegurar independencia entre el poder político y las grandes empresas energéticas; tener en cuenta a los hogares vulnerables en el proceso de transición a una economía con bajos niveles de emisiones de carbono; y aumentar el poder de los usuarios, por ejemplo, con la posibilidad de producir, consumir, distribuir y comercializar la energía que generen desde sus viviendas y edificaciones en general; sumado a la posibilidad de decidir qué tipo de energía se quiere consumir y en qué condiciones (Tirado, 2015).

Los edificios pueden contribuir en una de las soluciones hacia la descentralización de la producción y comercialización de la energía. Los edificios pueden convertirse en plantas de generación de energías renovables. Se convierten así en uno de los medios para reducir la contaminación ambiental y en un mecanismo para descentralizar el comercio de la energía.

1.3. Análisis de ciclo de vida

El Análisis de ciclo de vida (ACV), es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales de un producto, proceso o actividad, desde que comienza hasta que finaliza su vida útil, descrita como *from cradle to grave*. La finalidad de un ACV es evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental. En el Capítulo 2, se amplía este concepto.

El Análisis de ciclo de vida en edificios se ha convertido en una herramienta que permite conocer el desempeño energético del edificio y los sistemas usados, y los impactos ambientales ocasionados con el objetivo de implementar mejoras. Es posible realizar ACV de la envolvente del edificio, de los sistemas usados y de ambos. Estos conceptos se amplían en el Capítulo 3, sección 3.4.

Se han realizado ACV de edificaciones construidas como edificios de baja energía, pero muy pocos estudios de edificios tradicionales (Cabeza et al., 2014).

Adicionalmente, estudios sobre ACV de edificios encuentran que la fase de uso del edificio causa los mayores impactos ambientales (Kofoworola y Gheewala, 2008).

1.4. Conclusiones a la disertación sobre la gestión sostenible de los edificios

La problemática social de la energía tiene sus orígenes en la concentración de la producción, distribución, y comercialización de la energía, en monopolios que no dan a conocer los costes de los procesos, pactan los precios de la energía, e influyen en los gobiernos para continuar con este sistema de concentración de poder. Esta situación ha ocasionado, entre otros, la obstaculización del desarrollo de fuentes energéticas menos contaminantes.

La fase de uso del edificio causa los mayores impactos ambientales. Teniendo en cuenta este reconocido hecho y sabiendo que España es dependiente energéticamente, el transporte de la energía desde el país de origen ocasiona impactos ambientales, conflictos políticos, bélicos y de seguridad.

Urge oxigenar la gestión de la energía hacia instalaciones de producción renovables gestionadas a nivel local. La solución es la autonomía energética, esto es, que el país genere la energía que requiere.

Los edificios pueden convertirse en plantas de generación de energías renovables. De esta manera, se constituyen en uno de los medios para reducir la contaminación ambiental y en un mecanismo para descentralizar la gestión de la energía, posibilitando la generación de energías renovables en manos de las Instituciones, las empresas y los hogares, al aprovechar una de sus características, como es la producción y consumo *in situ*.

1.5. Objetivos del estudio

Analizar una de las estrategias para lograr eficiencia energética en edificaciones ya construidas, como es la utilización de sistemas eficientes de calefacción, ventilación e iluminación a partir de fuentes de energías renovables como solar térmica, solar fotovoltaica, geotérmica, y un sistema pasivo con muro Trombe.

Evaluar el impacto ambiental comparativo de sistemas de energías renovables aplicados

al edificio caso de estudio, con la finalidad de obtener un edificio cercano a energía cero o NZEB, utilizando la herramienta del Análisis de Ciclo de Vida (preferiblemente simplificado), atendiendo a los pasos para su aplicación definidos en la Norma ISO 14040 (ISO14040, 2006). Los impactos ambientales se evalúan usando el *software* SimaPro8.

El edificio a estudiar es el Aulario ubicado en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid, edificio construido en el año 1992. Se parte de las características constructivas descritas en el Proyecto Reformado Aulario Campus del Esgueva (Blanco, 1992) y del estudio energético realizado con los programas informáticos LIDER Y CALENER (Torres, 2009) y mediante simulación dinámica con EnergyPlus (Blázquez, 2011).

El presente estudio tendrá los siguientes objetivos específicos.

1.5.1. Objetivos específicos

- Definir las características y ventajas técnicas de sistemas de energías renovables como: bomba de calor geotérmica, energía solar térmica, fotovoltaica y el sistema pasivo con muro Trombe en relación con otras fuentes de energías convencionales y no convencionales.
- Diseñar los sistemas de energías renovables a aplicar en el edificio caso de estudio.
- Comparar los sistemas de energías renovables estudiados con los sistemas usados actualmente.
- Evaluar los impactos ambientales del ciclo de vida del objeto de estudio.
- Analizar los resultados del ciclo de vida del objeto de estudio y elaborar propuestas de seguimiento del estudio.

1.5.2. Alcance del estudio

Realizar el análisis de ciclo de vida de los siguientes sistemas de energías renovables: solar, fotovoltaica, sistema pasivo y bomba de calor geotérmica a implementar en el edificio Aulario de la Universidad de Valladolid. Estudiar los impactos ambientales asociados al uso de los sistemas y a los materiales requeridos para la fabricación de los equipos que conforman los sistemas y su posterior disposición final una vez finalizada su vida útil.

1.5.3. Metodología

Para realizar el análisis de ciclo de vida de sistemas de energías renovables se siguieron los pasos que se describen a continuación.

Se sigue la metodología planteada en la Norma ISO 14040 (ISO14040, 2006) para lo cual se realiza una revisión bibliográfica con el fin de construir el marco teórico de los edificios cercanos a cero energía (NZEBS) y de los sistemas de energías renovables a implementar. Posteriormente se inicia la fase de inventario de ciclo de vida, lo que requiere definir las características de los sistemas utilizados actualmente y de los sistemas con energías renovables.

Para ello, se realiza la caracterización del edificio Aulario, se diseñan los sistemas con energías renovables y se definen las características de los equipos que conforman los sistemas. Esta etapa requiere compilar una serie de datos de entradas y salidas de materia, energía y transporte.

Una vez dimensionados los sistemas, se evalúan los impactos ambientales comparativos usando el *software* SimaPro8. Esta etapa prevé la utilización de la herramienta del Análisis de Ciclo de Vida (preferiblemente simplificado), atendiendo a los pasos para su aplicación definidos en la Norma UNE-EN-ISO 14040 (AENOR, 2006).

Posteriormente se comparan los impactos ambientales de los sistemas usados actualmente con los sistemas de energías renovables. Finalmente se analizan los resultados del ciclo de vida del objeto de estudio, y se obtienen las conclusiones y perspectivas para trabajos futuros. La metodología descrita anteriormente para la evaluación del impacto ambiental comparativo del ciclo de vida de sistemas de energías renovables se muestra en la Fig. 1.1.

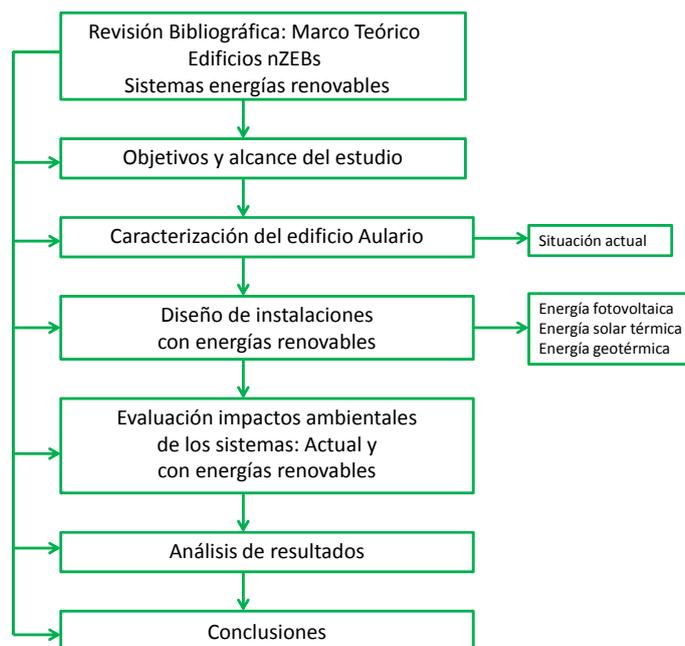


Figura 1.1: Metodología seguida para la evaluación de los impactos ambientales comparativos del ciclo de vida de los sistemas de energías renovables.

CAPÍTULO 2

Análisis de Ciclo de Vida

RESUMEN: En el presente Capítulo se desarrollan los conceptos sobre Análisis de Ciclo de Vida (ACV), definición, origen y evolución; se describe la metodología del ACV según las Normas ISO 14040 e ISO 14044; se define el concepto de categorías de impacto ambiental y se presentan algunas de las herramientas informáticas existentes para apoyar estudios de ACV.

2.1. Análisis de ciclo de vida. Definición

“El Análisis de ciclo de vida (ACV) es un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad identificando y cuantificando el uso de materia y energía y los vertidos al entorno; para determinar el impacto que ese uso de recursos y esos vertidos producen en el medio ambiente, y para evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental. El estudio incluye el ciclo completo del producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta las etapas de: extracción y procesamiento de materias primas; producción, transporte y distribución; uso, reutilización y mantenimiento, y reciclado y disposición del residuo” (véase Fig. 2.1) (Fullana y Puig, 1997). Esta fue la primera definición consensuada sobre ACV, es la más utilizada hasta el momento y se debe a la Sociedad de Química y Toxicología Ambiental (SETAC, de *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC, 2015)), asociación líder en el desarrollo metodológico del ACV, conocido internacionalmente como LCA, de *Life Cycle Assessment* (Fullana y Puig, 1997).

La Organización Internacional de Normalización o (ISO), de *International Organization for Standardization*, establece una nueva definición. “El ACV es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos 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” (véase Fig. 2.2) (ISO14040, 2006).



Figura 2.1: Fases de un ACV, según SETAC. Fuente:(Fullana y Puig, 1997)

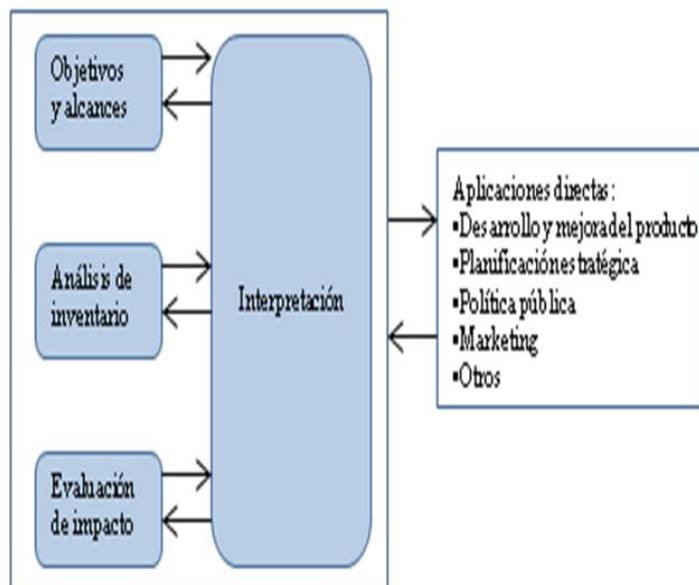


Figura 2.2: Fases de un ACV. Fuente:(ISO14040, 2006)

2.2. Análisis de ciclo de vida. Orígenes y evolución

Se considera que el análisis de ciclo de vida tiene sus orígenes entre finales de los años sesenta y principios de los setenta, motivados fundamentalmente por las crisis del petróleo. Se llevaron a cabo diversos estudios energéticos en los que se valoraba la eficiencia de determinadas fuentes de energía. “Del alcance puramente energético a tener en cuenta otros conceptos como consumo de recursos, emisiones al aire y al agua, y producción de residuos, hay sólo un paso” (Fullana y Puig, 1997).

En el año 1969, la compañía Coca-Cola encargó un estudio (nunca publicado) al *Mid-west Research Institute* (MRI), en el que debían compararse diferentes tipos de envases para determinar cuál de ellos suponía un menor consumo de recursos y una menor cantidad de emisiones. El desarrollo de la metodología podría situarse en un estudio encargado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA) al mismo Instituto, también sobre envases de bebidas (Fullana y Puig, 1997). Por la misma época, en Europa se estaba estudiando una especie de inventario que más tarde se conoció como Ecobalance.

En 1972, el trabajo “Los límites del crecimiento” (Primera cumbre mundial sobre ambiente y desarrollo, Estocolmo), despertó una mayor conciencia e interés por la protección del medio ambiente. En este mismo año, en el Reino Unido, *Lan BOUSTEAD* realiza estudios relacionados con el cálculo de la energía total requerida para la fabricación de diversos tipos de envases para bebidas.

En 1979, se creó la SETAC, *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*, con la finalidad de desarrollar y promocionar metodologías para el ACV. En 1984, el Laboratorio Federal Suizo para el Ensayo y la Investigación de Materiales (EMPA) publicó un estudio de materiales de envases y embalaje que introducía un método para agregar los impactos ambientales en un solo índice, el llamado método de los volúmenes críticos. La exhaustiva base de datos usada en este estudio fue publicada y sirvió para facilitar la posterior realización de numerosos ACV (Fullana y Puig, 1997).

Entre 1975 y 1988, después de la crisis del petróleo, Estados Unidos empezó a disminuir el interés por el ACV, que llevó a que USEPA (*U.S. Environmental Protection Agency*) decidiera que el empleo del ACV no era práctico. En 1988 renació el interés por el ACV en Estados Unidos debido a “la crisis de los residuos sólidos”, que comenzó a raíz de que un montón de basura en un barco yacía flotando en el mar y ningún puerto quería encargarse de su disposición final. Otro componente que contribuyó al resurgimiento por el interés en el ACV fue la presión que ejerció el Movimiento Verde sobre las multinacionales con sedes en Europa (Chacón, 2008).

El gran despegue en el desarrollo metodológico y en la aplicación del ACV se ha dado en los años noventa. Esto es debido, en primer lugar, al suministro de guías metodológicas y de bases de datos actualizadas de sus correspondientes áreas geográficas, proporcionadas por instituciones como la US-EPA, la Oficina Federal Suiza para el Medio Ambiente, Bosques y Paisajes (SAEFL), el Centro de Ciencias ambientales de Leiden (CML) o el Consejo Nórdico. También ha tenido mucha influencia el hecho de empezar a desarrollar normas nacionales y, sobre todo, internacionales dentro de ISO a partir de 1993. Sin embargo, el mayor impulso recibido por el ACV ha venido como fruto de los trabajos de la Sociedad de Toxicología y Quí-

mica Ambientales (SETAC). En 1993 la SETAC publicó el primer código de buenas prácticas en el que, entre otros, se describen los cuatro componentes principales de un ACV, esto es, definición de objetivos y alcance del estudio, análisis de inventario, evaluación de los impactos e interpretación.

En 1992, se fundó la SPOLD (*Society for the Promotion of LCA Development*), asociación de 20 empresas europeas con la finalidad de ayudar en la construcción de metodologías sobre ACV y promover su aplicación en la industria. SPOLD finalizó sus actividades a finales de 2001.

El ACV ha avanzado, pero como expresa la norma ISO 14040, se reconoce que el ACV está todavía en una etapa temprana de su desarrollo, y hay quienes dicen que en realidad está en su primera infancia (Roeznik y Hernández, 2005). En la Fig. 2.3 se muestra un esquema con la evolución histórica del ACV.

| | | | | |
|--|---|--|--|--|
| Primeros estudios: * Harold Smith *U.S. Department of Energy | Crisis del petróleo. Análisis Energéticos Envases y Gestión de Residuos. Coca-Cola EEUU y Batelle-Institute, Alemania. | Conciencia e Interés Medio Ambiente. Primera cumbre mundial sobre ambiente y desarrollo. Estocolmo. | Nació La SETAC: Society of Environmental Toxicology and Chemistry. Desarrollo y promoción de metodologías para el ACV | USEPA: ACV no era práctico. U.S. Environmental Protection Agency |
| 1960 | 1970 | 1972 | 1979 | 1975-1988 |
| Renacimiento del ACV "Crisis residuos sólidos" Movimiento Verde | Aplicación ACV Impulso de: *USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) *SAEFL (Oficina Federal Suiza para el Medio Ambiente, Bosques y Paisajes) * CML (Centro de Ciencias Ambientales de Leiden) | Se fundo: SPOLD: Society for the Promotion of LCA Development Asociación 20 empresas europeas (1992-2001) | SETAC: Cuatro Componentes del ACV. | Normas ISO 14040: Especificaciones del ACV |
| 1988 | 1990 | 1992 | 1993 | 1994 |

Figura 2.3: Evolución histórica del ACV

2.3. Metodología del análisis de ciclo de vida según Normas ISO

La metodología del análisis de ciclo de vida está estandarizada a través de las Normas de la Organización Internacional de Normalización o (ISO).

Desde el año 1997 al 2000 se elaboraron una serie de normas (ISO 14040 a ISO 14043) donde se describió la metodología a seguir para realizar un análisis de ciclo de vida. En 2006 se elaboraron dos normas (ISO 14040 e ISO 14044) que anulan y sustituyen a las anteriores (Segura, 2013). A continuación se mencionan cada una de ellas en base la resumen realizado por (Segura, 2013).

ISO 14040:1997 especifica la estructura general, los principios y requisitos de un estudio ACV, así como los aspectos que deben incluirse en el informe final. ISO 14041:1998 trata los aspectos a considerar en la definición de objetivos y alcance en el análisis de inventario del ciclo de vida y cómo deben recogerse los aspectos en el informe final. ISO 14042:2000 trata la evaluación del impacto de ciclo de vida. ISO 14043:2000 se relaciona con la interpretación de un ACV. ISO 14040:2006, trata lo relacionado con la gestión ambiental, el análisis de ciclo de vida y los principios y marco de referencia. Finalmente, ISO 14044:2006 relacionada con la gestión ambiental, el análisis de ciclo de vida y los requisitos y directrices. Como se mencionó anteriormente, las Normas ISO 14040 e ISO 14044 de 2006 anulan y sustituyen a las Normas ISO 14040:1997, ISO 14041:1998, ISO 14042:2000 e ISO 14043:2000 (ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Evolución y desarrollo del ACV según la norma ISO 14040. Fuente: Modificado de (Segura, 2013).

| Norma | Correspondencia | Año |
|--------------|---|------------|
| 14040 | Principios y Estructura | 1997 |
| 14041 | Definición de objetivos y alcance y análisis de inventario | 1998 |
| 14042 | Evaluación del impacto de ciclo de vida | 2000 |
| 14043 | Interpretación del ciclo de vida | 2000 |
| TR 14049 | Ejemplo de aplicación de ISO 14041 | 2000 |
| TS 14048 | Normalización de datos e información para una evaluación de ciclo de vida | 2002 |
| TR 14047 | Ejemplo de aplicación de la ISO 14042 | 2003 |
| 14040 | Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia | 2006 |
| 14044 | Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices | 2006 |
| TR 14047 | Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Ejemplos ilustrativos sobre cómo aplicar ISO 14044 para situaciones de evaluación de impactos | 2012 |

2.4. ISO 14040. ACV. Principios y marco de referencia

En la presente sección se estudia la norma ISO 14040 (ISO14040, 2006), básica para abordar el estudio.

2.4.1. Descripción general del análisis de ciclo de Vida

La norma ISO 14040 define el fin último por el cual se ha creado la metodología del análisis de ciclo de vida, el cual es ayudar a identificar oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de productos en las distintas etapas de su ciclo de vida. El ACV puede ayudar también a quienes toman decisiones en la industria y en organizaciones gubernamentales y no gubernamentales a través de la aportación de información para la planificación estratégica, el establecimiento de prioridades, el diseño y rediseño de productos o procesos; contribuye en la selección de indicadores de desempeño ambiental pertinentes, incluyendo técnicas de medición, y el *marketing*, por ejemplo, implementando un esquema de etiquetado ambiental, elaborando una reivindicación ambiental, o de una declaración ambiental de producto.

El ACV trata los aspectos ambientales e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final.

La Norma ISO 14040 describe los principios y marco de referencia para el análisis del ciclo de vida y aclara que no describe la técnica de ACV en detalle, ni especifica metodologías para las fases individuales del ACV. Presenta términos y definiciones, útiles para el desarrollo de este tipo de estudios, como por ejemplo: análisis de ciclo de vida, inventario de ciclo de vida, evaluación del impacto del ciclo de vida, interpretación del ciclo de vida, aspecto ambiental, unidad funcional, entre otros.

2.4.1.1. Principios del ACV

La Norma ISO 14040 (ISO14040, 2006) define los principios fundamentales que sirven de orientación para tomar decisiones relacionadas tanto con la planificación como con la realización de un ACV. A continuación se describen algunos de ellos. Los aspectos e impactos económicos y sociales generalmente están fuera del alcance del ACV. Se pueden combinar otras herramientas con el ACV para análisis más profundos.

Enfoque ambiental. Trata los aspectos e impactos ambientales de un sistema del producto.

Enfoque relativo o unidad funcional. El ACV es un enfoque relativo, que se estructura alrededor de una unidad funcional. La unidad funcional define lo que se está estudiando. Todos los análisis subsecuentes son por tanto relativos a esa unidad funcional.

Enfoque iterativo. El ACV es una técnica iterativa. Las fases individuales de un ACV utilizan resultados de las otras fases, lo que contribuye a la integridad y coherencia del estudio y de los resultados presentados. El carácter iterativo del ACV ocasiona que mientras se recopilan los datos e información, puedan tener que modificarse diversos aspectos del alcance para cumplir con el objetivo original del estudio.

Prioridad del enfoque científico. Las decisiones de un ACV se basan preferentemente en las ciencias naturales. Si esto no es posible, se pueden utilizar otros enfoques científicos (por ejemplo, de las ciencias económicas y sociales) o se puede hacer referencia a convenciones internacionales. Si no existe una base científica ni una justificación basada en otros enfoques científicos o en convenciones internacionales, las decisiones se pueden basar en juicios de valor.

2.4.1.2. Fases de un ACV

Los estudios de ACV se componen de cuatro fases (ISO14040, 2006). La relación entre ellas se mostró en la Fig. 2.2. Estas son:

a) Fase de definición del objetivo y el alcance, donde se incluyen los límites del sistema y el nivel de detalle. La profundidad y amplitud del ACV puede diferir considerablemente dependiendo del objetivo de un ACV en particular.

b) Fase de análisis del inventario del ciclo de vida (ICV). Es un inventario de los datos de entrada/salida, lo cual implica la recopilación de los datos necesarios para cumplir los objetivos.

c) Fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV). El objetivo de la EICV es proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del inventario del ciclo de vida de un sistema del producto a fin de comprender mejor su importancia ambiental.

d) Fase de interpretación del ciclo de vida, donde se resumen y discuten los resultados del ICV o del EICV o de ambos como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos.

2.4.1.3. Características de un ACV

La Norma ISO 14040 (ISO14040, 2006) describe las características del ACV, que son entre otras:

a) La evaluación sistemática de los aspectos e impactos ambientales de los sistemas del producto, desde la adquisición de la materia prima hasta la disposición final, de acuerdo con el objetivo y el alcance establecidos.

b) La naturaleza de un ACV se debe a las características de la unidad funcional.

c) El nivel de detalle y duración de un ACV pueden variar de manera considerable, dependiendo de la definición del objetivo y al alcance.

d) Se establecen disposiciones, dependiendo de la aplicación previa del ACV, para respetar la confidencialidad y la propiedad.

e) La metodología del ACV está abierta a la inclusión de nuevos hallazgos científicos y mejoras en el estado del arte de la técnica.

f) No hay un método único para realizar un ACV. Las organizaciones tienen flexibilidad para implementar un ACV de acuerdo con la aplicación prevista y los requisitos de la organización.

g) El ACV es diferente de muchas técnicas (tales como la evaluación del desempeño ambiental, la evaluación del impacto ambiental y la evaluación del riesgo) ya que es un enfoque relativo basado en una unidad funcional; sin embargo, el ACV puede utilizar la información obtenida con estas otras técnicas.

h) El ACV trata los impactos ambientales potenciales; el ACV no predice impactos ambientales absolutos o precisos debido, entre otros, al carácter relativo con relación a una unidad de referencia y a la incertidumbre inherente al modelar los impactos ambientales.

i) La evaluación de inventario de ciclo de vida asigna los resultados del inventario a categorías de impacto; para cada categoría de impacto, se selecciona un indicador de categoría de impacto, la recopilación de resultados del indicador (resultados de la EICV) proporciona información sobre los asuntos ambientales asociados con las entradas y salidas del sistema del producto.

j) La interpretación del ciclo de vida utiliza un procedimiento sistemático para identificar, calificar, verificar, evaluar y presentar las conclusiones basadas en los hallazgos de un ACV.

2.4.1.4. Conceptos generales del sistema del producto

El ACV modela el ciclo de vida de un producto como su sistema del producto, el cual desempeña una o más de las funciones definidas (ISO14040, 2006). Un sistema del producto se caracteriza por su función y no se puede definir en términos de sus productos finales como se aprecia en la Fig. 2.4.

Los sistemas del producto se subdividen en un conjunto de procesos unitarios (véase Fig. 2.5). Los procesos unitarios se vinculan entre sí mediante flujos elementales intermedios y/o de residuos para tratamiento, con otros sistemas de producto, mediante flujos de producto, y con el medio ambiente mediante flujos elementales (ISO14040, 2006). El nivel de detalle del modelado que se requiere para satisfacer el objetivo del estudio determina los límites de un proceso unitario.

Los flujos elementales incluyen la utilización de recursos y las emisiones al aire, y los vertidos al agua y al suelo asociados con el sistema. Estos datos son el resultado del ICV y constituyen la entrada para la EICV.

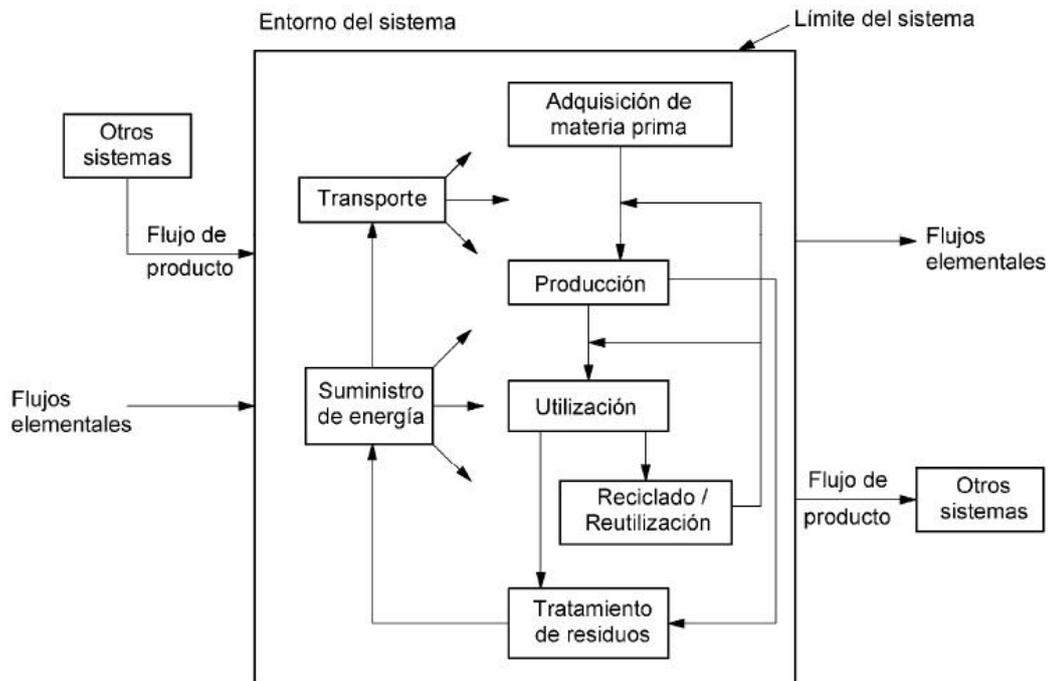


Figura 2.4: Ejemplo de un sistema del producto para el ACV. Fuente (ISO14040, 2006).

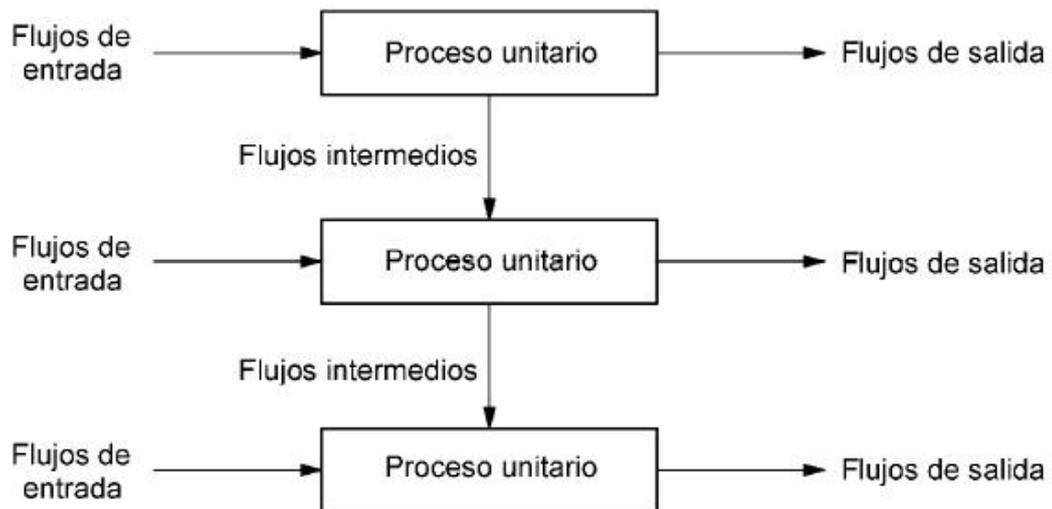


Figura 2.5: Ejemplo de un conjunto de procesos unitarios dentro de un sistema del producto. Fuente (ISO14040, 2006).

2.5. ISO 14044. Gestión ambiental. ACV. Requisitos y directrices

2.5.1. Definición del objetivo y del alcance

El objetivo de un ACV establece: la aplicación prevista; las razones para realizar el estudio; el público previsto, es decir las personas a quienes se prevé comunicar los resultados del estudio; y si se prevé utilizar los resultados en aseveraciones comparativas que se divulgarán al público.

El alcance incluye: el sistema del producto bajo estudio; las funciones del sistema del producto o, en el caso de estudios comparativos, los sistemas; la unidad funcional; los límites del sistema; los procedimientos de asignación; las categorías de impacto seleccionadas y la metodología de evaluación de impacto, y la subsecuente interpretación a utilizar; los requisitos relativos a los datos; las suposiciones; las limitaciones; los requisitos iniciales de calidad de los datos; el tipo de revisión crítica, si la hay; y el tipo y formato del informe requerido para el estudio.

2.5.1.1. Función, unidad funcional y flujos de referencia

Función. Un sistema puede tener varias funciones posibles y la(s) seleccionada(s) para el estudio depende(n) del objetivo y alcance del ACV. El alcance de un ACV debe especificar claramente las funciones (características de desempeño) del sistema bajo estudio.

Unidad funcional. La unidad funcional define la cuantificación de las funciones identificadas (características del desempeño) del producto. El propósito fundamental de una unidad funcional es proporcionar una referencia a la cual se relacionan las entradas y salidas. Por lo tanto, la unidad funcional debe ser claramente definida y ser medible. Se necesita esta referencia para asegurar que los resultados del ACV son comparables.

Flujos de referencia. Los flujos de referencia son la cantidad de productos necesaria para cumplir la función. Es importante determinar el flujo de referencia en cada sistema del producto, para cumplir con la función prevista.

2.5.1.2. Límites del sistema

Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios se deben incluir dentro del ACV. La selección de los límites del sistema debe ser coherente con el objetivo del estudio. Se deben identificar y explicar los criterios utilizados para establecer los límites del sistema. Las decisiones se deben tomar considerando los procesos unitarios a incluir en el estudio y el nivel de detalle al que se deben estudiar estos procesos unitarios.

Para las entradas de material, el análisis comienza con la selección inicial de las entradas a estudiar. Esta selección debería estar basada en la identificación de las entradas asociadas con cada uno de los procesos unitarios que se van a modelar. Este esfuerzo se puede realizar con datos recopilados de los sitios específicos o de fuentes publicadas.

Las entradas y salidas de energía se deben tomar como cualquier otra entrada o salida de un ACV. Los distintos tipos de entradas y salidas de energía deben incluir las entradas y salidas pertinentes para la producción y entrega de combustibles, energía base y energía de proceso utilizada dentro del sistema que se está modelando.

En la práctica del ACV se utilizan varios criterios de corte para decidir qué entradas se incluyen en la evaluación, tales como masa, energía y la importancia ambiental. Realizar la identificación inicial de las entradas únicamente en función de la contribución de la masa puede dar lugar a omitir entradas importantes en el estudio. En consecuencia, se debería utilizar también en este proceso la energía y la importancia ambiental como criterios de corte.

2.5.1.3. Requisitos de calidad de los datos

Los requisitos de calidad de los datos especifican, en términos generales, las características de los datos necesarios para el estudio.

Las descripciones de la calidad de los datos son importantes para comprender la fiabilidad de los resultados del estudio e interpretar correctamente los resultados del estudio (ISO14040, 2006).

2.5.1.4. Comparación entre sistemas

Los sistemas deben compararse utilizando la misma unidad funcional y consideraciones metodológicas equivalentes como el desempeño, los límites del sistema, la calidad de los datos, los procedimientos de asignación, las reglas de decisión sobre evaluación de entradas y salidas y la evaluación del impacto.

2.5.2. Análisis de inventario del ciclo de vida (ICV)

La definición del objetivo y el alcance de un estudio proporciona el plan inicial para realizar la fase del inventario del ciclo de vida de un ACV, con los pasos mostrados en la Fig. 2.6. Los datos cualitativos y cuantitativos a incluir en el inventario deben recopilarse para cada proceso unitario incluido dentro de los límites del sistema. Los datos recopilados, ya sean medidos, calculados o estimados, se utilizan para cuantificar las entradas y salidas de un proceso unitario. Todos los datos de entrada y salida del sistema están referenciados a la unidad funcional.

2.5.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV)

La evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) es un enfoque relativo basado en una unidad funcional. La fase de EICV incluye la recopilación de los resultados de indicadores para las diferentes categorías de impacto, que juntas representan el perfil de la EICV para el sistema del producto.

La EICV está constituida por elementos obligatorios y opcionales.

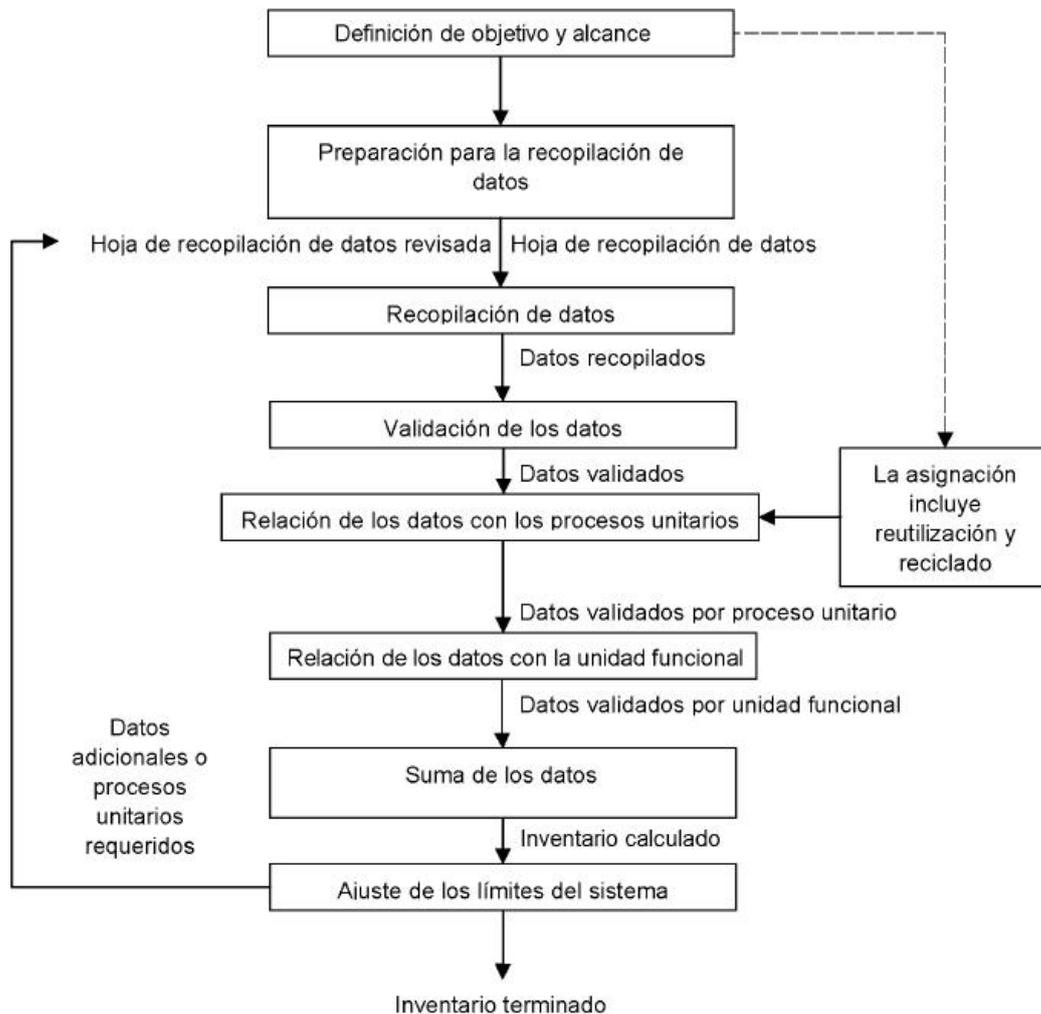


Figura 2.6: Procedimientos simplificados para el análisis de inventario. Fuente (ISO14044, 2006).

2.5.3.1. Elementos obligatorios de la EICV

Los elementos obligatorios de la evaluación de inventario de ciclo de vida (EICV) son los siguientes:

- selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización;
- asignación de resultados del ICV a las categorías de impacto seleccionadas (clasificación);
- cálculo de los resultados de indicadores de categoría (caracterización).

2.5.3.2. Elementos opcionales de la EICV

Los elementos opcionales, que se indican a continuación, pueden ser utilizados dependiendo del objetivo y del alcance del ACV.

- a) normalización: cálculo de la magnitud de los resultados de indicadores de categoría en

relación con la información de referencia;

b) agrupación: organización y posible clasificación de las categorías de impacto;

c) ponderación: conversión y posible suma de los resultados del indicador a través de las categorías de impacto utilizando factores numéricos basados en juicios de valor;

d) análisis de la calidad de los datos: mejor comprensión de la fiabilidad en la recopilación de los datos del indicador y del perfil de la EICV.

2.6. Categorías de impacto medioambiental

El análisis de ciclo de vida proporciona una visión integral de todas las categorías de impacto necesarias para valorar procesos y productos en relación al potencial contaminante, por lo que no se recomienda evaluar el proceso o producto con base en una sola categoría de impacto, por ejemplo evaluando solamente la producción de CO₂ eq. El ejemplo más claro es la producción de energía eléctrica en una central nuclear. El proceso de fisión y generación eléctrica no genera emisiones de CO₂, pero genera una gran cantidad de residuos nucleares peligrosos. Desde el punto de vista de una metodología de evaluación de impactos de ciclo de vida que mida solo las emisiones de CO₂ eq, el proceso no sería contaminante, cuando realmente no es así (Ihobe, 2011).

Existen multitud de categorías de impacto medioambiental. La selección de unas u otras en el ACV dependerá del objetivo del estudio y del nivel de exactitud de los resultados requeridos. A modo orientativo se indican las principales categorías, en la Tabla 2.2 (Segura, 2013).

Tabla 2.2: Categorías de impacto medioambiental de evaluación del impacto ambiental. Fuente (Segura, 2013).

| Categorías de impacto ambiental | Descripción | Unidad de referencia | Factor de caracterización |
|-------------------------------------|--|---------------------------------------|---|
| Calentamiento global | Fenómeno observado en las medidas de la temperatura que muestra en promedio un aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas. | kg. eq. CO ₂ | Potencial Calentamiento global (PCG) |
| Consumo de recursos energéticos | Energía consumida en la obtención de las materias primas, fabricación, distribución, uso y fin de vida del elemento analizado. | MJ | Cantidad consumida |
| Reducción de la capa de ozono | Efectos negativos sobre la capacidad de protección frente a las radiaciones ultravioletas solares de la capa de ozono atmosférica. | kg. eq. CFC-11 | Potencial de agotamiento de la capa de ozono (PAO) |
| Eutrofización | Crecimiento excesivo de la población de algas originado por el enriquecimiento artificial de las aguas de ríos y embalses como consecuencia del empleo masivo de fertilizantes y detergentes que provoca un alto consumo del oxígeno del agua. | kg. eq. NO ₃ | Potencial de eutrofización |
| Acidificación | Pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra, en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera. | kg. eq. SO ₂ | Potencial de acidificación (PA) |
| Consumo de materias primas | Consumo de materiales extraídos de la naturaleza | Tm | Cantidad consumida |
| Formación de oxidantes fotoquímicos | Formación de los precursores que dan lugar a la contaminación fotoquímica. La luz solar incide sobre dichos precursores, provocando la formación de una serie de compuestos conocidos como oxidantes fotoquímicos (el ozono-O ₃ es el más importante por su abundancia y toxicidad) | kg. eq. C ₂ H ₄ | Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos (PFOF) |

2.7. Herramientas informáticas para el ACV

El Análisis de Ciclo de Vida requiere el manejo de gran cantidad de datos. Para ello se han desarrollado programas que permiten introducir los datos generados en la fase de Inventario de Ciclo de Vida (ICV) y obtener los resultados del impacto generado por las categorías seleccionadas. Actualmente existe una gran gama de herramientas *software* para llevar a cabo un ACV, a las cuales se les anexa una gran variedad de bases de datos y metodologías.

El ACV constituye una importante parte de los métodos de evaluación (Deng et al., 2014). Entre las herramientas generales de Análisis de Ciclo de Vida se encuentran las descritas en las Tablas 2.3 y 2.4, donde se indican esquemáticamente las características que pueden llegar a desarrollar, sin olvidar que existen muchas otras herramientas (Segura, 2013).

Las bases de datos son listados de productos caracterizados en función de diversos parámetros ambientales. Estas bases de datos se presentan generalmente en aplicaciones que permiten su consulta o su uso en programas de análisis de ciclo de vida. Existen bases de datos que están enfocadas a los distintos productos o campos, como son construcción, materiales, plásticos, madera, transporte, residuos, entre otros (Segura, 2013). Algunas de las más importantes se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.3: Herramientas informáticas para el desarrollo del análisis de ciclo de vida. Fuente (Segura, 2013).

| Nombre | Desarrollador | Enfoque | Características |
|----------|---|----------|---|
| Gabi | Instituto de ciencia y ensayos de polímeros (IKP) y la Universidad de Stuttgart en colaboración con PEEUROPE GMBH | Genérico | <p>Descripción gráfica del ciclo de vida del producto mediante estructura jerárquica.</p> <p>Entradas y salidas asociadas a cada proceso.</p> <p>* Flujos entre procesos.</p> <p>Posibilidad de modificación en cualquier momento de todos los parámetros del ciclo de vida del producto.</p> <p>Posibilidad de reutilización de procesos y planes creados en otros proyectos.</p> <p>Permite análisis tipo: LCA: Life Cycle Assessment, LCC: Life Cycle Cost y LCWT: Life Cycle Working Time.</p> <p>Alimentación de datos del ICV en formato fichas (similitud con SimaPro).</p> <p>Asignación posterior de cada dato de ICV a un dato concreto de la BBDD.</p> <p>Gran variedad de representación de los datos.</p> <p>Redacción de informes de acuerdo a exigencias ISO de ACV.</p> <p>Posibilidad de asignación de cargas.</p> <p>Posibilidad de análisis de: escenarios de fin de vida, sensibilidad y Monte Carlo.</p> <p>Permite exportar la información tanto en formato Ecosplod y en Excel.</p> <p>http://www.gabi-software.com/</p> |
| SimaPro8 | PRE-Consultants | Genérico | <p>* Disponibles protocolos para la realización guiada de ACVs.</p> <p>Posibilidad de modificación en cualquier momento de todos los parámetros del ciclo de vida del producto.</p> <p>Permite análisis tipo: LCA: Life Cycle Assessment, LCC: Life Cycle Cost.</p> <p>Posibilita la redacción de informes de acuerdo a exigencias ISO de ACV.</p> <p>Posibilidad de análisis de: incertidumbre de los datos, escenarios de fin de vida, análisis de sensibilidad y Monte Carlo.</p> <p>Permite exportar la información tanto en formato Ecosplod y en Excel.</p> <p>http://www.pre.nl/pre/default.htm</p> |
| Umberto | Ifu Hamburg GMBH | Genérico | <p>Interfaz gráfica muy intuitiva que posibilita la elaboración de ciclos de vida de producto (diagramas SANKEY)</p> <p>Procesos componentes del CV</p> <p>Entradas y salidas asociadas a cada proceso</p> <p>Alimentación de datos de ICV en formato fichas (similitud con SimaPro)</p> <p>Alta flexibilidad en la elección del límite del sistema, con posibilidad de ser definidos individualmente.</p> <p>Permite análisis tipo: LCA: Life Cycle Assessment, LCC: Life Cycle Cost.</p> <p>Gran variedad de representación de los datos del análisis, tanto en lo referente al balance del sistema, como a la EICV.</p> <p>Distintas interfaces para la conexión del programa a otras aplicaciones.</p> <p>Posibilidad de análisis de: escenarios de fin de vida, sensibilidad y Monte Carlo.</p> <p>Permite exportar la información tanto en formato Ecosplod y en Excel.</p> <p>http://umberto.de/en/</p> |

Tabla 2.4: Herramientas informáticas para el desarrollo del análisis de ciclo de vida. Fuente (Segura, 2013).

| Nombre | Desarrollador | Enfoque | Características |
|--------------------------------------|--|---|---|
| Bees 4.0 | National Institute of estándar and Technology (NIST), USA | Materiales de construcción | Apoyado por el programa de compra verde del EPA y el laboratorio de investigación del fuego y la construcción. Contiene aprox. 200 productos, clasificados según UNIFORMAT II, clasificación estándar de ASTM. Informes conformes a ISO de ACV Dispone de la metodología TRACI Las fases de análisis e interpretación se realizan a través de la American Section of International Association for Testing Material (ASTM) Las bases de datos se pueden exportar a Excel. Está actualizado y es gratuito. Exportable a Excel. http://www.brnl.nist.gov/oa/bees.html |
| Team | Ecobilan Pricewaterhousecoopers | Genérico | Menú principal dividido en cuatro submenús muy intuitivo. * Ventana de estructura de árbol CV Diagrama de flujos y procesos Lista de módulos disponibles Lista de flujos disponibles Introducción de datos con características similares a Gabi. Posibilidad de modificación en cualquier momento de todos los parámetros del ciclo de vida del producto. Posibilita la redacción de informes de acuerdo con la normativa ISO de ACV Posibilidad de análisis de: incertidumbre de los datos, escenarios de fin de vida, sensibilidad y Monte Carlo. Permite exportar la información tanto en formato Ecosplod y en Excel. http://www.ecobilan.com/ukteam.php |
| LSP | University of Amsterdam (IVAM), Holland | Municipios, planes urbanísticos y desarrollo de proyectos | Medición del perfil de sostenibilidad de un emplazamiento (Location Sustainability Profile) Disponible de un estándar de comparación de 10 modelos diferentes. jkortman@ivam.uva.nl |
| ECO-BAT 3.0 | Haute Ecole d'Ingeniere et de Gestion du Canton de Vaud, Switzerland | Construcción y edificación | Más de 60 materiales de construcción calculados a partir de Ecoinvent. Métodos EIVC: Ec99, UBP (Ecopoints 97), Impact2002+ http://www.eco-bat.ch |
| ENVIRONMENTAL IMPACT ESTIMATOR 3.0.2 | Athena Sustainable Materials Institute, Canada | Construcción y edificación | Diferencia tipologías de construcciones Dispone de BBDD propia Dispone de Ecocalculator, el cual permite realizar ACVs de materiales de construcción Dispone de EICV propio http://www.athensmi.org |
| EPD TOOLS SUIT 2007 | Itke Environmental Technology Inc, China | Genérico construcción | Información únicamente disponible en chino Estandariza la recogida de datos (EPD inputer) de acuerdo a un determinado PCR, que luego exporta (EPD verifier) a un organismo de certificación de EPDs http://www.itke.com.cn/software |
| LEGEP 1.2 | LEGEP Software GmbH | Construcción y edificación | Herramienta muy completa para el sector de la construcción sostenible Utiliza como base de datos Ecoinvent. Utiliza como método EICV CML2001, aunque se pueden configurar otros http://www.legexp.de |
| LTE-OGIP 5.0 | h.e. Software GmbH, Germany | Construcción y edificación | Permite analizar los cambios en el edificio Utiliza básicamente Ecoinvent como base de datos, aunque dispone de otras secundarias como BEK o NPK. Solamente dispone de valores agregados: CER, CED (Cumulated Energy Demand), etc. Métodos EICV disponibles: EC99, Ecopoints97 Permite exportar la información en Excel y en pdf. http://www.the-software.de/ogip/einfuehrung.html |

Tabla 2.5: Principales bases de datos de ACV. Fuente (Segura, 2013).

| Base de datos+versión | Proveedor | Idioma |
|---|--|-----------------------------|
| CPM LCA Database | Center for Environmental Assessment of Product and Material Systems-CPM | Inglés |
| DEAM | Ecobilan-PricewaterhouseCoopers | Inglés |
| DEAM Impact | Ecobilan-PricewaterhouseCoopers | Inglés |
| DIM 1.0 | ENEA- Italian National Agency for New Technology, Energy an the Enviroment | Italiano Inglés |
| ECODESIGN X-Pro database v1.0 | Ecomundo | Inglés |
| Ecoinvent data v1.3 | Ecoinvent Centre | Japonés Inglés |
| EIME V8.0 | CODDE | Español Francés Inglés |
| EIME V9.0 | CODDE | Español Francés Inglés |
| Esu-services database v1 | ESU-services Ltd. | Alemán Inglés |
| Eurofer data sets | EUROFER | Inglés |
| Gabi databases 2006 | Pe International Gmbh | Japonés Alemán Inglés |
| GEMIS 4.4 | Oeko-Institut, Darmstadt (Institute for applied Ecology) | Español Checo Alemán inglés |
| IO-database for Denamark 1999 | 2.0 LCA consultants | Inglés |
| IVAM LCA Data 4.04 | IVAM University of Amsterdam bv | Inglés |
| KCL Ecodata | Oy keskulaboratorio, KCL Centrlaboratorium Ab | Inglés |
| LC Data | Forschungszentrum Karlsruhe | Alemán Inglés |
| LCA Database for the Forest Wood Sector | Bundesforschungsanstalt für Forst-und Holzwirtschaft (BFH) | Alemán Inglés |
| IVAM LCA Data 4.04 | IVAM University of Amsterdam bv | Inglés |
| LCA_sostenipra_v.1.0 | Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) | Español Catalán Inglés |
| IVAM LCA Data 4.04 | IVAM University of Amsterdam bv | Inglés |
| MFA_sostenipra_v.1.0 | Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) | Español Catalán Inglés |
| Option Data pack | National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) | Japonés |
| PlasticEurope Eco-profiles | PlasticsEurope | Inglés |
| ProBas | Umweltbundesamt | Alemán |
| Sabento library 1.1 | Ifu Hamburg Gmbh | Alemán Inglés |
| IVAM LCA Data 4.04 | IVAM University of Amsterdam bv | Inglés |
| SALCA 061 | Agroscope Reckenholz-Tänikon research Station ART | Alemán Inglés |
| Sabento library 1.1 | Ifu Hamburg Gmbh | Alemán Inglés |
| IVAM LCA Data 4.04 | IVAM University of Amsterdam bv | Inglés |
| SALCA 071 | Agroscope Reckenholz-Tänikon research Station ART | Alemán Inglés |
| SimaPro database | Pré Consultants B.V. | Inglés |
| sirAdos 1.2. | LEGEP Software GmbH | Alemán inglés |
| The Boustead Model 5.0.12 | Boustead Consulting Limited | Inglés |
| Umberto library 5.5 | Ifu Hamburg GmbH | Alemán Inglés |
| Sabento library 1.1 | Ifu Hamburg Gmbh | Alemán Inglés |
| IVAM LCA Data 4.04 | IVAM University of Amsterdam bv | Inglés |
| US Life Cycle Inventory | Database Athena Sustainable Materials Institute | Inglés |
| Waste Technology Data Centre | UK Enviroment Agency | Inglés |

2.7.1. Elección de la herramienta informática para el ACV

Para la elección del *software* se tienen en cuenta características como que sea una herramienta que posea bases de datos bien definidas (con un grado alto de conocimiento de los procesos y de los datos en función de los formatos de los mismos), asegure periodos de regularización continua de dichas bases de datos teniendo en cuenta los avances tecnológicos para asegurar que dichas bases de datos no queden obsoleta, posea la capacidad de trabajar con varias bases de datos, obtenga resultados concretos a través de una metodología específica, permita la comparación de los resultados en varias metodologías, sea útil a la hora de analizar la relación de los resultados y el impacto ambiental, sea capaz de manejar resultados tanto específicos como generales, como por ejemplo datos de cantidades consumidas y por otro lado la carga ambiental del sistema analizado, posibilite la modificación en cualquier momento de todos los parámetros del ciclo de vida del producto.

Se elige el *software SimaPro* debido a que es una herramienta completa y flexible que permite desarrollar estudios de ACV de productos, servicios o procesos. Ofrece una interfaz basada en la ISO 14040 y puede ser desarrollada para complejos modelos bajo diversos 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 (Monte Carlo). 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. Además incorpora una amplia biblioteca de datos que cubren un total de 6.000 procesos distintos. Las principales bases de datos incluidas son: Danish IO database (1999), Danish Food database (2003), Ecoinvent v1.2 (2005), y v 2.0 (2007), USA input output (2003), Industry data (2001), Idemat (2001), Buwal 250 (1997), ETH-ESU (1996) y Franklin (1996). SimaPro es una herramienta con aplicación al ecodiseño, al desarrollo de ecoetiquetas, al cálculo de huellas de carbono o huellas hídricas, entre otros.

2.7.1.1. Software simaPro

SimaPro es un programa desarrollado por la empresa holandesa PRé Consultants, que permite realizar análisis de ciclo de vida mediante el uso de bases bibliográficas de datos de inventario del *software* y propias (creadas por el usuario) (Goedkoop y Oele, 2004). Ofrece una herramienta profesional para almacenar, analizar y realizar un seguimiento del rendimiento ambiental de los productos y/o servicios. Con esta herramienta se facilita el análisis y la representación gráfica de ciclos complejos de un modo sistemático y transparente. Algunas características:

- Modelaje con parámetros y análisis de escenarios.
- ACV híbrido con entradas y salidas para la información.
- Cálculos de evaluación de impacto directo en cada etapa de su modelo.
- Análisis de Monte Carlo.
- Análisis de resultados interactivos: Posibilidad de rastrear los resultados hasta sus orígenes, en tiempo real.

- Análisis de puntos débiles: Usando el árbol de procesos para identificar si hay alguna zona peligrosa.
- Análisis de escenarios complejos de tratamiento de desechos y reciclaje.

Amplias funcionalidades de análisis:

- Fácil identificación de oportunidades de mejora de productos o procesos gracias a la posibilidad de evaluar los impactos de las diferentes etapas del modelo y su contribución al impacto global.
- Comparativa entre varios productos o procesos.
- Obtención de resultados gráficos (diagramas de barras, de flujos, de árbol, etc.) y resultados numéricos en forma de tabla exportables a Excel.
- Amplias opciones de filtrado para la visualización de los resultados.

Opciones avanzadas:

- Enlace directo con Excel u otras aplicaciones externas.
- Uso de parámetros para el análisis de diferentes escenarios.
- Evaluación de incertidumbre de los resultados mediante análisis de Monte Carlo.

Adaptabilidad:

- El usuario puede incluir nuevas metodologías de evaluación o adaptar las existentes
- Incluir o modificar datos de productos o procesos según las necesidades, con datos propios o con datos de bases de datos de referencia.

Evaluación socio-económica:

- Complementario a la evaluación ambiental, el programa permite realizar estudios Life Cycle Costing y Social-ACV.
- Análisis de los impactos económicos y sociales de un producto o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida.

2.8. Metodología para la evaluación de los impactos ambientales

Para la evaluación de los impactos ambientales se trata de convertir la información obtenida en el Inventario de Ciclo de Vida en algo interpretable. Para ello se reduce el número de criterios a los efectos sobre un número concreto de impactos ambientales, siguiendo el procedimiento propuesto por la SETAC: Clasificación, caracterización, normalización y valoración o ponderación.

Se evalúan los impactos ambientales de cada uno de los sistemas de climatización en las fases de montaje, uso y disposición final. En la etapa de montaje se realiza un balance considerando la cantidad y clase de materia prima requerida para la fabricación de los sistemas. No se cuantifica el consumo de energía durante el proceso de fabricación y ensamblaje de los equipos. En la etapa de uso, el balance considera la cantidad de materia y energía requerida para el funcionamiento de los equipos. En la etapa de disposición final, se tiene en cuenta el transporte desde Valladolid hasta la planta de reciclaje de los sistemas analizados.

Los resultados se obtienen con la metodología EPS2000 (*Environmental Priority Strategies*) implementada en el *software* SimaPro. El método EPS2000 fue desarrollado por el Swedish Environmental Research Institute en 1991, por encargo de la empresa Volvo (Suecia). Está basado en métodos de valoración de economía ambiental, es decir, en la determinación del daño y en su asignación monetaria. Este método tiene en cuenta la voluntad de pagar para restaurar los cambios causados, siendo la unidad del indicador final el ELU (*Environmental Load Unit* o unidad de carga ambiental).

2.8.1. La metodología EPS o estrategias de prioridad ambiental

El sistema de estrategias de prioridad ambiental, EPS, es un sistema de valoración en el cual las emisiones de sustancias al medio ambiente y la extracción de recursos del medio ambiente son medidas comunes, que pueden ser comparadas o añadidas. El resultado es un valor de carga ambiental. La dimensión de esta cantidad es la misma para todas las emisiones y extracción: 1 ELU asciende a la unidad monetaria europea en los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, OCDE, (*Organisation for Economic Co-operation and Development*). Las categorías de impacto se identifican a partir de cinco temas de protección:

- salud humana;
- biodiversidad (capacidad de producción de los ecosistemas);
- fuente de recursos abióticos;
- valores culturales y recreativos.

La salud humana incluye los siguientes indicadores:

- esperanza de vida, expresado en años de vida perdidos por las personas
- morbilidad severa y sufrimiento, en la persona por año, incluyendo el hambre
- morbilidad, en la persona por año, como el frío
- molestia severa, en la persona por año, que normalmente causa una reacción para evitar la molestia
- molestia, en la persona por año, pero no causa una reacción directa

La capacidad de producción de los ecosistemas es incluida por defecto las siguientes categorías de impacto:

- La capacidad de producción de los cultivos, en kg. de peso en cosecha
- La capacidad de producción de madera, en kg. de peso seco
- La capacidad de producción de pescado y carne, en kg. de peso de animales
- Capacidad de cationes H^+ , en moles equivalentes (se utilizan solo cuando no están disponibles otros indicadores)

Para cada área básica se ha derivado la disposición a pagar. Hay efectos sobre la salud, la biodiversidad y la producción; algunos impactos son negativos, otros son positivos. El efecto invernadero tiene varios efectos negativos, como la muerte por ahogamiento debido a la subida del nivel del mar. Se consideran ocho impactos, y la suma de todos los índices de carga ambiental parcial produce el índice de carga ambiental neta de 1 kg.CO₂ emitido al aire.

Ante todo, cabe señalar que el EPS es un sistema en desarrollo. Este sistema ha recibido varias críticas. La primera se refiere a la valoración de los diferentes tipos de sujetos de salvaguardia. Esto es, el agotamiento es altamente valorado en comparación con la salud humana.

La valoración de agotamiento se deriva, por ejemplo, de la posibilidad de recuperar materiales procedentes de vertederos. Para la salud humana, se utiliza un método completamente incomparable debido a que el ser humano y su salud no se pueden cuantificar en dinero. Otra objeción se refiere a la incertidumbre con respecto a los impactos de las emisiones. Mientras que algunas personas sostienen que el efecto invernadero ni siquiera existe, al menos es difícil de atribuir a las emisiones de gases de efecto invernadero una subida del nivel del mar y un aumento concomitante de muerte por ahogamiento. La extrapolación en términos de reducción de la esperanza de vida debido a las contribuciones positivas y negativas es aún más problemática (Council, 1997).

El desarrollo del sistema EPS ha conducido a una jerarquía entre sus principios y normas. Los principios generales de su desarrollo son:

- El principio de arriba-abajo (a la utilidad del sistema se le da mayor prioridad);
- El principio de índice (índices que representan ponderación e impactos agregados);
- El principio del índice por defecto (se requiere un método operativo por defecto);
- El principio de incertidumbre (se ha estimado la incertidumbre de los datos de entrada)
- Elección de datos por defecto y modelos para determinarlos

El sistema EPS está orientado principalmente como una herramienta interna de la empresa para el proceso de desarrollo de producto. El sistema está desarrollado para ayudar a los diseñadores y desarrolladores de productos a encontrar conceptos de productos que tengan el menor impacto sobre el medio ambiente. Con los modelos y datos del EPS se intenta mejorar el comportamiento ambiental de los productos. La elección y diseño de los modelos y datos se realizan desde una perspectiva de utilidad prevista por el desarrollador de los productos. Estos modelos y datos no están destinados por ejemplo, a ser utilizados como base para la protección del medio ambiente por sustancias simples, o como única base para obtener declaraciones de productos ambientales. En la mayoría de los casos es necesario incluir información y modelos específicos. El método por defecto EPS2000 es una actualización de la versión de 1996.

CAPÍTULO 3

Edificios Próximos a Cero Energía

RESUMEN: En el presente Capítulo se desarrollan los conceptos sobre edificios cercanos a cero energía (NZEB), reducción de la demanda de energía en los edificios, y suministro de energía para edificios (NZEB); posteriormente se estudia el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en edificios y se presentan ejemplos de ACV en edificios cercanos a cero energía.

3.1. Edificios próximos a cero energía. Definición

Los edificios cercanos a energía neta cero NZEB (por sus siglas en inglés *Net Zero Energy Building*), son edificios de consumo de energía casi nulo, que logran esta condición reduciendo drásticamente la demanda e integrando energías renovables en el sitio (Björn et al., 2013). Se percibe como una solución realista para la mitigación de las emisiones de CO₂ y/o la reducción del consumo de energía en el sector de la construcción.

A nivel internacional se discuten y proponen objetivos de desarrollo de ZEB (*Zero Energy Building*): por ejemplo, en los Estados Unidos en la Ley de Independencia Energética y Seguridad de 2007 y, a nivel europeo, dentro de la refundición de la Directiva sobre el rendimiento energético de los edificios (EPBD) adoptada en mayo de 2010 (Marszal, 2011). En Estados Unidos se especifica además, un objetivo para 2040 de energía cero para el 50 % de los edificios comerciales y para el año 2050 energía cero neta en todos los edificios comerciales.

La Unión Europea a través de la refundición de la Directiva sobre el rendimiento energético de los edificios EPBD establece el edificio de energía casi cero como el objetivo de construcción a partir de 2018 para todos los edificios de propiedad pública u ocupados por las autoridades públicas y a partir de 2020 para todos los edificios nuevos (UE, 2010).

Sobre la definición de edificio cero energía, varios autores coinciden en que falta una definición de común acuerdo y en la necesidad de una metodología de cálculo robusta ganando atención sobre cómo se calcula el balance cero. La Directiva Europea de Eficiencia Energética define los edificios de consumo de energía casi nulo como aquellos con un nivel de eficiencia energética muy alto. La cantidad casi nula o muy baja de energía requerida debería estar cubierta, en muy amplia medida, por energía procedente de fuentes renovables producida en

el lugar o en el entorno (UE, 2010).

Por otra parte el Consejo Europeo acordó en 2007 tres objetivos a alcanzar en el año 2020 a través de la política 20-20-20 considerados clave de cara a la mitigación del cambio climático que consisten en:

- Reducir en al menos un 20 % las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de aquí al 2020.
- Lograr que las Energías renovables representen el 20 % del consumo energético en 2020.
- Reducir, mediante la mejora de la eficiencia energética, un 20 % el consumo energético en Europa en 2020.

Según el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER), solo hay tres caminos para conseguir esos objetivos:

- a) Desarrollo tecnológico y normativo hacia el estándar de edificio cero.
- b) Reducción drástica de las emisiones en las ciudades existentes.
- c) Integración a gran escala de las energías renovables.

3.2. Reducción de la demanda energética en los edificios

Para la reducción drástica de la demanda pueden implementarse estrategias pasivas y de eficiencia energética NZEB. Dentro de las estrategias pasivas se tienen: optimización del diseño arquitectónico, incremento de las ganancias solares, optimización de la iluminación natural, almacenamiento pasivo de energía térmica, estructuras termoactivas y materiales de cambio de fase-PCMs (*Phase Change Materials*).

3.2.1. Eficiencia energética

Algunas medidas de eficiencia energética son: aislamientos térmicos avanzados, sombreamientos inteligentes, almacenamiento activo de energía térmica, sistemas de control avanzados, equipos de elevada eficiencia, y sistemas de iluminación inteligente.

Dentro de las estrategias para lograr eficiencia energética en edificaciones se tienen: el uso de aislamiento térmico en la envolvente (muros, techos y ventanas), la reducción de pérdidas de calor por infiltración en invierno, la adecuada orientación del edificio, permitir la entrada del sol en invierno (evitar sombras arrojadas por otros edificios), evitar el ingreso del sol en verano (diseñar protecciones solares fijas, móviles o naturales), utilizar sistemas de calefacción y aire acondicionado eficientes (etiquetado energético). La Fig. 3.1 presenta las estrategias pasivas y de eficiencia energética NZEB, mencionadas anteriormente.

| ESTRATEGIAS PASIVAS Y DE EFICIENCIA ENERGÉTICA NZEB | |
|---|--|
| Medidas de Eficiencia Energética | Medidas de Diseño Pasivo |
| Aislamientos térmicos avanzados | Optimización del diseño arquitectónico |
| Sombreamientos inteligentes | Incremento de las ganancias solares |
| Almacenamiento activo de energía térmica | Optimización de la iluminación natural |
| Sistemas de control avanzados | Almacenamiento pasivo de energía térmica |
| Equipos de elevada eficiencia | Estructuras termoactivas |
| Sistemas de Iluminación inteligente | Materiales de cambio de fase - PCMs |

Figura 3.1: Estrategias pasivas y de eficiencia energética NZEB. Fuente:(Marszal, 2011).

3.3. Suministro de energía para edificios NZEB

Se han realizado estudios para calcular el balance de energía en NZEBs, como el realizado por Bourrelle J. S., et al., (2013) (Bourrelle et al., 2013) en el que presenta un nuevo enfoque para el balance de energía en NZEBs, donde se remarca la diferencia importante entre la prevención del aumento en la demanda de energía de la red y asegurar que el edificio no requiera de energía no renovable (Bourrelle et al., 2013).

El suministro de energía para edificios NZEB se realiza mediante fuentes renovables de energía como la energía solar térmica, solar fotovoltaica, biomasa/biocombustibles, energía eólica, bomba de calor geotérmica y refrigeración solar. La Fig. 3.2 presenta estas fuentes de energía. Respecto de la unidad aplicada para el balance cero, puede estar influenciada por un número de medidas, por lo tanto puede utilizarse más de una unidad en la definición y/o metodología de cálculo. Estas pueden ser, por ejemplo, la energía final entregada, la energía final usada o no ponderada, la energía primaria, las emisiones de CO₂ equivalentes, la exergía, el costo de la energía u otros parámetros definidos por la política energética nacional (Marszal, 2011). El presente trabajo tiene en cuenta la definición de edificio cercano a energía cero de la Directiva 31 de 2010, de la Unión Europea, donde utiliza la energía primaria como la medida para el balance de energía (UE, 2010).

Con relación al periodo de balance de la energía, puede ser un ciclo de vida completo del edificio, el tiempo de funcionamiento del edificio, el balance anual, o un equilibrio estacional o mensual (Marszal, 2011). El ciclo de vida del edificio podría ser el periodo más apropiado para el balance de energía y se sugiere tener en cuenta la energía usada en la construcción del edificio, en las instalaciones (sistemas) y en la fase de operación. Mediante la aplicación de este equilibrio es posible evaluar el verdadero impacto ambiental del edificio (Patxi y Paul, 2010).

Debido a que el objetivo del presente trabajo es hacer un análisis comparativo de los impactos ambientales ocasionados por sistemas de energía renovables respecto de los sistemas usados actualmente en el edificio Aulario de la Universidad de Valladolid, el estudio se centra en el ciclo de vida de los sistemas y se toma como periodo de balance de la energía el ciclo de vida de los sistemas, se asumen 30 años para los sistemas de calefacción e iluminación y 25 años para los sistemas de ventilación. No se tiene en cuenta la energía usada en la construcción y demolición del edificio.

Sobre el balance de energía en el edificio NZEB, el tipo de balance más usado es el equilibrio entre las necesidades de energía o el consumo y la generación de energía renovable (Marszal, 2011). Bajo esta premisa se diseñan los sistemas de energía renovables partiendo de la energía usada actualmente. Si los sistemas proporcionan más energía durante un año que la usada por el edificio se cumple la meta de cero energía.

En relación al suministro de energía renovable, según Marszal la mayoría de las metodologías reconocen dos opciones para el suministro renovable: huella del edificio y en el sitio. Otras metodologías reconocen la opción de suministro renovable fuera del sitio. La Fig. 3.3 representa las posibles opciones de suministro de energía renovable (Marszal, 2011). Teniendo en cuenta estas opciones, el presente trabajo considera el suministro de energía renovable en el sitio.

La Fig.3.4 muestra las acciones tendientes hacia los edificios de energía cero, para ello se reduce la demanda energética en los edificios, entre un 60 % y un 90 % de los estándares actuales, y se implementa la generación *in situ* de energías renovables a gran escala.



Figura 3.2: Información general de las fuentes de suministro de energía renovable. Fuente:(Marszal, 2011).

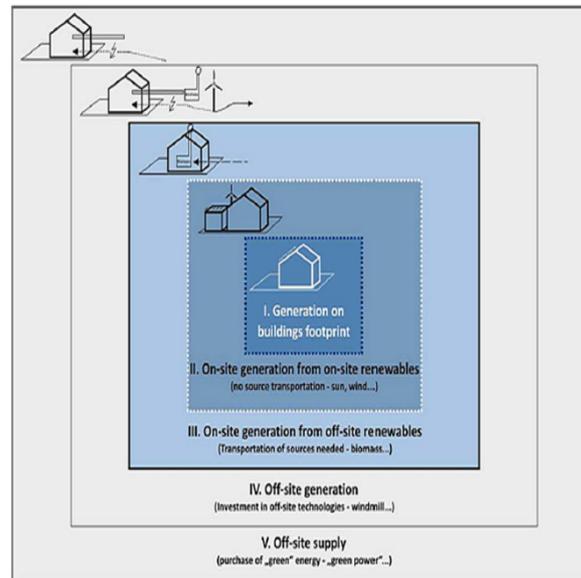


Figura 3.3: Posibles opciones de suministro de energía renovable y su integración en la red. Fuente:(Marszal, 2011).

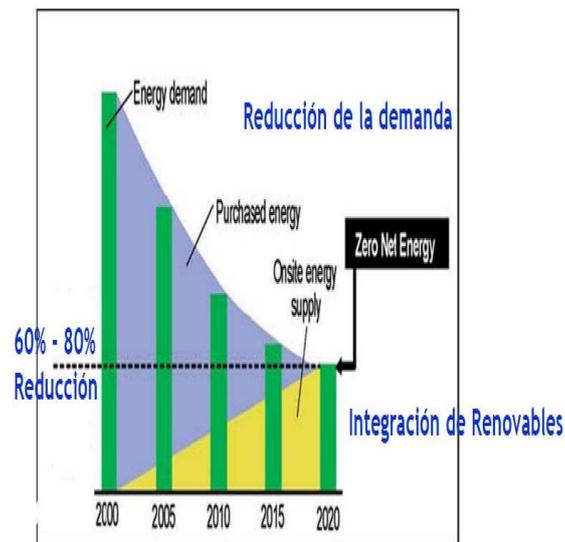


Figura 3.4: Acciones tendientes hacia los edificios de energía cero. Fuente:(Marszal, 2011).

3.4. Análisis de ciclo de vida en edificios

El análisis del ciclo de vida de un edificio se enfoca en el análisis del ciclo de vida de la energía de un edificio. Para ello se considera la energía incorporada a través de la construcción (materiales y la construcción en sí), y la energía requerida para el funcionamiento del edificio (Karimpour et al., 2014). En los primeros estudios sobre análisis del ciclo de vida en edificios se consideraba que la energía incorporada era un factor relativamente pequeño. Estudios posteriores demostraron que esto depende de los factores climáticos, y concluyeron que en regiones más frías la energía incorporada puede representar hasta el 25 % de la energía total del ciclo de vida; los estudios de Karimpour et al., (2014), (Karimpour et al., 2014), encuentran que en los estudios del análisis del ciclo de vida de la energía generalmente se ignora el valor de tiempo de carbono; factor que puede ser importante, por ejemplo, en un régimen nacional de reducción de emisiones, cuando se reduce el consumo de energía.

Para reducir el ciclo de vida de la energía en los edificios, el enfoque tradicional ha sido en la reducción de la energía operativa de los edificios a través de la mejora del diseño del edificio o de la eficiencia de los equipos (Karimpour et al., 2014).

3.4.1. La energía primaria y secundaria

Para obtener resultados precisos del análisis del ciclo de vida de la energía, es importante aclarar la forma de energía. La energía secundaria o entregada, es la energía que se utiliza en la instalación, es decir, la usada por los sistemas en el edificio. La energía primaria es la que se utiliza para producir la energía suministrada y esto depende de la fuente de energía que se consume en este proceso (por ejemplo, carbón o hidroeléctrica). Se sugiere en la literatura que las mediciones para el análisis del ciclo de vida de la energía debe ser en forma de energía primaria (Karimpour et al., 2014). Los factores de conversión de energía final a primaria en España se muestran en la Tabla 3.1. (IDAE, 2014).

Tabla 3.1: Factores de conversión de energía final a primaria en España. Fuente:(IDAE, 2014).

| Factores de conversión de energía final a primaria | | | | |
|--|--------|--|---|------------------------------------|
| Descripción | Fuente | Valores propuestos | | |
| | | kWh E.primaria renovable /kWh E.final | kWh E.primaria no renovable /kWh E.final | kWh E. primaria /kWh E.final |
| Electricidad convencional Nacional | (*) | | | 2.461 |
| Electricidad Nacional de origen 100% renovable | (**) | 0.326 | 0 | |
| Electricidad Nacional de origen 100% no renovable | (**) | 0 | 2.135 | |
| Electricidad convencional peninsular | (**) | 0.341 | 2.082 | 2.423 |
| Electricidad convencional extrapeninsular | (**) | 0.073 | 3.052 | 3.125 |
| Electricidad convencional Baleares | (**) | 0.094 | 3.060 | 3.154 |
| Electricidad convencional Canarias | (**) | 0.059 | 3.058 | 3.117 |
| Electricidad convencional Ceuta y Melilla | (**) | 0.066 | 2.759 | 2.824 |
| Gasóleo calefacción | (***) | 0.003 | 1.179 | 1.182 |
| GLP | (***) | 0.003 | 1.201 | 1.204 |
| Gas Natural | (***) | 0.005 | 1.190 | 1.195 |
| Carbón | (***) | 0.002 | 1.082 | 1.084 |
| Biomasa | (***) | 1.003 | 1.034 | 1.037 |
| Biomasa densificada (pelets) | (***) | 1.028 | 0.085 | 1.113 |

(*) Valores aprobados en Comisión Permanente de certificación Energética de edificios de 27 de Junio de 2013.
(**) Según cálculo
(***) Basado en el informe: Well to Tank Report, versión 4.0 del Joint Research Institute

3.5. Huella de carbono

En base al origen de la fuente energética se emitirán al medioambiente una determinada cantidad de CO₂, llamada *huella de carbono*. Los factores de emisiones de CO₂ para España se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Factores de emisiones de CO₂ para España. Fuente: (IDAE, 2014).

| Factores de emisiones de CO ₂ | | |
|--|--------|----------------------------------|
| | Fuente | Valores propuestos |
| | | kg CO ₂ /kWh E. final |
| Electricidad convencional nacional | (*) | 0.399 |
| Electricidad nacional de origen 100 % renovable | (**) | 0 |
| Electricidad nacional de origen 100 % no renovable | (**) | 0.521 |
| Electricidad convencional peninsular | (**) | 0.372 |
| Electricidad convencional Entra peninsular | (**) | 0.867 |
| Electricidad convencional Baleares | (**) | 0.960 |
| Electricidad convencional Canarias | (**) | 0.811 |
| Electricidad convencional Ceuta y Melilla | (**) | 0.732 |
| Gasóleo calefacción | (***) | 0.311 |
| GLP | (***) | 0.254 |
| Gas natural | (***) | 0.252 |
| Carbón | (***) | 0.472 |
| Biomasa | (***) | 0.018 |
| Biomasa densificada (pelets) | (***) | 0.018 |

(*) Valor obtenido de la Propuesta de Documento Reconocido:
Valores aprobados en Comisión Permanente
de Certificación Energética de Edificios de 27 de Junio de 2013

(**) Según cálculo del apartado 5 del documento: Fuente:(IDAE, 2014)

(***) Basado en el informe: Well to tank Report
version 4.0 del Joint Research Institute

3.5.1. ACV en edificios cercanos a cero energía

Estudios realizados sobre análisis de ciclo de vida en edificios cero energía.

Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. Luisa F. Cabeza, Lída Rincón, Virginia Vilariño, Gabriel Pérez, Albert Castell (Cabeza et al., 2014).

Los autores hacen una revisión donde resumen y organizan la literatura sobre estudios realizados sobre la evaluación del ciclo de vida (LCA), análisis de energía de ciclo de vida (LCEA) y análisis de coste de ciclo de vida (ACCL) para la evaluación ambiental de los edificios y la industria relacionada con la construcción y el sector (incluidos los productos de construcción, sistemas de construcción, edificios y obras de ingeniería civil). La revisión muestra que la mayoría de ACV y LCEA son llevadas a cabo en lo que se muestra como “ejemplo” de los edificios, es decir, edificios que han sido diseñados y construidos como edificios de baja energía, pero hay muy pocos estudios sobre “edificios tradicionales”, es decir, edificios como los que se encuentran principalmente en nuestras ciudades. Asimismo, la mayoría de los estudios se llevan a cabo en las zonas urbanas, mientras que las zonas rurales no están bien representadas en la literatura. Por último, los estudios no están repartidos por igual en todo el mundo.

Se organizar y completar la literatura existente acerca de ACV aplicado en el sector de la construcción, siguiendo y completando las distintas clasificaciones encontradas en la literatura:

La evaluación del ciclo de vida en el sector de la construcción:

- LCA de selección de productos para la construcción de aplicaciones para los sistemas de construcción/evaluación del proceso
- LCA herramientas y bases de datos relacionadas con la industria de la construcción
- LCA desarrollos metodológicos relacionados con la industria de la construcción

La evaluación del ciclo de vida de los edificios y el sector de la construcción:

- LCA en edificios residenciales
- LCA de edificios no residenciales
- LCA de construcciones de ingeniería civil

El ciclo de vida de la energía en un edificio es un enfoque que representa todas las entradas de energía de un edificio en su ciclo de vida (Ramesh et al., 2010). Los límites del sistema de este análisis (Fig. 3.5) incluyen el uso de energía de las siguientes fases: producción, uso y demolición. La fase de fabricación incluye la fabricación y el transporte de materiales de construcción y de instalaciones técnicas en nueva construcción y renovación de los edificios. La fase de operación engloba todas las actividades relacionadas con el uso de los edificios, a lo largo de su vida útil. Estas actividades incluyen el mantenimiento de condiciones de confort en el interior de los edificios, el uso del agua, y el encendido de aparatos. Por último, la fase de demolición incluye la destrucción de la construcción y el transporte de los materiales desmontados a vertederos y/o plantas de reciclaje.

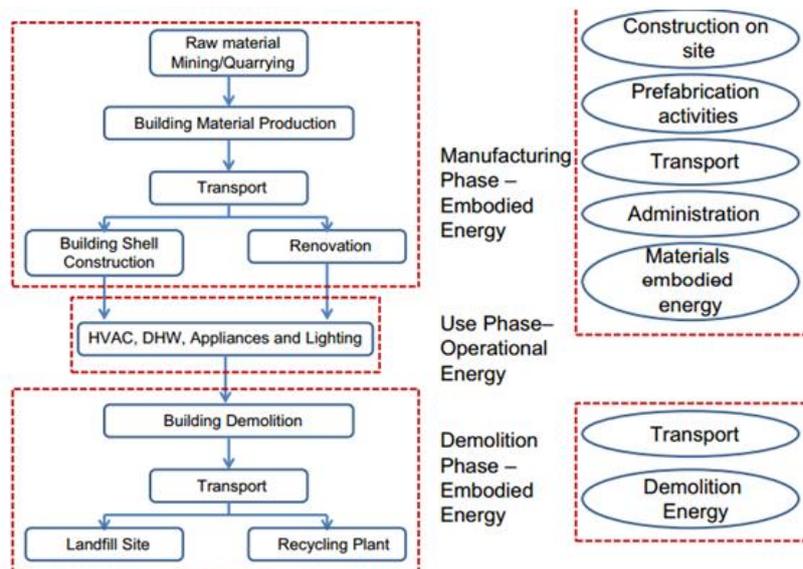


Figura 3.5: Ciclo de vida de la energía de un edificio. Fuente: (Cabeza et al., 2014).

El ciclo de vida de la energía incluye (Ramesh et al., 2010):

- Contenido de energía: contenido energético de todos los materiales utilizados en la construcción y de las instalaciones técnicas, y energía requerida en el momento de la nueva construcción y renovación del edificio.
- Energía requerida para el funcionamiento: la energía necesaria para mantener las condiciones de confort y mantenimiento cotidiano de los edificios. Energía para el sistema HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado), agua caliente sanitaria, iluminación y para el funcionamiento de electrodomésticos.
- Demolición la energía: la energía necesaria al final de la vida útil de los edificios para demolerla y para transportar el material a vertederos y/o las plantas de reciclaje.

LCA de edificios no residenciales.

En el estudio, los autores dividen el ciclo de vida de un edificio en cinco fases principales; la fabricación de materiales de construcción, el proceso de construcción, uso de la construcción, mantenimiento y demolición. Los resultados muestran que la mayoría de los impactos son asociados con el uso de electricidad y la fabricación de materiales de construcción. En particular, la electricidad utilizada en la iluminación, sistemas HVAC, a través de las estructuras de conducción de calor, mantenimiento de fabricación de acero, cemento y pintura, y la oficina de gestión de residuos fueron identificadas como las más importantes. Las emisiones de gases de efecto invernadero se estiman en 48,000 t.CO₂ eq./m² en 50 años.

Kofoworola y Gheewala (Kofoworola y Gheewala, 2008) realizaron un ACV de un edificio de oficinas en Tailandia y encontraron que el acero y hormigón representaron la mayoría de los impactos ambientales relacionados con los materiales y el consumo de energía en la fase de uso representó el 52 % del total de impactos del ciclo de vida. Los autores citan varios trabajos de ACV en edificios no residenciales en diferentes países.

How to evaluate performance of net zero energy building - A literature research. S. Deng, R.Z. Wang, Y.J. Dai (Deng et al., 2014).

Los autores realizan una investigación bibliográfica para conocer cómo evaluar el rendimiento de un edificio de energía casi cero, NZEB y exponen que un edificio NZEB es considerado como una solución integrada para abordar problemas de ahorro de energía, protección ambiental y la reducción de emisiones de CO₂. Puntualizan que un edificio NZEB incluso podría ser posible con la producción de electricidad si se puede utilizar suficiente energía renovable. Por otra parte, han sido ampliamente considerados para posibles aplicaciones en NZEB diversos sistemas de servicios de construcción usando fuentes de energía renovables. Todas estas nuevas características amplían el límite técnico de los tradicionales edificios energéticamente eficientes, fijan una implicación más profunda para el desarrollo sostenible de la tecnología de la construcción y, por lo tanto, plantean un reto al trabajo de la evaluación del rendimiento en NZEB.

Los autores presentan una visión general acerca de las definiciones y medidas de la eficiencia energética en NZEB de forma que los límites entre el objeto de la investigación y

la tecnología se pueden aclarar en la evaluación de NZEB. En la metodología presentan un resumen del método de investigación ampliamente utilizado, la herramienta y la evaluación del indicador de desempeño. Por último, las posibilidades de progreso en la evaluación NZEB con posibles tendencias de desarrollo donde resaltan el almacenamiento de energía, el ajuste de carga y las redes inteligentes.

Parte II

SITUACIÓN ACTUAL DE LAS INSTALACIONES DEL EDIFICIO BASE Y MEJORAS USANDO INSTALACIONES CON ENERGÍAS RENOVABLES

La segunda parte del documento describe la situación actual del edificio base y estudia sistemas para obtener un edificio mejorado energéticamente y ambientalmente. Para ello, se estudian los siguientes casos: iluminación, ventilación y calefacción. Se evalúan los impactos ambientales de cada caso estudiado usando la metodología EPS2000.

Para el caso de estudio de iluminación, en el Capítulo 4 se describe el sistema usando electricidad de la red y en el Capítulo 5 se plantea la generación de electricidad por medio de la integración en la fachada del edificio de paneles fotovoltaicos.

Para el caso de estudio de ventilación, en el Capítulo 6 se describe el sistema usando ventilador mecánico, en el Capítulo 7 se plantea el uso de colectores solares de aire y ventiladores solares fotovoltaicos y finalmente en el Capítulo 8 se plantea un sistema bioclimático con muro Trombe.

Para el caso de estudio de calefacción, en el Capítulo 9 se describe el sistema actual con caldera de gasóleo y en el Capítulo 10 se plantea el uso de bomba de calor geotérmica.

CAPÍTULO 4

Sistema de Iluminación Actual: Electricidad de la Red

RESUMEN: En el presente Capítulo se describe la situación del consumo eléctrico del edificio Aulario de la Universidad de Valladolid, suministrado con electricidad de la red. Posteriormente se evalúan los impactos ambientales de dicho consumo eléctrico. Las características de las luminarias usadas se detallan en el Apéndice, al final del presente Capítulo.

4.1. Consumo eléctrico del edificio Aulario

Para saber el consumo de electricidad del edificio Aulario se cuentan con dos fuentes de datos: la primera fuente de datos corresponde a los resultados del estudio energético del edificio en el cual se evaluó el consumo de energía usando la herramienta de simulación dinámica EnergyPlus (Blázquez, 2011). En base a estos resultados se pudo discriminar cuánto es el consumo eléctrico sólo de iluminación, encontrando que el edificio objeto de estudio consume 221545.38 kWh/año de energía final. La segunda fuente de datos proviene de las facturas eléctricas de los últimos seis años, que contabilizan el consumo de los edificios de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, y el Aulario. Se supone que el 30 % del consumo total corresponde al edificio Aulario (González, 2013b); dicho porcentaje se toma con base en el criterio que el ingeniero de mantenimiento estableció con datos empíricos de diferentes parámetros como uso, iluminación, entre otros. Se encuentra que el edificio Aulario consume 223364.33 kWh/año de energía final, que corresponde al promedio del consumo eléctrico real durante los últimos ocho años (González, 2013b; EREN, 2007) (Ver Tabla 4.1. Comparando estas dos fuentes de datos se encuentran valores muy similares con una diferencia de tan sólo 0.81 % del promedio de la suposición del 30 % del consumo total (González, 2013b) y el valor obtenido mediante simulación (Blázquez, 2011).

El presente estudio toma el valor promedio obtenido de la factura de electricidad. Suponiendo un periodo de 30 años de consumo de iluminación con electricidad de la red, se encuentran 4535.02 tCO₂ emitidas al medioambiente, según factor de paso para España (IDAE, 2014), (Ver Tabla 4.2).

Tabla 4.1: Consumo eléctrico durante los años 2007 a 2013. Fuente: (González, 2013b; EREN, 2007).

| Edificio | Consumo | Año | | | | | | | | Promedio Consumo Energía Final |
|------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------------------|
| | | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | |
| Económicas más Aulario | (kWh/año) | 800494 | 831080 | 785109 | 795052 | 787176 | 799571 | 758668 | 399232 | 744548 |
| Aulario | | 240148 | 249324 | 235533 | 238516 | 236153 | 239871 | 227600 | 119770 | 223364 |

Tabla 4.2: Consumo eléctrico y emisiones de CO₂ totales del edificio Aulario. Fase de uso.

| Promedio consumo Energía Final | Periodo considerado | Total consumo Energía Final | Total Emisiones CO ₂ |
|--------------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| (kWh/año) | (años) | (kWh) | (t) |
| 223364 | 30 | 6700930 | 1843 |

4.2. Caso de estudio

Se establece una cantidad determinada de consumo eléctrico del edificio Aulario de la Universidad de Valladolid a ser suministrada con energías renovables. Como caso de estudio, se toma un consumo de 12895 kWh/año, que corresponde aproximadamente al 6 % del consumo del edificio (González, 2013b). La sustitución con energías renovables sólo del 6 % del consumo total de iluminación se debe a que se ha tenido en cuenta el proyecto que adelanta la Oficina de Medioambiente de la UVa en cual plantea usar paneles fotovoltaicos tipo parasoles como medida para reducir el exceso de temperatura en el interior de las aulas, como se describe en el inciso 5.2 del Capítulo 5 y para generar parte del consumo de electricidad del edificio.

El presente estudio tiene en cuenta la fase de uso de la electricidad de la red durante 30 años, esto es, 952037.85 kWh de energía primaria, según el factor de conversión de energía final a energía primaria para electricidad convencional nacional de 2.461 kWh E.primaria/kWh E.final (IDAE, 2014).

En el análisis del sistema de iluminación, no se tienen en cuenta las fases de montaje y disposición final debido a las limitaciones para obtener los datos en estas fases y al objetivo del presente estudio, que es evaluar y comparar los impactos ambientales del sistema que suministra la electricidad, en este caso, la red eléctrica, en comparación con electricidad proveniente de paneles fotovoltaicos. El establecimiento del caso de estudio va en concordancia con estudios realizados en sistemas de iluminación que concluyen que en las evaluaciones de Ciclo de Vida la etapa de uso del consumo de energía fue predominante respecto de las etapas de fabricación y fin de vida (Leena, 2013).

4.3. Análisis de ciclo de vida del sistema de iluminación con electricidad de la red

Se realiza el análisis de ciclo de vida del sistema de iluminación del edificio, en su fase de uso. Se evalúan las emisiones a la atmósfera de CO₂ y demás impactos ambientales, como se describe en las secciones siguientes.

4.3.1. Desempeño ambiental del sistema de iluminación con electricidad de la red

Para conocer el desempeño ambiental del sistema de iluminación con electricidad de la red, se calculan las emisiones de CO₂ y demás impactos ambientales. En base el factor de emisiones de CO₂ para España, la generación de electricidad convencional nacional produce 0.399 kg CO₂/kWh E. Final (IEA, 2014). Por tanto, 12895 kWh/año de energía final proporcionados con electricidad de la red para el sistema de iluminación, emitirán al medioambiente durante 30 años 154.35 tCO₂.

4.3.2. Impactos ambientales del sistema de iluminación con electricidad de la red

Se evalúan los impactos ambientales del uso de electricidad de la red para iluminación. Se encuentran los mayores daños en el agotamiento de reservas, en la esperanza de vida y

en la morbilidad severa, representando respecto a los impactos totales del sistema el 66.78 %, 22.74 %, y 8.05 % respectivamente como se muestra en la Fig. 4.1. Se encuentra que estos daños se deben al petróleo, gas natural, carbón y energía nuclear usados por la matriz energética española. El sistema debe pagar 112500.23 ELUs, 38304.59 ELUs y 13566.43 ELUs, respectivamente para restaurar los daños en las categorías indicadas. En la Tabla 4.3, se describen cada una de las categorías de daño y las cantidades a pagar en ELUs.

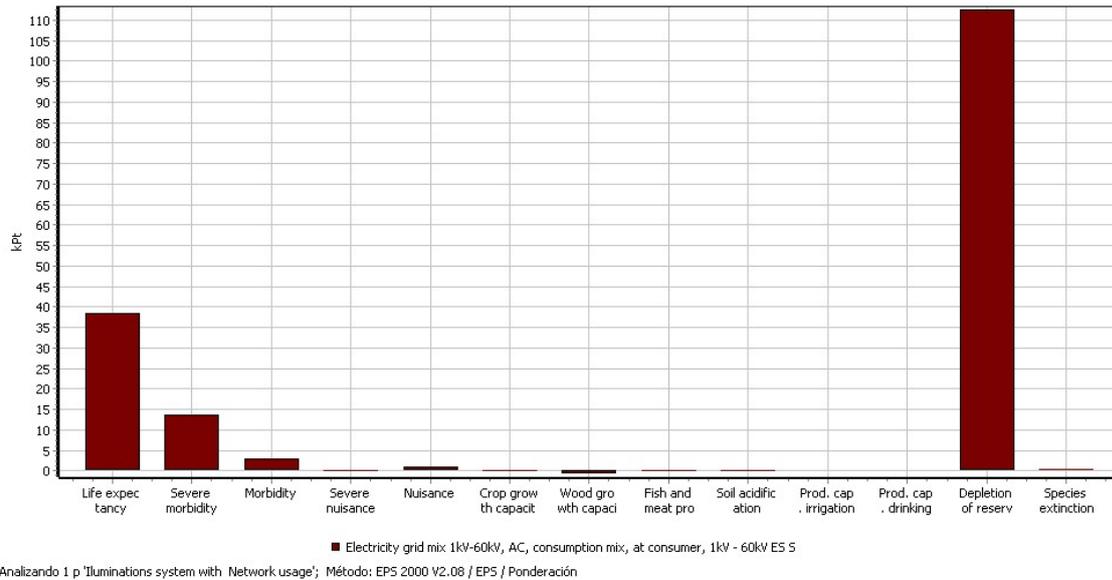


Figura 4.1: Impactos ambientales del sistema de iluminación con electricidad de la red. Ponderación. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

Tabla 4.3: Impactos ambientales del sistema de iluminación con electricidad de la red. Evaluación del daño. Datos calculados usando el *software* SimaPro8.

| Categoría de daño | Unidad | Total |
|---|---------------|--------------|
| Esperanza de vida | ELU | 38304.59 |
| Morbilidad severa | ELU | 13566.43 |
| Morbilidad | ELU | 2867.56 |
| Molestia severa | ELU | 127.86 |
| Molestia | ELU | 1104.84 |
| Capacidad de crecimiento de maíz | ELU | 169.04 |
| Capacidad de crecimiento de madera | ELU | -711.09 |
| Producción de pescado y carne | ELU | -25.82 |
| Acidificación del suelo | ELU | 30.18 |
| Capacidad de producción de agua para irrigación | ELU | 0 |
| Capacidad de producción de agua potable | ELU | 0 |
| Agotamiento de reservas | ELU | 112500.23 |
| Extinción de especies | ELU | 534.38 |
| Total | ELU | 168468.20 |

4.4. Apéndice 1. Sistema iluminación edificio Aulario. Características

Las características del sistema de iluminación del edificio Aulario se evaluaron en base al inventario realizado por el Ente Regional de la Energía, EREN (2007). Las luminarias se clasifican según las siguientes categorías: FT: Fluorescente de Tubo, FC: Fluorescente Compacta, VS: Vapor de Sodio e I: Incandescente. “La potencia de las luminarias se ha obtenido como suma de la potencia de la lámpara más la potencia de los componentes electromagnéticos asociados (reactancia, cebador, entre otros)” (EREN, 2007). Las características de las luminarias y el número de unidades usadas en las plantas garaje, planta baja, hall y primera planta se describen en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Características de las luminarias del edificio Aulario. Fuente:(EREN, 2007).

| Ubicación General | Ubicación Específica | Tipo | Tipo luminaria | W/ lampara | Nº luminarias | Nº Lamp/ luminaria | (W)/ luminaria | (kW) total |
|--------------------------|----------------------|------|----------------|------------|---------------|--------------------|----------------|------------|
| Planta garaje | Garaje | I | Empotrada | 100 | 6 | 1 | 100 | 0,60 |
| | | FT | Suspendida | 40 | 111 | 4 | 178 | 19.76 |
| Planta baja | Aulas | FT | Empotrada | 40 | 172 | 4 | 178 | 30.62 |
| | Pasillos y escaleras | I | Suspendida | 100 | 46 | 1 | 100 | 4.60 |
| | Aseos | FT | Empotrada | 40 | 12 | 4 | 178 | 2.14 |
| | Aseos | FT | Suspendida | 20 | 4 | 2 | 46.7 | 0.19 |
| Hall superior e inferior | Hall | VS | Suspendida | 400 | 21 | 1 | 400 | 8.40 |
| | | I | Suspendida | 100 | 46 | 1 | 100 | 4.60 |
| Primera planta | Aulas | FT | Empotrada | 40 | 172 | 4 | 178 | 30.62 |
| | Pasillos y escaleras | I | Suspendida | 100 | 46 | 1 | 100 | 4.60 |
| | Aseos | FT | Empotrada | 40 | 12 | 4 | 178 | 2.14 |
| | Aseos | FT | Suspendida | 20 | 4 | 2 | 46.7 | 0.19 |

CAPÍTULO 5

Mejoras con Energía Solar Fotovoltaica para Iluminación

RESUMEN: En el presente Capítulo se estudian los principales conceptos sobre energía fotovoltaica y las características de la integración fotovoltaica planteada para el edificio Aulario por la Oficina de Medio Ambiente de la Universidad de Valladolid. Posteriormente se evalúan los impactos ambientales del sistema de iluminación con paneles fotovoltaicos.

5.1. Energía solar fotovoltaica. Definición

La cantidad de energía que la luz del sol vierte diariamente sobre la tierra es diez mil veces mayor que la que se consume al día en todo el planeta. España está particularmente favorecida por su situación y por su climatología para aprovechar este tipo de energía, en relación con los países europeos más septentrionales y con menos horas de sol. La radiación solar media anual en la zona central de la península equivale a 1600 kWh por metro cuadrado al año.

Los sistemas fotovoltaicos consiguen transformar la radiación en corriente continua, que puede abastecer la iluminación eléctrica de un edificio (y todos los electrodomésticos que funcionen con corriente continua). Para conseguir corriente alterna se instala un inversor, que transforma la señal en sinusoidal, y puede alimentar el consumo doméstico de corriente alterna. El problema radica en cómo obtener electricidad cuando no se recibe radiación (día nublado, o simplemente de noche), ya que la transformación radiación-electricidad es “instantánea”. Este problema se resuelve instalando baterías que almacenan la electricidad generada durante el día por las placas fotovoltaicas en forma de energía química. Para estos sistemas es muy importante disponer de un sistema de control, que se encargue de distribuir y controlar la electricidad generada. En base al requerimiento eléctrico, las instalaciones necesitarán un sistema auxiliar de energía, para el caso de que los paneles fotovoltaicos no puedan abastecer todo el consumo demandado en un momento dado. Para el caso de estudio, la instalación fotovoltaica no requiere de un sistema auxiliar de energía debido a que sólo proporcionará aproximadamente el 6 % del consumo eléctrico del edificio como se indicó en la sección 4.2 del Capítulo 4.

Cuando la energía solar fotovoltaica se usa para generar energía eléctrica para consumo interno y las instalaciones no se conectan a la red eléctrica reciben el nombre de aisladas y se caracterizan porque se autoabastecen, por tanto no ceden electricidad a la red. Esta instalación utiliza baterías para acumular la energía eléctrica producida durante el día. En el caso de que la electricidad producida por la instalación fotovoltaica alimente la red eléctrica, reciben el nombre de instalaciones conectadas a la red. La conexión se realiza desde la salida del inversor a la red eléctrica más cercana.

Los paneles fotovoltaicos se integran en la construcción arquitectónica o sirven de elemento creador de sombra. Se sitúan en las fachadas o el tejado de la vivienda o edificio. Existen varias formas de integrar éstos en los edificios, por ejemplo, en los tejados (inclinados o planos), en las fachadas, y en lugares donde se necesita sombra como toldos. La integración cada vez es más avanzada, y ya no sólo se pueden ver paneles sobre los tejados ya construidos, sino que los actuales módulos fotovoltaicos se integran en el edificio cumpliendo otras funciones arquitectónicas como puede ser la de tejas, o aislante de cubiertas.

5.2. Situación actual de los espacios del edificio Aulario

Algunos espacios del Aulario del Campus Esgueva presentan exceso de temperatura en el interior de las aulas, en gran parte debido a la alta incidencia de la radiación solar a través de los huecos de la fachada principal de orientación sur. La Oficina de Medio Ambiente de la Universidad de Valladolid plantea la integración de paneles fotovoltaicos tipo parasoles en las ventanas existentes en la fachada del edificio para paliar el efecto de esa radiación solar en las condiciones térmicas de los espacios interiores del edificio Aulario (ver Fig. 5.1) (UVa, 2014).

La solución técnica empleando paneles fotovoltaicos como elementos pantalla a esa radiación solar permite además la posibilidad de generar electricidad para consumirla en las mismas instalaciones, por ejemplo en iluminación, disminuyendo de esta forma las emisiones de CO₂ a la atmósfera por la reducción del consumo eléctrico de la red e incorporando una nueva medida de mejora de la Sostenibilidad Energética de la Universidad. La Oficina de Medio Ambiente de la Universidad de Valladolid realizó un estudio de diferentes alternativas y propuso la instalación de módulos fotovoltaicos cristalinos para poder obtener mayor potencia eléctrica de generación, ya que este módulo permite una mayor producción en el reducido espacio existente. Para ganar valor estético se propone la integración de los módulos fotovoltaicos sobre todas las ventanas de la fachada, en lugar de una única visera sobre la fila de ventanas superiores, que era otra alternativa (UVa, 2014).

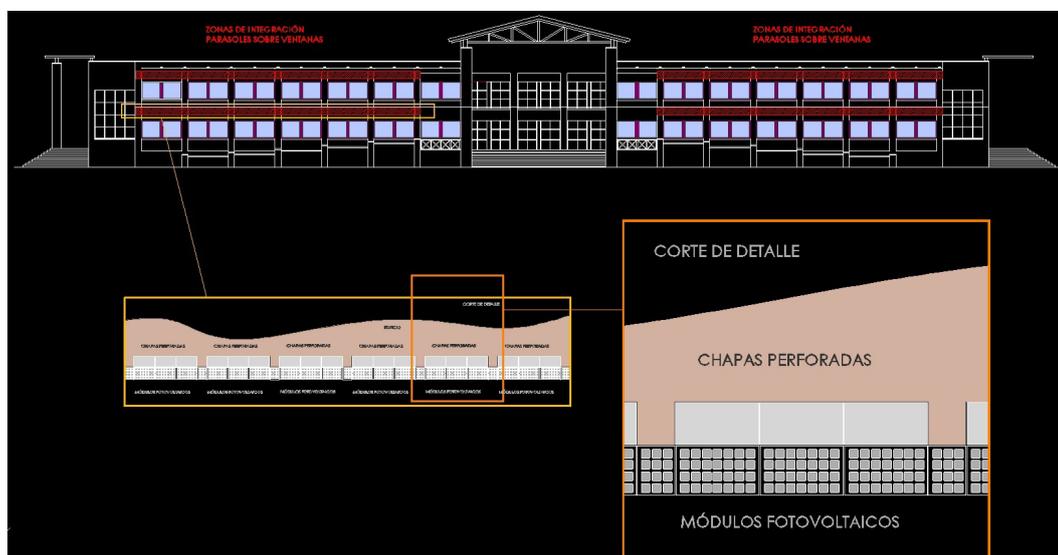


Figura 5.1: Ubicación de paneles en el edificio Aulario.

5.2.1. Habitabilidad y localización del sistema fotovoltaico

Para considerar la mejor solución para la intervención de sistemas fotovoltaicos en edificios BIPV (por sus iniciales en inglés, *building integrated photovoltaics*), es muy importante tener en cuenta parámetros fundamentales considerados como factores críticos. Estos factores críticos incluyen características de clima y microclima, las condiciones geográficas (latitud, longitud, altitud sobre el nivel del mar, etc.). Las características geográficas de la ciudad de Valladolid se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Características geográficas de la ciudad de Valladolid. Fuente:(UVa, 2014).

| | |
|--------------|------------|
| Localización | Valladolid |
| País | España |
| Latitud | 41°39Ñ |
| Longitud | 4°43'W |
| Altitud | 698 msns |
| Uso horario | GMT+1 |

5.2.2. Módulos fotovoltaicos del edificio Aulario. Características

El módulo fotovoltaico planteado es de tecnología de silicio policristalino, al cual se le puede dar distintos acabados estéticos. Hay varias opciones de acabado de los módulos: una es el módulo cristalino glass Tedlar blanco (el más extendido). Por otro lado, el Tedlar se puede sustituir por un vidrio trasero consiguiendo de éste modo un vidrio fotovoltaico Glass-Glass semitransparente. La elección de uno u otro influye en el precio del módulo fotovoltaico habiendo ofertado para el presente estudio el módulo fotovoltaico correspondiente a un glass Tedlar convencional (UVa, 2014), mostrado en la Fig. 5.2. Las características de los lucernarios a integrar en el edificio Aulario se resumen en la Tabla 5.2.

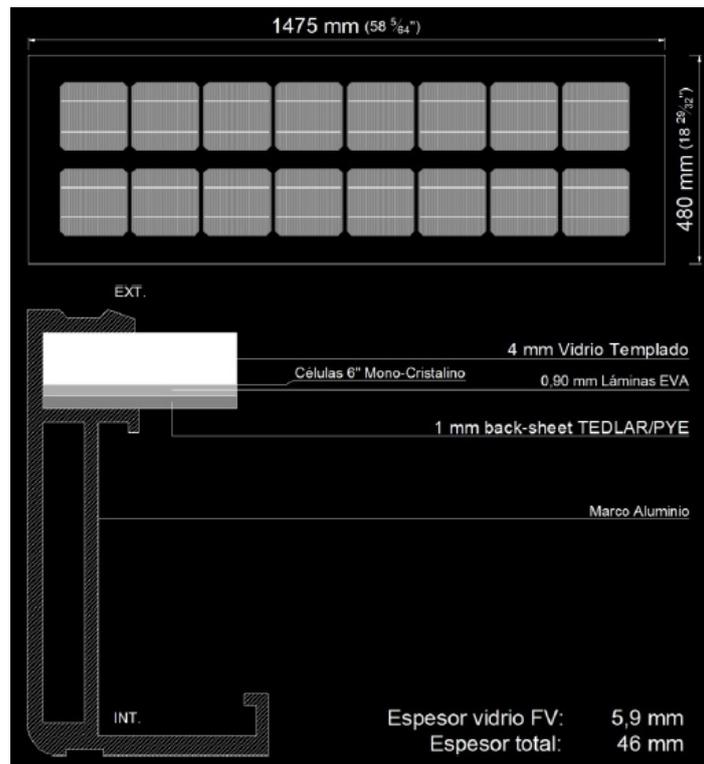


Figura 5.2: Módulos fotovoltaicos Glass-TEDLAR.

Tabla 5.2: Características de los lucernarios fotovoltaicos Glass-TEDLAR a integrar en el edificio Aulario.

| Tipo: Tedlar | Dimensiones | Células | Peso/lucernario |
|----------------------------|-------------|---------|-----------------|
| | (mm x mm) | (No.) | (kg) |
| Lucernario fotovoltaico I | 650x850 | 12 | 5.53 |
| Lucernario fotovoltaico II | 1430x850 | 28 | 12.16 |
| Peso total | | | 17.69 |

5.2.3. Energía generada

Considerando las características del módulo fotovoltaico seleccionado según su composición, superficie, energía, entre otros, la empresa fabricante (Onyx Solar) puede estimar la energía que puede lograrse. La integración propuesta según el lucernario planteado con un área fotovoltaica de integración aproximada de 106 m² y una potencia pico instalada de 10.24 kWp, alcanzará una producción de energía final de 12895 kWh/año, equivalentes a 4204 kWh/año de energía primaria, según el factor de paso de energía final a energía primaria para electricidad nacional de origen 100 % renovable de 0.326 kWh E.primaria/kWh E.final (IDAE, 2014). Considerando 30 años de vida útil (Alsema, 2003), la producción de energía primaria será de 126113 kWh, como se muestra en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Potencia generada por el sistema fotovoltaico. Fuente:(UVa, 2014).

| | |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Tipo | Paneles fotovoltaicos |
| Tecnología | Policristalino |
| Potencia pico instalada | 10.24 kWp |
| Superficie fotovoltaica | 106 m ² |
| Inclinación | 31° |
| Acimut | 14°E |
| Producción energía final | 12895 kWh/año |
| Producción energía primaria | 4204 kWh/año |
| Vida útil | 30 años |
| Producción energía final total | 386850 kWh |
| Producción energía primaria total | 126113 kWh |

5.2.4. Desempeño ambiental del sistema de iluminación con parasoles fotovoltaicos

Se evalúa en desempeño ambiental del sistema de Iluminación con Paneles Fotovoltaicos calculando las emisiones de CO₂ y demás impactos ambientales. La generación de electricidad procedente de fuentes 100 % renovables produce 0 kg CO₂/kWh E. Final (ver Tabla 3.2) (IDAE, 2014). Por tanto, 386850 kWh de energía final proporcionados con electricidad proveniente de paneles fotovoltaicos para el sistema de iluminación no producen emisiones de CO₂ al medioambiente.

5.2.5. Análisis de ciclo de vida del sistema de iluminación con paneles fotovoltaicos

Se establece como unidad funcional el uso de electricidad para el caso de estudio descrito en la sección anterior, generada con paneles fotovoltaicos para alimentar la iluminación. Solo se tiene en cuenta la fase de uso, debido a que la finalidad es comparar la misma potencia proporcionada con electricidad de la red. Por tanto, se evalúan los impactos ambientales del sistema de iluminación con paneles fotovoltaicos, posteriormente se comparan los impactos ambientales de los dos sistemas y finalmente se hace el análisis de sensibilidad.

5.2.5.1. Impactos ambientales del sistema de iluminación con paneles fotovoltaicos

Se evalúan los impactos ambientales usando la metodología EPS2000 del *software* SimaPro. Se encuentra que el sistema de iluminación con paneles fotovoltaicos evita daños en casi todas las categorías, excepto en la capacidad de crecimiento de la madera y en la producción de pescado y carne con 0.050 % y 0.003 %, que representan 17.58 y 1.07 unidades ELUs o Euros a pagar para restaurar los daños ocasionados en estas categorías. En la Tabla 5.4 se describe cada una de las categorías de daño y cantidades a pagar en ELUs. Los valores con signo negativo indican los daños evitados al medioambiente. En la Fig. 5.3 se observan cada uno de los daños causados.

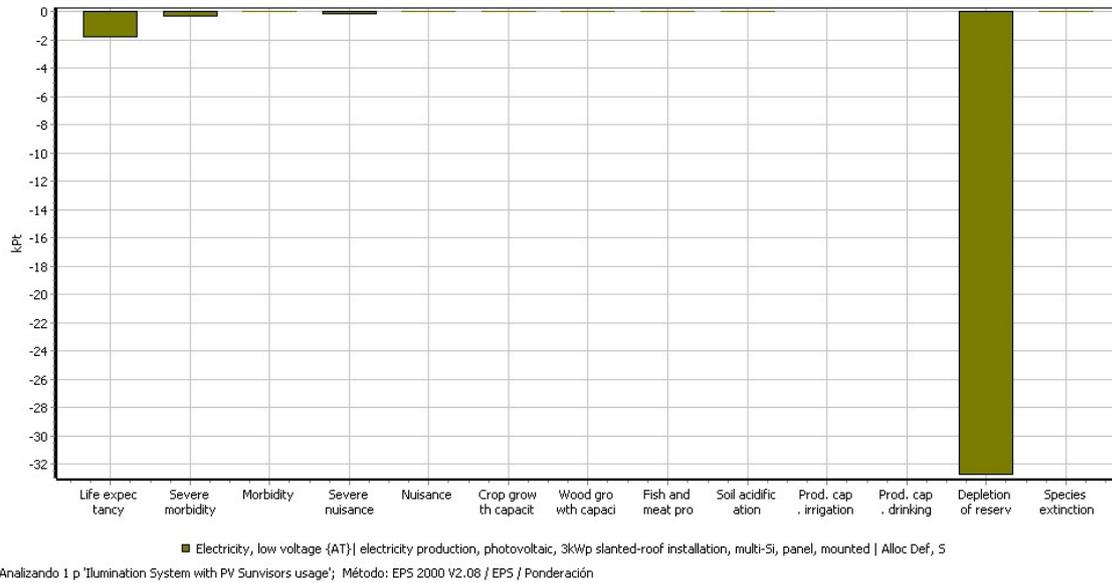


Figura 5.3: Impactos ambientales del sistema de iluminación con electricidad generada por paneles fotovoltaicos. Ponderación. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

Tabla 5.4: Impactos ambientales del sistema de iluminación con electricidad generada por paneles fotovoltaicos. Evaluación de daño. Datos calculados usando el *software* SimaPro8.

| Categoría de daño | Unidad | Total |
|---|--------|-----------|
| Esperanza de vida | ELU | -1852.88 |
| Morbilidad severa | ELU | -407.75 |
| Morbilidad | ELU | -72.94 |
| Molestia severa | ELU | -226.90 |
| Molestia | ELU | -46.66 |
| Capacidad de crecimiento de maíz | ELU | -4.46 |
| Capacidad de crecimiento de madera | ELU | 17.58 |
| Producción de pescado y carne | ELU | 1.07 |
| Acidificación del suelo | ELU | -1.17 |
| Capacidad de producción de agua para irrigación | ELU | 0 |
| Capacidad de producción de agua potable | ELU | 0 |
| Agotamiento de reservas | ELU | -32793.17 |
| Extinción de especies | ELU | -17.98 |
| Total | ELU | -35405.26 |

CAPÍTULO 6

Sistema de Ventilación. Situación actual

RESUMEN: El edificio Aulario de la Universidad de Valladolid no cuenta con sistema de ventilación, debido a que fue construido antes de que se exigiera por normativa incorporar sistemas de ventilación a este tipo de edificios. Para efectos de estudio se supondrá que la ventilación requerida por el edificio es proporcionada por ventilación mecánica convencional. Posteriormente se evalúa el desempeño energético y ambiental del sistema.

6.1. Sistema de ventilación

El edificio Aulario no cuenta con sistema de ventilación, sólo hay sistemas todo agua y todo refrigerante split para la sala de estudio, debido a que la normativa vigente era anterior al RITE y no era obligatorio incorporar sistemas de ventilación. La normativa actual exige para el tipo de edificio y uso asegurar la calidad del aire interior (RITE): IDA2: aire de buena calidad, caudal de aire $12.5 \text{ m}^3/\text{h}$ (RITE, 2007).

Para cuestiones de estudio se supone que el edificio Aulario dispone de un sistema de ventilación para el aporte de aire exterior, como lo establece el Reglamento de Instalaciones Térmicas (RITE) sobre calidad de aire interior (RITE, 2013). Se supondrá un sistema centralizado de renovación de aire en el edificio. Dicho sistema consta de una unidad de tratamiento de aire (UTA), ubicada en la cubierta desde la cual se introduce aire exterior convenientemente tratado térmicamente y filtrado. Se diseñan las redes de conductos que conectan con la unidad de tratamiento de aire. Las redes de conductos diseñadas podrían ser usadas también para conectar con el sistema de generación de frío y calor. Para el caso analizado, se considera sólo la distribución del aire de ventilación a cada uno de los espacios del edificio.

El dimensionado de la unidad de tratamiento de aire exterior se realiza teniendo en cuenta las siguientes funciones principales:

- Impulsión de aire de renovación al edificio.
- Filtración.

- Tratamiento térmico (enfriamiento y calentamiento).
- Humidificación para mantener las condiciones de humedad relativa de los locales dentro de los límites de normativa.

Para el caso del edificio estudiado, cuyo uso es académico, no es necesario tener en cuenta el retorno de aire viciado del edificio, como en otros casos en que debe considerarse debido al uso del recinto, como es el caso de cocinas, etc. Al no haber retorno de aire, no es necesario realizar enfriamiento adiabático del aire de extracción del edificio previo a su expulsión, como tampoco es necesario realizar intercambio de calor del aire de expulsión con el aire de renovación.

6.2. Calidad de aire en los edificios

“La calidad del aire en los edificios es el resultado de un proceso dinámico que se denomina renovación, mediante la introducción de un caudal de aire fresco del exterior (denominado de ventilación) que sustituya al aire viciado interior, expulsando las sustancias contaminantes generadas en el interior” (Monroy, 2006).

El caudal de renovación se mide en m^3/h por unidad de referencia, y se suele aplicar de las siguientes formas:

- m^3/h y persona: Considera la actividad de los ocupantes y la posible presencia de fumadores, pudiendo variar entre condiciones de verano e invierno.
- m^3/h y m^2 de superficie de local: Se suele utilizar en locales de poca ocupación o aforo variable, como son los espacios de circulación o de almacenaje.
- m^3/h y local: Se suele fijar para determinados locales como pueden ser los baños o las cocinas domésticas.
- m^3/h y m^3 de volumen de local o renovaciones/hora: El valor inverso horas/renovación equivale al tiempo medio que permanece el aire en el local.

La calidad del aire se determina por sus propiedades bioquímicas, puesto que son fundamentales para la respiración y la salud de las personas y también afecta a la comodidad olfativa. Dichas propiedades se pueden desglosar en los siguientes parámetros:

- Vapor de agua o humedad relativa.
- Concentración de anhídrido carbónico (CO_2) y de oxígeno (O_2).
- Olores desagradables.
- Contaminantes aéreos, por sustancias físicas, químicas o biológicas.

El factor clave para garantizar la calidad del aire, será garantizar un caudal de renovación para mantener la concentración de contaminantes en límites aceptables (Monroy, 2006).

6.2.1. Calidad del aire interior

La calidad del aire en el interior de las edificaciones se describe en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) en la Instrucción Técnica IT 1.1.4.2.2 donde se clasifica en cinco categorías IDA (por sus siglas en inglés *indoor air*) de acuerdo al uso, como se muestra en la Tabla 6.1 (RITE, 2013). La categoría de calidad de aire interior requerida en el edificio Aulario es IDA2, esto es, aire de buena calidad.

Tabla 6.1: Calidad del aire interior. Fuente:(AENOR, 2008b).

| Clasificación | Descripción |
|--|---|
| IDA1: Aire óptima calidad | Hospitales, clínicas, laboratorios y guarderías |
| IDA2: Aire buena calidad | oficinas, residencias (locales comunes de hoteles y similares, residencias de ancianos y de estudiantes), salas de lectura, museos, salas de tribunales, aulas de enseñanza y asimilables a piscinas |
| IDA3: Aire de calidad media | edificios comerciales, cines, teatros, salones de actos, habitaciones de hoteles y similares, restaurantes, cafeterías, bares, salas de fiestas, gimnasios, locales para el deporte (salvo piscinas) y salas de ordenadores |
| IDA4: Aire de calidad baja | |

6.2.2. Calidad del aire exterior

La calidad del aire exterior se describe en el RITE en la Instrucción Técnica IT 1.1.4.2.4 (RITE, 2013), donde se clasifica en categorías ODA (por sus siglas en inglés *outdoor air*), de acuerdo con los niveles mostrados en la Tabla 6.2. La calidad de aire exterior considerada para el caso de estudio es ODA1, esto es, aire puro que se ensucia sólo temporalmente.

Tabla 6.2: Calidad del aire exterior. Fuente:(RITE, 2013).

| Clasificación | Descripción |
|---------------|--|
| ODA1 | Aire puro que se ensucia sólo temporalmente (por ejemplo, polen) |
| ODA2 | Aire con concentraciones altas de partículas y/o de gases contaminantes |
| ODA3 | Aire con concentraciones muy altas de contaminantes o de partículas |

6.2.3. Filtración del aire exterior

La exigencia de filtración del aire exterior mínimo de ventilación se establece en el RITE en la Instrucción Técnica IT 1.1.4.2.4 (RITE, 2013). Las clases de filtración mínimas a emplear se

establecen en función del aire exterior (ODA) y de la calidad de aire interior (IDA) descritas en la Tabla 6.3 (RITE, 2013). Para el caso de estudio con ODA1 e IDA2, la clase de filtración debe ser *F8* (RITE, 2013).

Tabla 6.3: Clases de filtración. Fuente:(RITE, 2013).

| Calidad de aire interior | Calidad de aire exterior | | | |
|--------------------------|--------------------------|----------|-------|-------|
| | IDA1 | IDA2 | IDA3 | IDA4 |
| ODA1 | F9 | F8 | F7 | F5 |
| ODA2 | F7+F9 | F6+F8 | F5+F7 | F5+F6 |
| ODA3 | F7+GF*+F9 | F7+GF+F9 | F5+F7 | F5+F6 |
| * Filtro de gas | | | | |

6.2.4. Aire de extracción

En función del uso del edificio o local, el RITE en la Instrucción Técnica IT.1.1.4.2.5 clasifica el aire de extracción en categorías que dependen del uso del edificio (ver Tabla 6.4), (RITE, 2007). Se considera el aire de los espacios del edificio estudiado como aire AE1, esto es, aire de bajo nivel de contaminación, por lo que no es necesario extraer aire del edificio.

Tabla 6.4: Calidad del aire de extracción. Fuente:(RITE, 2007).

| Clasificación | Descripción |
|---|---|
| AE1: Bajo nivel de contaminación | Aire que procede de los locales en los que las emisiones más importantes de contaminantes proceden de los materiales de construcción y decoración, además de las personas |
| AE2: Moderado nivel de contaminación | Aire de locales ocupados con más contaminantes que la categoría AE 1 |
| AE3: Alto nivel de contaminación | Aire que procede de locales con producción de productos químicos, humedad, etc. |
| AE4: Muy alto nivel de contaminación | Aire que contine sustancias olorosas y contaminantes perjudiciales para la salud en concentraciones mayores que las permitidas en el aire interior de la zona ocupada. |

6.2.5. Recuperación de calor del aire de extracción

En los sistemas de climatización de los edificios en los que el caudal de aire expulsado al exterior, por medios mecánicos, sea superior a $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, se recuperará la energía del aire expulsado, según la Instrucción Técnica I.T.1.2.4.5.2 del RITE (RITE, 2013). La sección de recuperación de calor sirve para aprovechar parte de la energía del aire viciado que se descarga para precalentar (en modo calefacción) o preenfriar (en modo refrigeración) el aire de ventilación. Para el caso de estudio, no se recupera calor debido a que el caudal de aire expulsado al exterior no se hace por medios mecánicos ya que este sale al exterior por las ventanas y cuartos de baños.

6.2.6. Condiciones interiores

Las condiciones en el interior de los edificios se establecen en el RITE en su Instrucción Técnica IT 1.1.4.1.2 “temperatura operativa y humedad relativa” (RITE, 2007), y se muestran en la Tabla 6.5. Para el caso de estudio se establece temperatura operativa de 21°C y humedad relativa de 50 %.

Tabla 6.5: Condiciones interiores. Fuente:(RITE, 2007).

| Estación | Temperatura operativa | Humedad relativa |
|----------|-----------------------|------------------|
| | (°C) | (%) |
| Verano | 23...25 | 45...60 |
| Invierno | 21...23 | 40...50 |

6.3. Sistema de ventilación mecánica

Se supondrá que la ventilación requerida por el edificio Aulario es proporcionada por un ventilador mecánico convencional, con las características descritas a continuación.

El sistema de ventilación con ventilador mecánico consta de los siguientes equipos: ventilador mecánico, Unidad de Tratamiento de Aire (UTA), conductos de aire, difusores y compuertas. La Fig. 6.1, muestra el esquema del sistema. Se dimensiona la UTA, el diseño de los conductos y la elección de los difusores y compuertas como se describe en los apéndices 1 y 2 del presente Capítulo.

Posteriormente se dimensiona el sistema, lo que requiere calcular en número de ventiladores mecánicos necesarios para proporcionar el aire de ventilación del caso de estudio, como se describe en la siguiente sección.

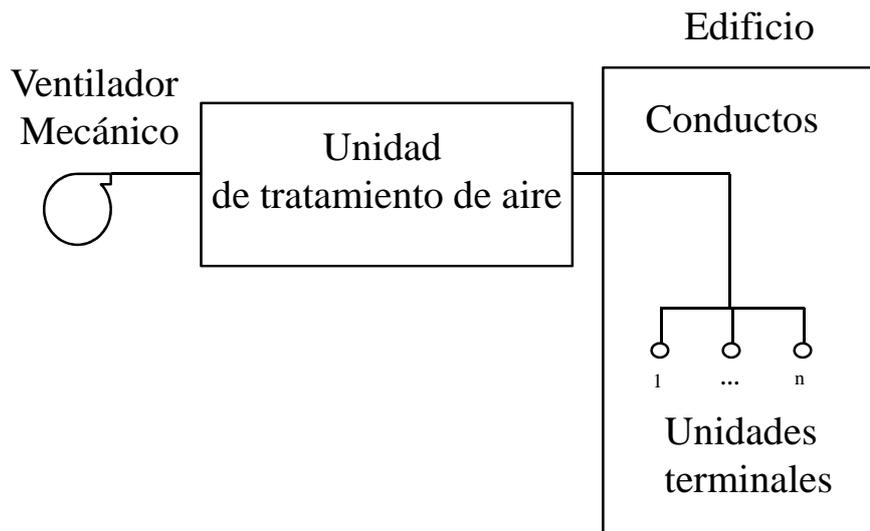


Figura 6.1: Esquema del sistema de ventilación mecánica.

6.3.1. Ventilador mecánico convencional. Características

Las características del ventilador mecánico se toman del equipo elegido dentro de los ofertados en el mercado que cumple los requerimientos de ventilación del caso de estudio. Se elige el equipo cuyo manual técnico proporcione datos de las características del equipo que incluyan tipo y cantidad de materiales usados en su fabricación. El ventilador mecánico marca Coral, modelo ACN500/6, fabricado en chapa, con peso de 153 kg, mostrado en la Fig. 6.2, proporciona caudales de ventilación hasta $15.4 \text{ m}^3/\text{s}$ y caída de presión máxima de 4100 Pa. En la Tabla 6.6 se encuentran algunas especificaciones técnicas del equipo.



Figura 6.2: Ventilador mecánico.

Tabla 6.6: Ventilador mecánico. Especificaciones técnicas.

| Marca | Modelo | Material | Caudal máximo máximo | Caída de presión máxima | Potencia | Peso |
|-------|----------|----------|---------------------------|----------------------------|----------|------|
| | | | (m^3/s) | (Pa) | (kW) | (kg) |
| Coral | ACN500/6 | Chapa | 15.4 | 4100 | 4 | 153 |

6.3.2. Sistema de ventilación mecánica. Dimensionamiento

Se encuentran las características del sistema de ventilación con ventilador mecánico: equipos requeridos, tipo y cantidad de materiales usados. Para suministrar el aire de ventilación requerido por el edificio, de $6.042 \text{ m}^3/\text{s}$, es necesario un solo ventilador mecánico. La unidad de tratamiento de aire y los conductos representan el 74.66 % y el 16.47% del peso total del sistema. Los detalles de las características del sistema se resumen en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7: Características del sistema de ventilación mecánica.

| Equipo | Peso | Cantidad requerida | Material | Peso | Proporción en Peso |
|---------------------|---------|--------------------|-------------------|----------------|--------------------|
| | (kg) | (Unidades) | | (kg) | (%) |
| Ventilador mecánico | 153.00 | 1 | Acero | 153 | 2.86 |
| UTA | 3990.00 | 1 | Alu-zinc AZ186 | 3511.20 | 74.66 |
| | | | Aluminio | 199.50 | |
| | | | Chapa | 199.50 | |
| | | | Lana mineral | 79.80 | |
| Conductos | 880.10 | 1 | Chapa galvanizada | 880.10 | 16.47 |
| Difusores | 1.00 | 46 | Aluminio | 46 | 0.86 |
| Compuertas | 12.50 | 22 | Chapa | 275.00 | 5.15 |
| Total | | | | 5344.10 | 100.00 |

6.3.3. Desempeño energético del sistema de ventilación mecánica

Los equipos del sistema de ventilación con ventilador mecánico que requieren energía para su operación son: el ventilador mecánico y la UTA. Para un tiempo de operación supuesto de 1392 h/año, durante 25 años de vida útil, se calcula el consumo de energía final y de energía primaria, según el factor de conversión de energía para España de 2.461 kWh E.primaria/kWh E.final para electricidad convencional nacional (IDAE, 2014). El ventilador mecánico con potencia de 4 kW requiere 5568.00 kWh/año, lo que supone un consumo total en su vida útil de 139200 kWh de energía final, equivalentes a 342571.20 kWh de energía primaria. La UTA consume energía en el proceso de calentamiento y humidificación del aire, y requiere 320285.28 kWh/año. En su vida útil consume 8007132.00 kWh de energía final, equivalentes a 19705551.85 kWh de energía primaria. El desempeño energético del sistema se resume en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8: Desempeño energético del sistema de ventilación mecánica. Consumo y producción de energía. Fase de uso.

| Proceso | Requerimiento energético | Consumo energía final | Consumo energía primaria | Producción energía final | Producción energía primaria |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| | (kWh/año) | (KWh) | (KWh) | (KWh) | (kWh) |
| Operación del ventilador | 5568.00 | 139200.00 | 342571.20 | 0 | 0 |
| Tratamiento del aire | 320285.25 | 8007132.00 | 19705551.85 | 0 | 0 |
| Total | 325853.28 | 8146332.00 | 20048123.05 | 0 | 0 |

6.3.4. Desempeño ambiental del sistema de ventilación mecánica

Para conocer el desempeño ambiental del sistema de ventilación con ventilador mecánico, se evalúan los impactos ambientales del sistema en la fase de uso y los impactos ocasionados por los materiales requeridos para la fabricación de los equipos que forman el sistema y su disposición final.

En la fase de uso se calculan los daños ocasionados durante la vida útil del sistema. En el presente trabajo se considera un tiempo de operación de 25 años, que se encuentra dentro del periodo de vida útil considerado entre 20 y 30 años (Alsema, 2003).

En la fase de disposición final se calcula la cantidad de materiales que se reciclan y el requerimiento energético para este proceso, con base en la información reportada en la literatura, resumidas en las Tablas 6.9 y 6.10.

En las siguiente secciones se presentan los resultados de los impactos ambientales del sistema.

Tabla 6.9: Escenario de reciclaje en España de los materiales que requieren los equipos del sistema de ventilación mecánica.

| Material | Reciclaje | Referencia |
|--------------|-----------|----------------|
| | (%) | |
| Acero, chapa | 75.0 | (Unesid, 2013) |
| Alu-zinc | 40.5 | (Arpal, 2012) |
| Aluminio | 40.5 | (Arpal, 2012) |
| Hierro | 75.0 | (Unesid, 2013) |

Tabla 6.10: Requerimiento energético para el reciclaje de los materiales del sistema de ventilación mecánica.

| Material | Energía requerida en el reciclaje | Referencia |
|--------------|-----------------------------------|--------------------------|
| | (MJ/kg) | |
| Acero, chapa | 4.30 | (Yellishetty M., 2011) |
| Alu-zinc | 0.44 | (Rabah y El-Sayed, 1995) |
| Aluminio | 0.075 | (Quinkertz et al., 2001) |
| Lana mineral | 15.3 | (López et al., 2012) |

6.3.4.1. Impactos ambientales del sistema de ventilación mecánica. Fase de uso

El uso del sistema de ventilación con ventilador mecánico ocasiona impactos ambientales debido al consumo de energía para la operación del ventilador mecánico y para el tratamiento del aire. Este consumo energético ocasiona daños sobre la mayoría de las categorías, como se aprecia en la Fig. 6.3. Las categorías de daños más afectadas son, el agotamiento de reservas con 66.77 %, la esperanza de vida con 22.74 % y la morbilidad severa con 8.05 %.

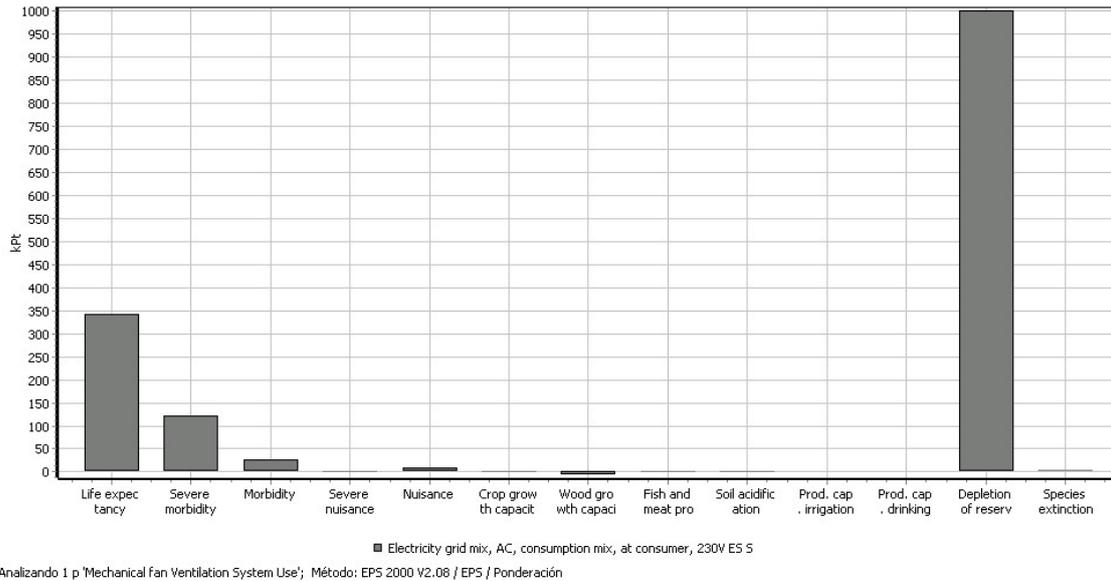


Figura 6.3: Impactos ambientales del sistema de ventilación mecánica. Fase de uso. Ponderación. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

6.3.4.2. Impactos ambientales. Materiales usados y su disposición final

En la fase de disposición final se crea el escenario de reciclaje de los materiales del sistema en España, y se calcula la energía requerida en este proceso en base a la información reportada en la literatura como se describió en la sección 6.3.4 (ver Tablas 6.10 y 6.9). Se obtuvo que en España se recicla el 50.63 % de los materiales del sistema, el 49.37 % restante se supone va a vertedero. Se encuentra que el reciclaje de estos materiales requiere 1753.21 kWh de energía final. Usando el factor de conversión para electricidad convencional nacional, de 2.461 kWh E.primaria/kWh E.final (IDAE, 2014), se encuentra un consumo de 4314.66 kWh E.primaria en el proceso de reciclaje.

Posteriormente se calculan las toneladas kilómetro requeridas para el transporte del sistema hasta la planta de reciclaje BIOTRAN ubicada en Tudela de Duero, Valladolid (Biotran, 1998). Se obtiene que el sistema requiere 119.17 tkm.

Los resultados muestran que los conductos, las compuertas y la unidad de tratamiento de aire, como se aprecia en la Fig. 6.4, causan los mayores daños sobre el agotamiento de reservas.

El reciclaje del sistema evita daños en la mayoría de las categorías, como muestran las barras en el rango de cero hacia abajo de la Fig. 6.5. Por otro lado, la disposición final en vertedero produce daños principalmente sobre el agotamiento de reservas.

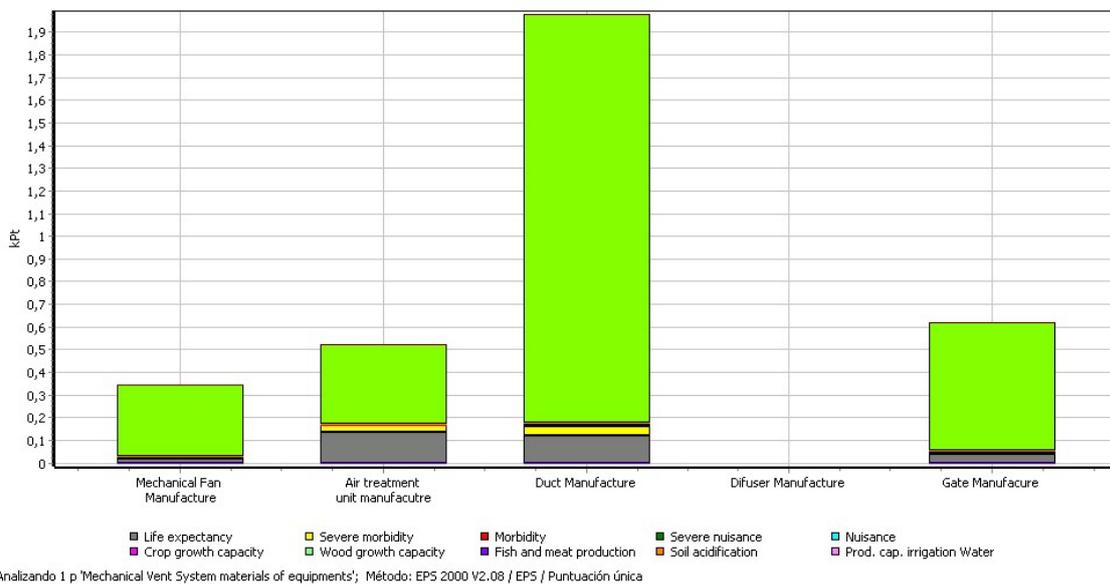


Figura 6.4: Impactos ambientales de los equipos usados por el sistema de ventilación mecánica. Puntuación única. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

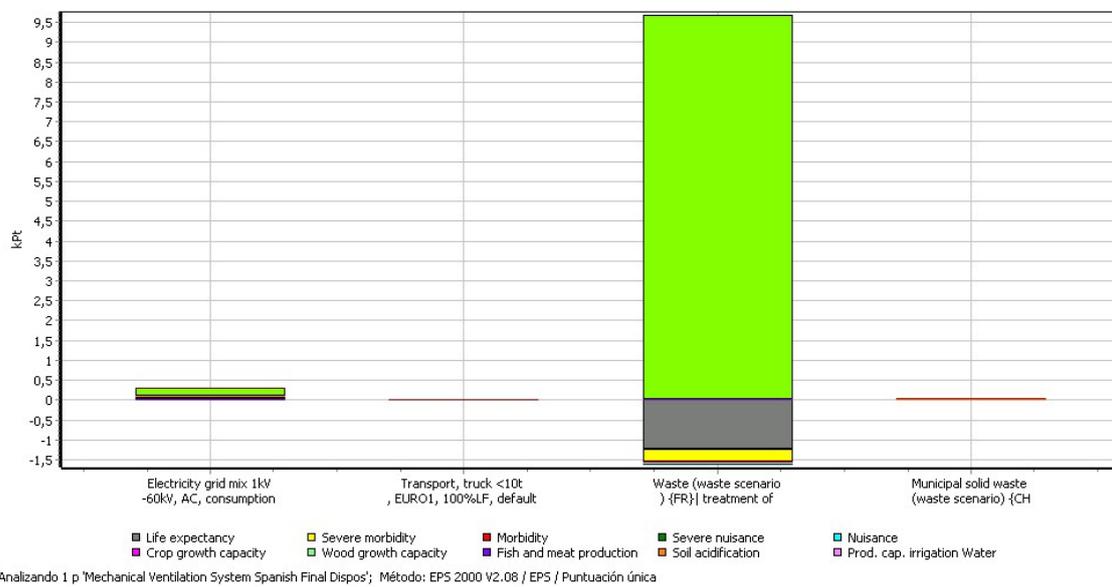


Figura 6.5: Impactos ambientales debidos a la disposición final de los equipos usados por el sistema de ventilación mecánica. Puntuación única. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

6.3.4.3. Impactos ambientales. Ciclo de vida

Durante el ciclo de vida del sistema de ventilación con ventilador mecánico, se encuentra que la fase de uso ocasiona los mayores impactos ambientales debido al consumo de energía. El uso del sistema debe pagar 999929.09 ELUs para restaurar los daños ocasionados sobre el agotamiento de reservas, 340541.57 ELUs para la categoría de daño, esperanza de vida, y 120618.96 ELUs para la morbilidad severa.

Los materiales usados por los equipos del sistema ocasionan los principales impactos sobre las mismas categorías de daño que la fase de uso (agotamiento de reservas, esperanza de vida y morbilidad severa), debiendo pagar para restaurar los daños ocasionados, 3023.79 ELUs, 311.96 ELUs y 90.14 ELUs, respectivamente.

La disposición final del sistema evita daños ambientales, principalmente en el agotamiento de reservas, la morbilidad severa y la morbilidad, evitando pagar 1163.75 ELUs, 281.65 ELUs y 22.42 ELUs, respectivamente. Por otro lado, se produce daño sobre el agotamiento de reservas con un coste ambiental de 9913.53 ELUs, debido principalmente a la cantidad de materiales que se deposita en vertedero. Los detalles de los impactos ambientales en todas las categorías de daño se presentan en la Tabla 6.11.

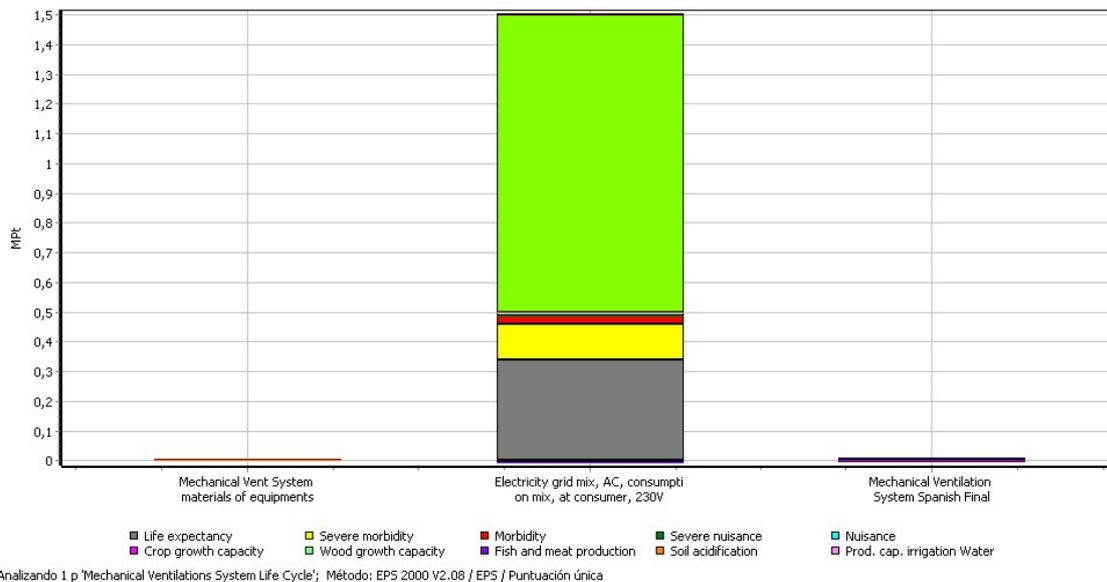


Figura 6.6: Impactos ambientales del sistema de ventilación mecánica. Ciclo de vida. Puntuación única. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

Tabla 6.11: Impactos ambientales del sistema de ventilación mecánica. Ciclo de vida. Evaluación del daño. Datos calculados usando el software SimaPro8.

| Categoría de daño | Unidad | Total | Materiales | Uso Consumo energía | Disposición Final |
|---|--------|------------|------------|------------------------|-------------------|
| Esperanza de vida | ELU | 339689.77 | 311.96 | 340541.57 | -1163.75 |
| Morbilidad severa | ELU | 120427.45 | 90.14 | 120618.96 | -281.65 |
| Morbilidad | ELU | 25489.15 | 16.68 | 25494.89 | -22.42 |
| Molestia severa | ELU | 1147.05 | 10.42 | 1137.22 | -17.02 |
| Molestia | ELU | 9810.43 | 5.49 | 9821.95 | -17.02 |
| Capacidad de crecimiento de maíz | ELU | -1502.59 | 0.81 | -6322.23 | 5.25 |
| Capacidad de crecimiento de madera | ELU | -6321.11 | -4.13 | -6322.23 | 5.25 |
| Producción de pescado y carne | ELU | -229.46 | -0.13 | -229.60 | 0.26 |
| Acidificación del suelo | | 268.06 | 0.14 | 268.34 | -0.42 |
| Capacidad de producción de agua para irrigación | ELU | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Capacidad de producción de agua potable | ELU | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Agotamiento de reservas | ELU | 1012866.41 | 3023.79 | 999929.09 | 9913.54 |
| Extinción de especies | ELU | 4750.33 | 3.44 | 4751.13 | -4.24 |
| Total | ELU | 1509400.67 | 3458.60 | 1495514.30 | 8427.77 |

6.4. Apéndice 1. Diseño de los conductos de aire del edificio Aulario

Para diseñar la red de conductos, es necesario conocer las características geométricas del edificio y los caudales de aire requeridos por cada uno de los espacios ocupados. En la sección 6.4.1 se explican las características geométricas del edificio y las consideraciones tomadas para definir los tramos y la longitud de los conductos de aire. En la sección 6.4.2 se detallan las caudales requeridos por cada uno de los espacios ocupados por el edificio, según normativa.

6.4.1. Características geométricas del edificio Aulario

El edificio Aulario consta de dos plantas, planta primera y planta baja. Con base en los planos del edificio, suministrados por la oficina de Calidad Ambiental y Sostenibilidad de la Universidad de Valladolid, se conocen las características geométricas de los espacios, necesarios para diseñar la red de conductos.

A continuación se describen los espacios de las dos plantas. La entrada al edificio se lleva a cabo por la planta baja, desde la parte central donde se encuentran las puertas de acceso a un espacio central o vestíbulo. Visto el edificio desde el vestíbulo central, las dos plantas tienen dos alas (derecha e izquierda), donde se encuentran las aulas y los aseos. En el ala derecha de la primera planta hay un espacio llamado seminario, cuatro aulas y dos aseos. En el ala izquierda de esta planta se encuentra la sala de informática, un espacio dispuesto para el estudio con ordenadores portátiles; al lado se encuentra la sala de estudio, posteriormente, dos aulas y dos aseos. La planta baja tiene un vestíbulo en la parte central de la planta. En el ala derecha hay un espacio llamado seminario, siete aulas y dos aseos. En el ala izquierda hay siete aulas, dos aseos y la conserjería. Los espacios de las dos plantas del edificio se muestran en los planos de las Figs. 6.7 y 6.8, para la primera planta y la planta baja, respectivamente.

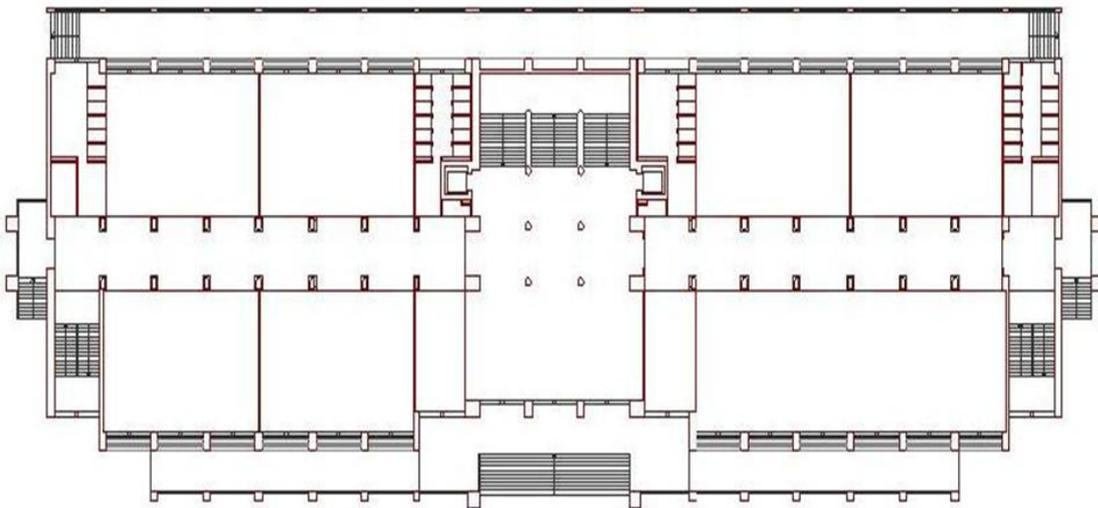


Figura 6.7: Plano de la primera planta del edificio Aulario.

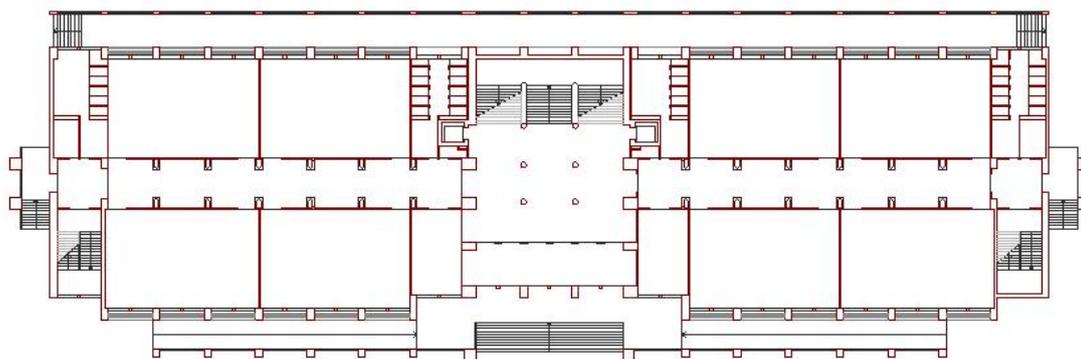


Figura 6.8: Plano de la planta baja del edificio Aulario.

6.4.2. Caudal de ventilación del edificio Aulario

El cálculo del caudal de ventilación de los espacios del edificio se realiza en base a la calidad del aire interior requerido por los espacios del edificio. Los criterios de calidad del aire en el interior de las edificaciones se establecieron inicialmente en el Código Técnico de la Edificación (CTE) en la Sección HS3, donde se estipulan los caudales de ventilación mínimos exigidos en función del uso de los espacios (CTE, 2006a). Posteriormente, el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE, 2013), en la Instrucción Técnica IT 1.1.4.2, valida la calidad de aire interior establecida en la Sección HS3 del CTE y amplía la exigencia de ventilación al resto de edificios que deberán disponer de un sistema de ventilación que asegure renovaciones de aire de acuerdo a la categoría del aire interior. Para el caso de estudio, el caudal de aire exterior requerido se encuentra dentro de la categoría IDA2 (aire de buena calidad), con $12.5 \text{ dm}^3/\text{s.persona}$, como se muestra en la Tabla 6.12.

El caudal mínimo de aire exterior de ventilación se establece en la IT 1.1.4.2.3 (RITE, 2013). Se encuentran “cinco métodos para calcular el caudal mínimo de aire de ventilación que permitan alcanzar la calidad de aire percibida: método indirecto de caudal de aire exterior por persona, método directo por calidad del aire percibido, método directo por concentración de CO_2 , método indirecto de caudal de aire por unidad de superficie, y el método de dilución, que se establece en la Norma UNE 13779” (Rey y Velasco, 2007). Cada uno de estos métodos se explican en detalle en (Rey y Velasco, 2007).

Se elige el método basado en el caudal de aire por unidad de superficie, debido a que se cuenta con las dimensiones de los espacios. Se encuentran dos Normas que expresan las renovaciones por unidad de superficie para espacios dedicados a actividad humana. La Norma estadounidense Ashrae 62-2004 (Ashrae, 2004) y la Norma europea UNE-CR 1752-IN-2008 (AENOR, 2008a).

La Norma estadounidense Ashrae 62 establece 2.15 l/s.m^2 para espacios destinados a la educación como las universidades. Este valor se calcula en base a la densidad de ocupantes y la combinación de aire exterior, para el caso de que el aire requerido esté clasificado como tipo 2, esto es, aire con concentración moderada de contaminantes. En la Tabla 6.13 se muestran los valores descritos anteriormente (Ashrae, 2004).

La Norma europea UNE-CR 1752-IN expresa la tasa de ventilación en función de la categoría de ambiente interior. Para espacios destinados a aulas con nivel de ocupación de $0.5 \text{ ocupantes}/(\text{m}^2 \text{ de suelo})$, la Norma establece 6.0 l/s.m^2 , 4.2 l/s.m^2 y 2.4 l/s.m^2 , para calidad de aire aceptado tipo A, B y C, respectivamente. La categoría A corresponde a un nivel alto, la categoría B a un nivel medio y la categoría C a un nivel moderado de calidad de aire aceptado. En la Tabla 6.14 se resumen los valores descritos anteriormente (AENOR, 2008a). El presente estudio toma como base la Norma Europea UNE-CR 1752-IN. Se considera categoría C de ambiente interior, esto es, un nivel moderado de expectativas, debido a que en el edificio sólo se realizan actividades académicas de impartición de clases y salas de estudio. Con base en estas consideraciones, se calcula el caudal de ventilación en función del área de los espacios, con un requerimiento de ventilación de 2.4 l/s.m^2 .

El caudal de ventilación en los aseos es diferente del caudal de ventilación en los demás

espacios. El Documento Básico HS sobre Salubridad, en la Sección HS3, Calidad de aire interior, del Código Técnico de la Edificación (CTE) (CTE, 2006b) establece el caudal mínimo de ventilación en los aseos y cuartos de baño de 15 l/s.local.

El análisis realizado en este estudio tiene en cuenta el caudal de aire requerido en todos los espacios ocupados del edificio. Se encuentra que el caudal total requerido por los espacios del edificio Aulario es de 6.042 m³/s.

Tabla 6.12: Caudales de aire exterior. Fuente:(RITE, 2013).

| Categoría | dm ³ /s.persona |
|-----------|----------------------------|
| IDA1 | 20 |
| IDA2 | 12.5 |
| IDA3 | 8 |
| IDA4 | 5 |

Tabla 6.13: Tasas de ventilación mínimas en zonas respirables. Fuente:(Ashrae, 2004).

| Categoría de ocupación | Densidad de ocupantes | Aire exterior | Clase de aire |
|------------------------|-------------------------------|---------------|---------------|
| | (persona/100 m ²) | (l/s.persona) | |
| Universidad | 25 | 8.6 | 2 |

Tabla 6.14: Criterios de diseño para los espacios en diferentes tipos de edificios. Fuente:(AENOR, 2008a).

| Tipo de edificio/espacio | Ocupación | Categoría | Tasa de ventilación |
|--------------------------|---------------------------|-----------|---------------------|
| | (persona/m ²) | | l/s.m ² |
| Aula | 0.5 | A | 6.0 |
| | | B | 4.2 |
| | | C | 2.4 |

6.4.3. Caudales de ventilación en cada tramo

Se analiza la distribución de los espacios y se dibujan diferentes disposiciones desde la salida del ventilador hasta el último difusor. Se elige el tramo más largo como conducto principal. Este comienza en la salida del aire del ventilador. Se supone la ubicación del ventilador en la mitad de la planta superior del edificio, al cual se le asigna el número (I). Posteriormente el aire de ventilación baja por el conducto hasta la planta primera (punto II), continúa a la planta baja (punto III) y finalmente se dirige al ala izquierda hasta el último difusor ubicado en el aseo de los alumnos (punto IV), que corresponde al punto final del conducto principal.

En la primera planta (punto II), el conducto principal se bifurca en dos ramas que van hasta los puntos (VI) y (VII). Cada una de estas derivaciones presenta subderivaciones, que corresponden a la entrada a cada uno de los espacios ocupados. La derivación (II-VI) tiene diez subderivaciones, a las que se les han asignado los números 1 al 10. La derivación (II-VII) también tiene diez subderivaciones descritas con los números 11 al 20. En la planta baja, el conducto principal (tramo III-IV) que corresponde al ala izquierda, presenta once derivaciones. A estos tramos se les asignaron los números 21 al 31. El ala derecha de la planta baja, tramo (III-V), presenta once subderivaciones, descritas con los números 32 al 42. En la figura 6.9, se muestran las derivaciones y subderivaciones de los conductos de aire del edificio Aulario.

Con base en los caudales requeridos por cada uno de los espacios, descritos en la sección 6.4.2, se distribuyen los conductos, como se aprecia en el esquema mostrado en la Fig. 6.9. Posteriormente se calculan los caudales que circulan por cada tramo de la red de conductos. Se comienza con el caudal de aire que sale del ventilador, $6.042 \text{ m}^3/\text{s}$, que circula por el tramo (I-II). A este caudal se le resta el caudal que entra en la primera planta, $3.010 \text{ m}^3/\text{s}$, donde se distribuye por el ala derecha e izquierda, $1.505 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. Se obtienen $3.032 \text{ m}^3/\text{s}$ de aire que se dirigen hacia la planta baja (tramo II-III). Este caudal se bifurca en dos tramos, por cada tramo (III-IV) y (III-V) circulan $1.516 \text{ m}^3/\text{s}$.

Las aulas A21, A23, A25 y A27, ubicadas en el ala izquierda, y el aula A22 ubicada en el ala derecha de la primera planta se dividieron en dos espacios. La sala de estudio se dividió en cuatro espacios. Estas divisiones tienen como finalidad suministrar el aire requerido a través de varios tramos, y lograr así una mejor distribución del aire de ventilación. En las Tablas 6.15 y 6.16 se desglosan los caudales por espacios de la primera planta.

Las aulas A11, A13, A15 y A17, ubicadas en el ala izquierda, y las aulas A10, A12, A14, A16 y A18 ubicadas en el ala derecha de la planta baja se dividieron en dos espacios. En las Tablas 6.17 y 6.18 se desglosan los caudales por espacios de la planta baja.

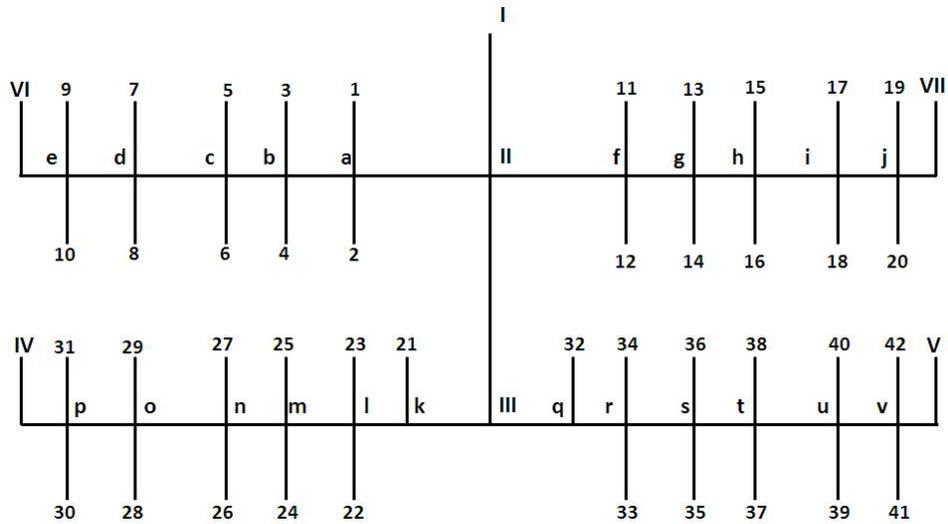


Figura 6.9: Esquema de la red de conductos de ventilación del edificio Aulario. Por espacios.

Tabla 6.15: Caudales de ventilación por espacios de la primera planta del edificio Aulario. Ala izquierda.

| Espacios | Area | Caudal de ventilación |
|--|-------------------|-----------------------|
| | (m ²) | (m ³ /s) |
| Aseo alumnas | 42.96 | 0.015 |
| Seminario | 36.50 | 0.112 |
| 8 aulas: A21a=A21b=A23a=A23b=A25a=A25b=A27a=A27b | 71.00 | 0.170 |
| Aseo alumnos | 45.33 | 0.015 |

Tabla 6.16: Caudales de ventilación por espacios de la primera planta del edificio Aulario. Ala derecha.

| Espacios | Area | Caudal de ventilación |
|--------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| | (m ²) | (m ³ /s) |
| Aseo alumnos | 42.96 | 0.015 |
| Sala portátiles | 46.50 | 0.112 |
| Sala de estudio: A22a=A22b=A24a=A24b | 71.00 | 0.170 |
| Aseo alumnas | 44.08 | 0.015 |

Tabla 6.17: Caudales de ventilación por espacios de la planta baja del edificio Aulario. Ala izquierda.

| Espacios | Area | Caudal de ventilación |
|--|-------------------|-----------------------|
| | (m ²) | (m ³ /s) |
| Sede P.A.U | 24.75 | 0.059 |
| Aseo alumnas | 40.76 | 0.015 |
| Seminario | 36.50 | 0.064 |
| 8 aulas: A11a=A11b=A13a=A13b=A15a=A15b=A17a=A17b | 71.00 | 0.170 |
| Aseo alumnos | 43.08 | 0.015 |

Tabla 6.18: Caudales de ventilación por espacios de la planta baja del edificio Aulario. Ala derecha.

| Espacios | Area | Caudal de ventilación |
|---|-------------------|-----------------------|
| | (m ²) | (m ³ /s) |
| Conserjería | 24.72 | 0.059 |
| Aseo alumnos | 40.75 | 0.015 |
| Aula: A10 | 36.50 | 0.064 |
| A12a=A12b=A14a=A14b=A16a=A16b=A18a=A18b | 71.00 | 0.170 |
| Aseo alumnas | 42.72 | 0.015 |

6.4.4. Diseño del conducto principal

Se usa el método de cálculo basado en emplear una caída de presión constante para cada tramo del conducto principal. Las derivaciones se calculan con una caída de presión unitaria distinta de la que se ha utilizado en el conducto principal. Se asigna la velocidad del aire en el tramo inicial según el tipo de edificio. Para escuelas puede usarse entre 7 m/s y 8 m/s (Miranda y Jutglar, 2009). Se elige 7 m/s en el primer tramo del conducto principal (I-II).

La clasificación de conductos establece un límite de velocidad de 11 m/s para conductos de baja velocidad, por encima de este valor se consideran conductos de alta velocidad (Miranda y Jutglar, 2009). En base a lo anterior, se diseñarán conductos de baja velocidad.

A continuación se describe el procedimiento seguido para calcular las dimensiones de los conductos de ventilación del edificio en el tramo principal, en las derivaciones y las subderivaciones.

Longitud total equivalente de cada tramo

El sistema de conductos del edificio es un sistema relativamente sencillo. Por tal motivo y, para facilitar los cálculos, se puede asumir que los accidentes (curvas, derivaciones, y otros.) representan un porcentaje de la longitud geométrica (Miranda y Jutglar, 2009). En base a este criterio, el cálculo de la pérdida producida por los accidentes se hará por el procedimiento sencillo de aumentar un 15 % la longitud geométrica del conducto, como se muestra en la ecuación 6.1. El tramo principal no tiene accidentes, por tanto, la longitud geométrica coincide con la longitud total equivalente.

$$LTE = L_{geométrica} + 0.15L_{geométrica} \quad (6.1)$$

Para medir las longitudes de cada uno de los tramos, se comienza con el punto de salida del aire de ventilador, punto (I). Desde allí baja un metro hasta la primera planta, tramo (I-II). Continúa 3 m, hasta la planta baja, tramo (II-III). Desde el punto central del edificio hasta cada una de las alas, derecha e izquierda, de las dos plantas hay una distancia de 50 m. Por último, se asume como 3 m la distancia desde el conducto a la entrada de cada espacio ocupado.

Dimensiones del primer tramo del conducto principal

Se diseñan conductos de sección cuadrada, donde el ancho (W) es igual al largo (H), como se muestra en la ecuación 6.2, usada para el cálculo del área. A continuación se describe el procedimiento de cálculo de las dimensiones del conducto principal en el primer tramo (I-II). Del análisis realizado en la sección 6.4.2, se conoce el caudal de aire total, 6.042 m³/s, que requiere el sistema de ventilación del edificio Aulario. Se estableció la velocidad de 7 m/s en el primer tramo del conducto principal (tramo I-II). Aplicando la ecuación 6.3, donde A representa el área en m², \dot{V} el caudal de aire en m³/s y v la velocidad en m/s. Se encuentra

el área en el tramo (I-II) de 0.863 m². Por tanto, las dimensiones del primer tramo son 0.929 m, de ancho y de largo. El diámetro equivalente, De , se calcula usando la ecuación 6.4. Se obtiene 1.016 m de diámetro equivalente, en el tramo (I-II).

$$A = W.H = H^2 \quad (6.2)$$

$$A = \frac{\dot{V}}{v} \quad (6.3)$$

$$De = 1.3 \frac{(W.H)^{0.625}}{(W + H)^{0.250}} \quad (6.4)$$

Pérdida de presión unitaria en el tramo principal

En todos los conductos por los que circula aire existe una continua pérdida de presión. Esta pérdida de presión se llama también pérdida de carga por rozamiento y, para conductos circulares, viene dada por la ecuación de Darcy-Weisbach, ecuación 6.5 (Carrier, 2009). ΔP representa la caída de presión en Pa, f es el factor de rozamiento adimensional, L la longitud del conducto en m, D el diámetro en m, v la velocidad en m/s y ρ , la densidad en kg/m³.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2} \rho \quad (6.5)$$

El factor de rozamiento, f , viene dado por la ecuación de Colebrook, ecuación 6.6 (Carrier, 2009). Donde ϵ representa la rugosidad absoluta del material en m, Re el número de Reynolds ($Re = vD\rho/\mu$) y μ la viscosidad dinámica en kg/(ms).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right] \quad (6.6)$$

Como la ecuación de Colebrook no permite despejar el factor de rozamiento, el cálculo preciso de la pérdida de carga es laborioso. Sin embargo puede simplificarse utilizando ecuaciones aproximadas adaptadas a un fluido y a unas condiciones de trabajo limitadas (Carrier, 2009).

“Para conductos de aire, dentro de las condiciones usuales de trabajo de los sistemas de climatización”, puede utilizarse la ecuación 6.7 (Carrier, 2009). Donde ΔP es la pérdida de carga en Pa, ϵ la rugosidad de la superficie interior en mm (0.09 para el conducto galvanizado), L la longitud del conducto en m y v la velocidad del aire en m/s. Esta ecuación se utiliza para construir gráficos de pérdida de carga para conductos galvanizados de rugosidad absoluta 0.09 mm. Si la rugosidad del conducto es distinta, deberá corregirse la pérdida de carga por unidad de longitud por un factor de corrección que lo tenga en cuenta (Carrier, 2009). Aplicando la ecuación 6.7 se obtiene para el tramo (I-II) la caída de presión

unitaria, $\Delta P/L$, de 0.46 Pa/m.

$$\Delta P = 0.15\epsilon L \frac{D^{1.22}}{v^{1.82}} \quad (6.7)$$

Dimensiones del conducto principal

Conocido el caudal en cada tramo y la caída de presión lineal constante, esto es, $(\Delta P/L)_{I-II} = (\Delta P/L)_{II-III} = (\Delta P/L)_{III-IV} = 0.46$ Pa/m, es posible conocer las dimensiones del conducto leyendo el diámetro de gráficos o ábacos de rozamiento de conductos, como el mostrado en la Fig. 6.10 (Carrier, 2009).

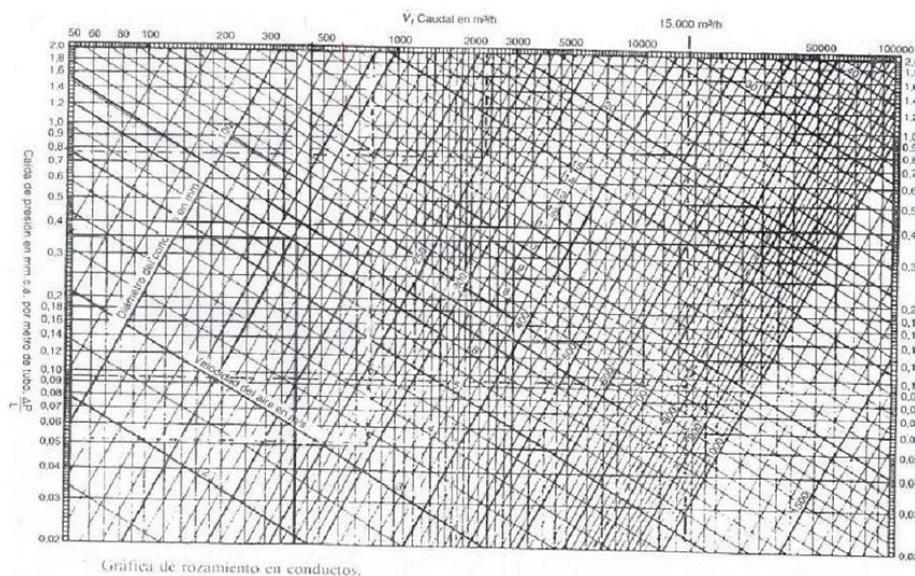


Figura 6.10: Abaco. Rozamiento de conductos.

El diseño de los conductos del edificio requiere realizar múltiples lecturas en el ábaco de rozamiento de conductos, por lo que se obtiene una ecuación donde se pueden calcular las dimensiones de la sección de un conducto cuadrado. El procedimiento para obtener esta ecuación se describe a continuación.

Se parte de la ecuación simplificada de Darcy-Weisbach-Colebrook, ecuación 6.7. Esta ecuación se transforma en una ecuación en función del caudal y de la caída de presión lineal. Este procedimiento requiere sustituir las ecuaciones 6.2, 6.3 y 6.4, en la ecuación 6.7, con lo que resulta la ecuación 6.8. Aplicando la ecuación 6.8, se calculan las dimensiones de los conductos de sección cuadrada. Se obtiene H de 0.695 m y 0.523 m, para los tramos principales (II-III) y (III-IV), respectivamente. Los diámetros equivalentes se obtienen aplicando la ecuación 6.9 para conductos cuadrados. Se encuentran diámetros equivalentes de 0.760 m y 0.572 m para los tramos del conducto principal (II-III) y (III-IV), respectivamente.

$$H = \left(\frac{0.0121\dot{V}^{1.82}}{\frac{\Delta P}{L}} \right)^{1/4.44} \quad (6.8)$$

$$De = 1.0932H \quad (6.9)$$

Velocidad en cada tramo del conducto principal

Conocidas las dimensiones y el caudal en cada tramo del conducto principal, se encuentran las velocidades despejando la velocidad de la ecuación 6.3, descrita arriba. Se encuentra para el tramo principal (II-III), con diámetro equivalente 0.760 m y caudal 3.032 m³/s, la velocidad de 6.27 m/s. Para el tramo principal (III-IV), con diámetro equivalente 0.572 m y caudal 1.516 m³/s, la velocidad es de 5.53 m/s.

Recuperación estática

En la red de conductos de aire, la velocidad de circulación del aire no es constante. En general, va disminuyendo desde la salida del ventilador hasta los lugares de salida (Miranda y Jutglar, 2009). “El teorema de Bernoulli establece claramente que si la velocidad disminuye, la presión aumenta, y, si la velocidad aumenta, la presión disminuye” (Miranda y Jutglar, 2009). Los cambios de velocidad se producen en las derivaciones. Debido a que en la derivación pasa menos aire, generalmente la velocidad a la salida de la derivación es menor que la velocidad en la entrada de la derivación, y en este caso se produce recuperación estática (Miranda y Jutglar, 2009). La fórmula para calcular la recuperación estática, en Pa, está dada por la ecuación 6.10. Donde $R_{estática}$ representa la recuperación estática (también puede encontrarse como ΔP), ρ representa la densidad del aire, v_2 la velocidad en la salida de la derivación y v_1 la velocidad en la entrada a la derivación.

$$R_{estática} = 0.75\rho \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \quad (6.10)$$

En el presente trabajo no se tiene en cuenta la recuperación estática, debido a que se realiza un análisis preliminar del sistema de conductos de distribución de aire. Esta consideración ocasiona sobredimensionamiento del sistema.

Caída de presión en cada tramo del conducto principal

La caída de presión en cada tramo se calcula conociendo la caída de presión lineal en el conducto principal y la longitud total equivalente de cada tramo. Aplicando la ecuación 6.11, se encuentran caídas de presión, ΔP de 0.46 Pa, 1.58 Pa y 26.29 Pa, para los tramos (I-II), (II-III) y (III-IV), respectivamente, para una caída de presión total de 28.33 Pa.

$$\Delta P_{tramo} = \left(\frac{\Delta P}{L} \right) L T E_{tramo} \quad (6.11)$$

Presión en la salida del ventilador

La presión en el punto (I) corresponde a la salida del ventilador. Se calcula sumando la caída de presión durante el recorrido del aire a lo largo del conducto principal (I-II-III-IV) más la caída de presión en el último difusor, menos la recuperación estática, como se muestra en la ecuación 6.12. $(\Delta P/L)$ representa la caída de presión lineal en el tramo principal en Pa/m, $LTE_{(I-IV)}$ es la longitud total equivalente del conducto principal (tramo I-IV) expresada en m, $\Delta P_{difusor}$ representa la caída de presión en el último difusor. Para el caso de estudio se considera, $\Delta P_{difusor} = 2$ mmca. $R_{estática}$ representa la recuperación estática en Pa. Para el análisis preliminar no se tiene en cuenta, como se explicó anteriormente. Se obtiene P_I igual a 47.94 Pa, que es la presión en la salida del ventilador.

$$P_I = \left(LTE_{(I-IV)} \right) \left(\frac{\Delta P}{L} \right) + \Delta P_{difusor} - R_{estática} \quad (6.12)$$

Presión en cada tramo del conducto principal

La presión en cada tramo del conducto principal corresponde a la presión en la boca de cada derivación. Se calcula sabiendo la presión anterior y la caída de presión en cada tramo, como se describe en la ecuación 6.13. Donde P_{II} es la presión en la boca de entrada de la primera planta, P_I de 47.94 Pa es la presión en la salida del ventilador, y $\Delta P_{(I-II)}$ es la caída de presión en el tramo (I-II). Se encuentra la presión en la entrada a la primera planta, P_{II} , de 47.48 Pa y la presión en la entrada a la planta baja, P_{III} , de 45.90 Pa.

$$P_{II} = P_I - \Delta P_{(I-II)} \quad (6.13)$$

Resumen de las características del tramo principal

Se encuentra que el ventilador debe proporcionar como mínimo 47.94 Pa de presión. El diámetro equivalente del primer tramo (I-II) del conducto principal debe ser de 1.016 m, y se va reduciendo, con 0.760 m en el tramo (II-III) y 0.572 m en la entrada al último tramo (III-IV). La velocidad en la salida del ventilador es de 7 m/s y va disminuyendo hasta 5.53 m/s en la entrada al último tramo (III-IV). En las Tablas 6.19 y 6.20 se resumen las longitudes geométricas de los tramos de la primera planta y de la planta baja, respectivamente. La caída de presión y la presión en la boca de cada tramo del conducto principal se muestran en las Tablas 6.21 y 6.22, respectivamente. Por último, se resumen las características del tramo principal en la Tabla 6.23.

Tabla 6.19: Planta primera. Longitud de los tramos (II-VI) y (II-VII).

| Tramo | Longitud |
|----------------|-----------------|
| | (m) |
| (II-a)=(II-f) | 20.5 |
| (a-b)=(f-g) | 7.5 |
| (b-c)=(g-h) | 4.5 |
| (c-d)=(h-i) | 10.0 |
| (d-e)=(i-j) | 4.5 |
| (e-VI)=(j-VII) | 3.0 |

Tabla 6.20: Planta baja. Longitud de los tramos (III-V) y (III-IV).

| Tramo | Longitud |
|-----------------|-----------------|
| | (m) |
| (III-k)=(III-q) | 15.0 |
| (k-l)=(q-r) | 5.5 |
| (l-m)=(r-s) | 7.5 |
| (m-n)=(s-t) | 4.5 |
| (n-o)=(t-u) | 10.0 |
| (o-p)=(u-v) | 4.5 |
| (p-IV)=(v-V) | 3.0 |

Tabla 6.21: Caída de presión en cada tramo del conducto principal.

| Tramo | ΔP |
|--------------|------------|
| | (Pa) |
| (I-II) | 0.46 |
| (II-III) | 1.58 |
| (III-IV) | 26.29 |

Tabla 6.22: Presión en la boca de cada tramo del conducto principal.

| Tramo | P |
|--------------|----------|
| | (Pa) |
| (I) | 47.94 |
| (II) | 47.48 |
| (III) | 45.90 |

Tabla 6.23: Características del conducto principal tramos (I-II), (II-III) y (III-IV). Método de cálculo: Caída de presión lineal constante.

| Tramo | LTE | Caudal | H | Diámetro equivalente | Velocidad |
|--------------|------------|---------------------|----------|-----------------------------|------------------|
| | (m) | (m ³ /s) | (m) | (m) | (m/s) |
| I-II | 1.0 | 6.042 | 0.929 | 1.016 | 7.00 |
| II-III | 3.5 | 3.032 | 0.695 | 0.760 | 6.27 |
| III-IV | 57.5 | 1.516 | 0.523 | 0.572 | 5.53 |

6.4.5. Diseño de las derivaciones

El conducto principal se extiende desde el punto (I) al punto (IV). El tramo principal (III-IV) presenta doce derivaciones, que corresponden a la entrada a cada uno de los espacios del ala izquierda de la planta baja. A su vez, en los puntos (II) y (III), el conducto principal presenta tres derivaciones, identificadas como tramos (II-VI), (II-VII) y (III-V), como se mostró en la Fig. 6.9.

El diseño de las derivaciones requiere conocer el caudal que circula por cada tramo de la derivación y la caída de presión unitaria en la derivación. A continuación se describe el procedimiento de cálculo de cada uno de ellos.

6.4.5.1. Caudales en las derivaciones

Para calcular el caudal que circula por cada tramo de la derivación, se comienza con el caudal que entra al tramo. A este caudal se le resta el caudal que requiere cada espacio, y así sucesivamente hasta llegar al último difusor. A continuación se describe el procedimiento de cálculo de los caudales de la derivación (II-VI) tanto en los tramos de la derivación como en los tramos de las subderivaciones.

Del análisis realizado en la sección 6.4.2, se conocen los caudales de ventilación en cada una de las plantas. En la derivación (II-VI) entran $1.505 \text{ m}^3/\text{s}$ de aire. A este caudal se le restan el caudal que entra a las subderivaciones (a-1) y (a-2), $0.015 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.112 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. Se obtiene el caudal que pasa al tramo (a-b), $1.378 \text{ m}^3/\text{s}$. Parte de este caudal ($0.170 \text{ m}^3/\text{s}$) se deriva a los espacios con tramos (b-3) y (b-4), y continúan $1.037 \text{ m}^3/\text{s}$ por el tramo principal (b-c). En el punto (c), se proporciona el caudal de ventilación a las subderivaciones (c-5) y (c-6), con $0.170 \text{ m}^3/\text{s}$ para cada una de ellas. Al tramo (c-d) salen $0.697 \text{ m}^3/\text{s}$, que alimenta las derivaciones (d-7) y (d-8). Por último pasan $0.356 \text{ m}^3/\text{s}$ al tramo (d-e), que suministra el caudal requerido por las derivaciones, (e-9) y (e-10); el resto entra al último tramo (e-VI), que suministra el caudal de ventilación del último difusor, esto es, de $0.015 \text{ m}^3/\text{s}$. Se sigue el mismo procedimiento para calcular los caudales que circulan por cada tramo de las demás derivaciones.

Se encuentra que los caudales de ventilación de la derivación (II-VI) son iguales a los caudales de ventilación de la derivación (II-VII). En la Tabla 6.24 se muestran los caudales que circulan por cada tramo de la derivación (II-VI).

De igual manera, se encuentra que los caudales de ventilación del tramo del conducto principal (III-IV) son iguales a los caudales de ventilación de la derivación (III-V). En la Tabla 6.25 se resumen los caudales que circulan por los tramos del conducto principal (III-IV).

Tabla 6.24: Caudales de ventilación de la derivación (II-VI). Igual a la derivación (II-VII).

| Tramo | Caudal |
|--|---------------------|
| | (m ³ /s) |
| Tramo (II-a) | 1,505 |
| Subderivación (a-1) | 0.015 |
| Subderivación (a-2) | 0.112 |
| Tramo (a-b) | 1.378 |
| Subderivación (b-3)=Subderivación (b-4) | 0.170 |
| Tramo (b-c) | 1.037 |
| Subderivación (c-5)=Subderivación (c-6) | 0.170 |
| Tramo (c-d) | 0.697 |
| Subderivación (d-7)=Subderivación (d-8) | 0.170 |
| Tramo (d-e) | 0.356 |
| Subderivación (e-9)=Subderivación (e-10) | 0.170 |
| Tramo (e-VI) | 0.015 |

Tabla 6.25: Caudales de ventilación en el tramo principal (III-IV) y sus derivaciones. Igual a la derivación (III-V).

| Tramo | Caudal |
|-------------------------------------|---------------------|
| | (m ³ /s) |
| Tramo (III-k) | 1.516 |
| Derivación (k-21) | 0.059 |
| Tramo (k-l) | 1.457 |
| Derivación (l-22) | 0.064 |
| Derivación (l-23) | 0.015 |
| Tramo (l-m) | 1.378 |
| Derivación (m-24)=Derivación (m-25) | 0.170 |
| Tramo (m-n) | 1.037 |
| Derivación (n-26)=Derivación (n-27) | 0.170 |
| Tramo (n-o) | 0.697 |
| Derivación (o-28)=Derivación (o-29) | 0.170 |
| Tramo (o-p) | 0.356 |
| Derivación (p-30)=Derivación (p-31) | 0.170 |
| Derivación (p-IV) | 0.015 |

6.4.5.2. Caída de presión lineal en cada derivación

Las dimensiones de “las derivaciones se calculan con una caída de presión unitaria distinta de la que se ha utilizado en el conducto principal” (Miranda y Jutglar, 2009). Se sigue el método de la caída de presión lineal constante en el tramo. Para ello, se requiere la presión en la boca de entrada a la derivación. Estos valores se calcularon previamente, durante el diseño del conducto principal, en la sección 6.4.4, donde se encontró la caída de presión en las derivaciones, ΔP , de 47.94 Pa, 47.48 Pa, y 45.90 Pa, que corresponden a la presión en la boca de las derivaciones en los puntos (I), (II) y (III), respectivamente. De esta presión, parte se consume en rozamiento y parte en atravesar la rejilla o el difusor, como lo expresa la ecuación 6.14, donde $\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{derivación}$ representa la caída de presión unitaria en la derivación, expresada en Pa, $P_{entrada}$ es la presión en la entrada de la derivación, $P_{difusor}$ corresponde a la presión en el difusor, y $LTE_{derivación}$ es la longitud total equivalente de la derivación.

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{derivación} = \frac{P_{entrada} - P_{difusor}}{LTE_{derivación}} \quad (6.14)$$

Debido a que el tramo principal (III-IV) es parte del tramo principal, el cálculo de las derivaciones presentadas en este tramo tiene en cuenta la caída de presión lineal que corresponde a la del conducto principal, esto es, 0.46 Pa/m. Para las demás derivaciones es necesario calcular la caída de presión lineal en cada derivación. Se encuentra la caída de presión lineal de 0.48 Pa/m, 0.48 Pa/m y 0.46 Pa/m, para las derivaciones (II-VI), (II-VII) y (III-V), respectivamente.

Una vez conocida la caída de presión lineal en cada derivación, se procede a calcular las dimensiones de cada derivación, como se describe en la siguiente sección.

6.4.6. Dimensiones de las derivaciones y subderivaciones

El tramo principal (III-IV) presenta 12 derivaciones (ver Fig. 6.9 de la sección 6.4). Las derivaciones (II-VI), (II-VII) y (III-V), presentan subderivaciones como se mostró en la Fig. 6.9. El diseño de las derivaciones se realiza usando el método de caída de presión lineal constante en el tramo. Se sigue el mismo procedimiento descrito en el apartado 6.4.4. La longitud de cada tramo de las derivaciones de la primera planta y la planta baja se presentaron en el inciso 6.4.1 del presente Capítulo.

Se calculan las velocidades en cada una de las subderivaciones. Se observa si las velocidades calculadas en cada uno de los tramos son superiores a la máxima establecida en el tramo inicial (I-II) del conducto principal, que corresponde a la velocidad del aire en la salida del ventilador, esto es, 7.0 m/s. Si este es el caso, es necesario ajustar dichas velocidades. Esta situación se debe al método de cálculo elegido, de la caída de presión lineal constante en el tramo. Dicho método requiere equilibrar el sistema.

El equilibrado del sistema se realiza mediante el uso de compuertas que permiten ajustar las velocidades. El procedimiento seguido para los tramos que presenten velocidades superiores a la máxima establecida es el siguiente: se asigna como velocidad la máxima

establecida. Se calculan las dimensiones ajustadas en la derivación, conociendo el caudal y la nueva velocidad. Posteriormente, se calcula la caída de presión lineal en el tramo de la derivación. Una vez conocidos estos valores, se calcula la caída de presión total en el tramo de la derivación. Finalmente, se calcula la caída de presión adicional que corresponde a la caída de presión que proporcionará la compuerta, aplicando la ecuación 6.15. Se encontraron velocidades superiores a la establecida, de 7.0 m/s, en algunos tramos de la red de conductos, por lo que tuvo que equilibrarse el sistema con el uso de compuertas que suministren la caída de presión adicional, como se resume en la Tabla 6.26.

$$\Delta P_{compuerta} = P_{(entrada,derivación)} - \Delta P_{(total,derivación)} \quad (6.15)$$

Tabla 6.26: Compuertas requeridas por el sistema de conductos del edificio Aulario.

| Tramo | $\Delta P_{compuerta}$ |
|-----------------|------------------------|
| | (Pa) |
| a2=f12 | 28.50 |
| b3=b4=g13=g14 | 25.50 |
| c5=c6=h15=h16 | 22.99 |
| q32=k21 | 28.29 |
| r33=l22 | 25.67 |
| s35=s36=m24=m25 | 24.80 |
| t37=t38=n26=n27 | 22.40 |

Las características de la derivación (II-VI) y sus subderivaciones son iguales a la derivación (II-VII) y sus derivaciones, como se observa en la Tabla 6.27, al igual que las características de la derivación (III-V) y sus subderivaciones son iguales a las características del tramo principal (III-IV), que se resumen en la Tabla 6.28.

Tabla 6.27: Características de la derivación (II-VI) y sus subderivaciones. Igual a la derivación (II-VII).

| Tramo | LTE | Caudal | H | De | Velocidad |
|---|------|---------------------|-------|-------|-----------|
| | (m) | (m ³ /s) | (m) | (m) | (m/s) |
| (II-a)=(II-f) | 23.6 | 1.505 | 0.515 | 0.563 | 5.06 |
| (a-b)=(f-g) | 8.6 | 1.378 | 0.497 | 0.455 | 5.58 |
| (b-c)=(g-h) | 5.2 | 1.037 | 0.442 | 0.405 | 5.30 |
| (c-d)=(h-i) | 11.5 | 0.697 | 0.376 | 0.374 | 4.17 |
| (d-e)=(i-j) | 5.2 | 0.356 | 0.285 | 0.261 | 4.37 |
| (e-VI)=(j-VII) | 3.5 | 0.015 | 0.078 | 0.071 | 2.47 |
| (a1)=(f11) | 3.5 | 0.015 | 0.047 | 0.051 | 6.92 |
| (a2)=(f12) | 3.5 | 0.112 | 0.126 | 0.138 | 7.00 |
| (b3)=(b4)=(g13)=(g13)=(c5)=(c6)=(h15)=(h16) | 3.5 | 0.170 | 0.156 | 0.171 | 7.00 |
| (d7)=(d8)=(i17)=(i18) | 3.5 | 0.170 | 0.172 | 0.188 | 5.79 |
| (e9)=(e10)=(j19)=(j20) | 3.5 | 0.170 | 0.211 | 0.231 | 3.83 |

Tabla 6.28: Características de tramo principal (III-IV) y sus derivaciones. Igual a la derivación (III-V).

| Tramo | LTE | Caudal | H | De | Velocidad |
|---|------|---------------------|-------|-------|-----------|
| | (m) | (m ³ /s) | (m) | (m) | (m/s) |
| (III-k)=(III-q) | 17.3 | 1.516 | 0.523 | 0.572 | 5.53 |
| (k-l)=(q-r) | 6.3 | 1.457 | 0.515 | 0.563 | 5.49 |
| (l-m)=(r-s) | 8.6 | 1.378 | 0.503 | 0.550 | 5.44 |
| (m-n)=(s-t) | 5.2 | 1.037 | 0.448 | 0.490 | 5.17 |
| (n-o)=(t-u) | 11.5 | 0.697 | 0.381 | 0.416 | 4.81 |
| (o-p)=(u-v) | 5.2 | 0.356 | 0.289 | 0.316 | 4.26 |
| (p-IV)=(v-V) | 3.5 | 0.015 | 0.079 | 0.086 | 2.41 |
| (k21)=(q32) | 3.5 | 0.059 | 0.092 | 0.101 | 7.00 |
| (l22)=(r33) | 3.5 | 0.064 | 0.095 | 0.104 | 7.00 |
| (l23)=(r34) | 3.5 | 0.015 | 0.047 | 0.052 | 6.74 |
| (m24)=(m25)=(s35)=(s36)=(n26)=(n27)=(t37)=(t38) | 3.5 | 0.170 | 0.156 | 0.171 | 7.00 |
| (o28)=(o29)=(u39)=(u40) | 3.5 | 0.170 | 0.174 | 0.190 | 5.64 |
| (p30)=(p31)=(v41)=(v42) | 3.5 | 0.170 | 0.214 | 0.234 | 3.73 |

6.4.6.1. Elección de los conductos del edificio Aulario

Con base en los cálculos realizados en el diseño de los conductos del edificio, desarrollados en el presente capítulo, donde se calcularon las dimensiones de cada tramo del conducto de distribución de aire, se procede al cálculo del peso total. Se buscan conductos dentro de los ofertados en el mercado. Se elige el conducto que proporcione mejores prestaciones y que proporcione en los manuales técnicos las características del conducto. Los conductos Marca Climaver del fabricante Isover, fabricados en chapa galvanizada, tienen una densidad aproximada de 75 kg/m^3 , lo que facilita la manipulación y contribuye a la seguridad durante la instalación, comparados con otros conductos con mayores densidades. Las características de los conductos Climaver se describen en la Tabla 6.29. Posteriormente se evalúa el peso de los conductos del edificio, encontrando un peso total de 1004 kg, resumidos en la Tabla 6.30.

Tabla 6.29: Conductos Climaver. Características.

| Densidad | Espesor | Longitud |
|---------------------|---------|----------|
| (kg/m^3) | (m) | (m) |
| 75 | 0.223 | 1 |

Tabla 6.30: Conductos del edificio Aulario. Características.

| Marca | Climaver |
|--------------------|--------------|
| Tramo | Peso |
| | (kg) |
| (I-II) | 14.4 |
| (II-III) | 27.9 |
| (II-VI) = (II-VII) | 212.0 |
| (III-IV) = (III-V) | 206.9 |
| Total | 880.1 |

6.5. Apéndice 2. Dimensionamiento de la unidad de tratamiento de aire

Para dimensionar la unidad de tratamiento de aire, se tiene en cuenta, entre otros, el caudal de ventilación requerido, y la potencia total requerida. Del análisis realizado en las secciones anteriores, se conocen los valores que por normativa deben cumplirse a la hora de dimensionar una unidad de tratamiento de aire en la ciudad de Valladolid, y que se resumen a continuación:

- Calidad de aire interior: IDA2 (ver sección 6.2.1)
- Calidad de aire exterior: ODA1. (ver sección 6.2.2)
- Clase de filtración: F8 (ver sección 6.2.3)
- Aire de extracción: No se requiere extraer aire. (ver sección 6.2.4)
- Requerimiento de recuperación de calor: No se requiere recuperar calor. (ver sección 6.2.5)
- Condiciones interiores: Temperatura operativa en invierno 21°C y humedad relativa 50 %. (ver sección 6.2.6)
- Caudal de ventilación por unidad de superficie para aulas con calidad de aire categoría C: 2.4 l/s.m². Caudal de ventilación en aseos: 15 l/s.local (ver sección 6.4.2)
- Caudal de ventilación total requerido: 6.042 m³/s (ver sección 6.4.2)

Características del aire exterior

Para conocer la potencia máxima que debe tener la unidad de tratamiento de aire, es necesario saber la potencia sensible y latente que debe cubrir, de acuerdo con las características del aire exterior y del aire interior. La ciudad de Valladolid se encuentra a 735 m sobre el nivel del mar, con latitud 41°39'00" y longitud 04°46'00"W. Con base en las condiciones climáticas de la ciudad, se encuentra la temperatura de diseño de -7.1°C. Las características del aire exterior se obtienen del diagrama psicrométrico.

- $w = 0.00184 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{AS}}$
- $\nu = 0.7558 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{AS}}$
- $h = -2.57 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{AS}}$

Corrección del caudal exterior en función de la temperatura

Según se explicó en el apartado 6.4.2, el caudal en condiciones standar de ventilación requerido es de 6.042 m³/s. Se corrige el caudal del aire exterior en función de la temperatura aplicando la ley de conservación de la masa, como se muestra en las ecuaciones 6.16 y 6.17.

$$\dot{m}_m = \dot{m}_s \quad (6.16)$$

$$\rho_m \cdot \dot{V}_m = \rho_s \cdot \dot{V}_s \quad (6.17)$$

Donde, \dot{m}_m y \dot{m}_s representan el flujo másico del aire a la temperatura de diseño T_m , (-7.1 °C) y a la temperatura estándar T_s (25 °C), respectivamente. ρ_m y ρ_s representan la densidad del aire a la temperatura medida y a la temperatura estándar, respectivamente. \dot{V}_m y \dot{V}_s son el caudal volumétrico del aire a la temperatura medida y a la temperatura estándar, respectivamente.

Con base en la ley de los gases ideales, $\rho=P/RT$, se obtiene la ecuación 6.18, con la que se encuentra el caudal corregido, de 5.39 m³/s. El caudal másico se calcula aplicando la ecuación 6.19, donde \dot{m} es el caudal másico en kg/s y ν representa el volumen específico del aire en m³/kg_{AS}. Se encuentran 6.38 kg/s de aire de ventilación.

$$\dot{V}_m = \dot{V}_s \frac{T_m}{T_s} \quad (6.18)$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}_m}{\nu} \quad (6.19)$$

Características del aire que sale de la UTA

Siguiendo los criterios exigidos por normativa, el aire dentro de los recintos del edificio se encuentra a una temperatura de 21°C y humedad relativa de 50 %, según se explicó en la sección 6.2.6. Con estos datos se leen del diagrama psicrométrico, para la localidad de Valladolid, las demás características del aire que sale de la UTA, como se detallan a continuación.

- $w=0.00773$ kg_{agua}/kg_{AS}
- $\nu =0.8435$ m³/kg_{AS}
- $h=40.76$ kJ/kg_{AS}

Potencia sensible

Para llevar las condiciones del caudal de aire exterior a las condiciones del aire de impulsión a los recintos del edificio, es necesario un proceso de calentamiento y deshumidificación, que se realizará en la unidad de tratamiento de aire (UTA), por tanto, la UTA debe cubrir la carga sensible y latente del aire de ventilación. La potencia sensible requerida es consecuencia de la diferencia de temperatura del aire, y se calcula usando la ecuación 6.20 siendo \dot{Q}_s la potencia sensible, \dot{m} el flujo másico, C_p la capacidad específica del aire y ΔT la diferencia de la temperatura (para el caso de estudio, se realiza un proceso de calentamiento del aire desde -7.1 °C hasta 21 °C). Se encuentra la potencia sensible máxima aproximada de 181 kW.

$$\dot{Q}_s = \dot{m}C_p(\Delta T) \quad (6.20)$$

Potencia latente

La carga latente máxima es consecuencia del cambio de entalpías del aire, debido al cambio de humedades. Para el caso de estudio, se presenta un proceso de humidificación, donde el aire aumenta la humedad desde $0.00184 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{AS}}$ hasta $0.00773 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{AS}}$. Se calcula la potencia latente máxima usando la ecuación 6.21, donde \dot{Q}_l representa la potencia latente y Δh es la diferencia entre la entalpía del aire exterior y la entalpía del aire dentro de los recintos del edificio. Se encuentra la potencia latente máxima aproximada de 92 kW, para un total de aproximadamente 273 kW de potencia máxima total. El diagrama psicrométrico de la Fig. 6.11 muestra las características del aire de ventilación del edificio estudiado.

$$\dot{Q}_l = \dot{m} (\Delta h) \quad (6.21)$$

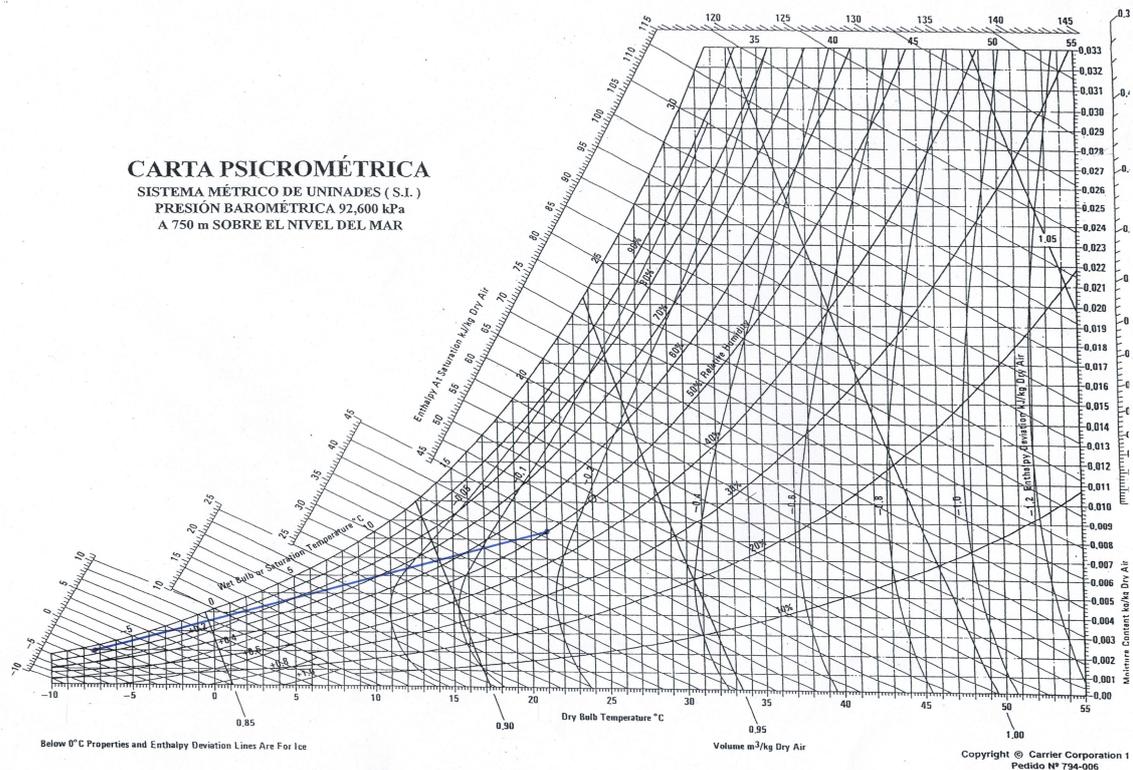


Figura 6.11: Esquema del proceso de tratamiento del aire de ventilación del edificio Aulario.

6.5.1. Elección de la unidad de tratamiento de aire

Se elige la unidad de tratamiento de aire, teniendo en cuenta el caudal de aire requerido de $6.042 \text{ m}^3/\text{s}$ y la potencia máxima total de 273 kW. Se busca en el mercado y se elige un fabricante que proporciona, además de los datos técnicos, información sobre los materiales de construcción del equipo. Se encuentra la UTA DV-Danvent, Modelo 150, con caudal de aire máximo de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, con peso de 3990 kg, fabricada en alu-zinc AZ 186, aluminio fundido, chapa y lana mineral. El manual técnico describe los materiales que forman el equipo, pero no detalla la cantidad de cada uno de ellos, por tanto, se suponen las siguientes proporciones: marcos, 83 % de alu-zinc AZ 186; esquinas, 5 % de aluminio fundido; paneles, 5 % de chapa; protección anticorrosión, 2 % de alu-zinc AZ 186; y aislamiento sonoro y térmico, 5 % de lana mineral. En la Fig. 6.12 se muestra la unidad de tratamiento de aire elegida.



Figura 6.12: Unidad de tratamiento de aire. Marca DV Danvent.

6.5.2. Elección de difusores y compuertas

Con base en los cálculos sobre el diseño de los conductos se encuentra que se requieren 46 difusores que proporcionen 2 mmca. Se buscan los difusores dentro de los ofertados en el mercado. Se elige un fabricante que proporciona en los manuales técnicos las características de ingeniería, incluyendo materiales usados en su fabricación y el peso. Se encuentran los difusores del fabricante Innesa, marca SFRA-C, modelo SFR, fabricados en aluminio, con peso aproximado de 1 kg, mostrados en la Fig. 6.13.

La red de conductos requiere compuertas para realizar el equilibrado del sistema. Se elige la compuerta del fabricante Innesa, marca CBAD, fabricada en lámina de acero galvanizado calibre 14, mostrada en la Fig. 6.14, cuya curva característica se muestra en la Fig. 6.15. El manual técnico no especifica el peso, por lo que se realiza un cálculo aproximado con base en las dimensiones de la compuerta y el calibre del acero galvanizado. Se encuentra un peso aproximado de 12.5 kg por compuerta, con lo que para 22 compuertas el peso total es de 274.4 kg.

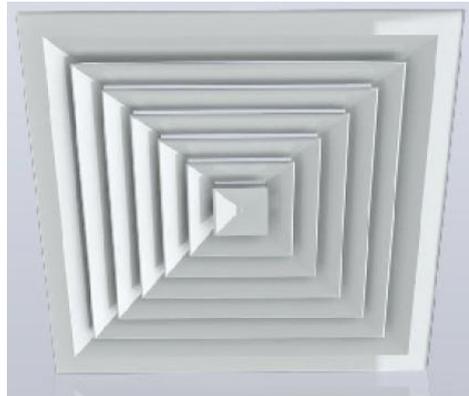


Figura 6.13: Difusores de aire. Marca Innesa.

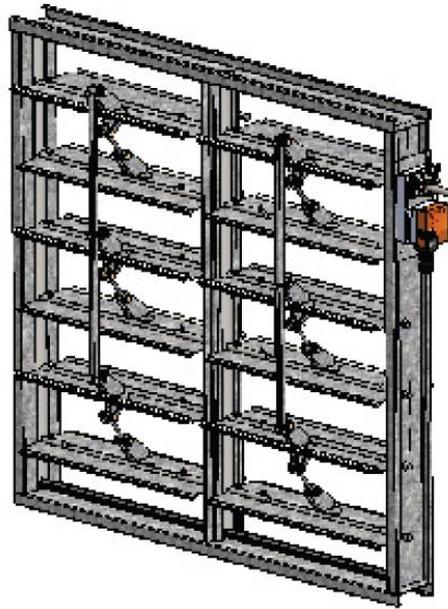


Figura 6.14: Compuerta Innesa CBAD.

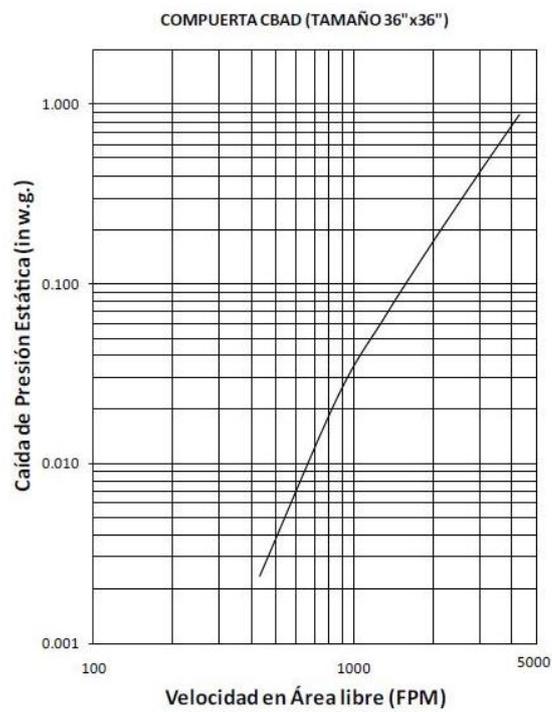


Figura 6.15: Curva característica de la compuerta Innesa CBAD.

CAPÍTULO 7

Mejoras con Energía Solar para Ventilación

RESUMEN: En el presente Capítulo se realiza el ACV de dos sistemas de ventilación: con ventilador solar y con colector térmico de aire, proporcionando el aire de ventilación de $6.042 \text{ m}^3/\text{s}$ requerido por el edificio Aulario de la Universidad de Valladolid según normativa. Para el análisis de ciclo de vida de los sistemas de ventilación, se calcula el desempeño energético en la fase de uso. Ello requiere caracterizar los sistemas, esto es, cantidad y tipo de materiales requeridos por los equipos de los sistemas y la disposición final de dichos materiales. Finalmente, se evalúa el desempeño energético y ambiental de los sistemas.

7.1. Sistemas de ventilación con ventilador solar

Se supondrá que la ventilación requerida por el edificio Aulario de $6.042 \text{ m}^3/\text{s}$, es proporcionada por ventiladores solares, con las características descritas a continuación.

Para definir el sistema de ventilación con ventilador solar, se establecen los equipos que requiere el sistema, en este caso: los ventiladores solares, la unidad de tratamiento de aire, los conductos de aire, los difusores de aire y las compuertas, como se muestra en el esquema de la Fig. 7.1. El dimensionamiento de la UTA, el diseño de los conductos y la elección de los difusores y compuertas se describió en los apéndices 1 y 2 del Capítulo 6 (ver 6.4 y).

Posteriormente, se dimensiona el sistema, lo que requiere calcular el número de ventiladores solares necesarios para proporcionar el aire de ventilación del caso de estudio. Ello va a depender de las características de los equipos ofertados en el mercado. En la siguiente sección se presentan algunas de las características de esta tecnología.

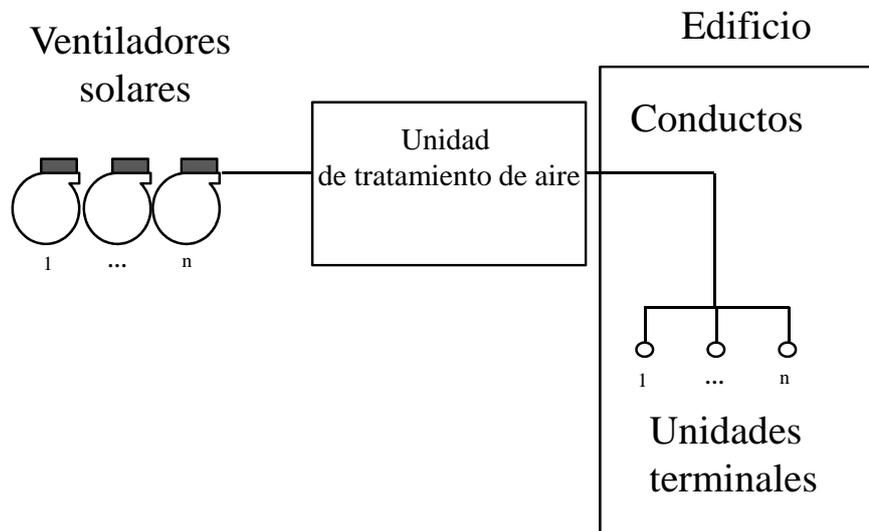


Figura 7.1: Esquema del sistema de ventilación con ventilador solar.

7.1.1. Ventilador solar. Características

La tecnología de los ventiladores solares compactos permite la aireación solar de alta potencia para grandes estancias y naves industriales, entre otras. Los equipos tienen incorporados células solares fotovoltaicas para generar la energía requerida para el funcionamiento del ventilador que proporciona el aire a la estancia. El panel fotovoltaico está fabricado en silicio policristalino. La ventilador solar no consume energía, debido a que produce la electricidad requerida para el funcionamiento del ventilador, a través de las placas de silicio monocristalino incorporadas.

Se elige, dentro de los ventiladores solares fotovoltaicos ofertados en el mercado, el ventilador solar compacto, modelo 1560, con caudales de ventilación hasta $0.433 \text{ m}^3/\text{s}$ y peso de 9.7 kg , mostrado en la Fig. 7.2. Algunas de sus características se describen en la Tabla 7.1. El equipo está fabricado en hierro y silicio. No se detalla el porcentaje de cada uno de ellos pero se estima próximo al 93 % de hierro y 7 % de silicio monocristalino. Se asumen estos porcentajes con base en la proporción de silicio en el colector térmico TwinSolar 4.0 (Grammer, 2009).



Figura 7.2: Ventilador solar compacto.

Tabla 7.1: Características del ventilador solar compacto.

| Modelo | Caudal | Materiales | Peso |
|--------|---------------------------|------------------------|------|
| | (m^3/s) | | (kg) |
| C-0711 | 0.433 | Hierro | 9.0 |
| | | Silicio policristalino | 0.7 |

7.1.2. Sistema de ventilación con ventilador solar. Dimensionamiento

Para suministrar el aire de ventilación requerido por el caso de estudio, se necesitan 12 ventiladores solares. Las características del sistema de ventilación con ventilador solar incluyen equipos requeridos y tipo y cantidad de materiales usados. La unidad de tratamiento de aire y los ventiladores solares representan el 60.36 % y el 16.47 % del peso total del sistema. Los detalles de las características del sistema se resumen en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2: Características del sistema de ventilación con ventilador solar.

| Equipo | Peso | Material | Peso | Cantidad requerida | Peso total | Proporción en Peso |
|------------------|---------|---------------------------|---------|-----------------------|----------------|-----------------------|
| | (kg) | | (kg) | | (Unidades) | |
| Ventilador solar | 135.80 | Hierro | 114.71 | 12 | 1376.46 | 21.47 |
| | | Silicio Policristalino | 3.55 | | 42.57 | |
| UTA | 3990.00 | Alu-zinc AZ186 | 3511.20 | 1 | 3511.20 | 60.36 |
| | | Aluminio | 199.50 | | 199.50 | |
| | | Chapa | 199.50 | | 199.50 | |
| | | Lana mineral | 79.80 | | 79.80 | |
| Conductos | 880.10 | Chapa galvanizada | 880.10 | 1 | 880.10 | 13.31 |
| Difusores | 1.00 | Aluminio | 1.00 | 46 | 46.00 | 0.70 |
| Compuertas | 12.50 | Chapa | 12.50 | 22 | 275.00 | 4.16 |
| Total | | | | | 6610.14 | 100.00 |

7.1.3. Desempeño energético del sistema de ventilación con ventilador solar

El desempeño energético del sistema de ventilación con ventilador solar muestra que el sistema produce la energía requida para el funcionamiento de los ventiladores y consume energía para operar la unidad de tratamiento de aire. El sistema tiene un requerimiento energético total de 320454.98 kWh/año. Suponiendo 25 años de operación, el sistema requiere 8011374.48 kWh de energía final, de los cuales, produce 4242.48 kWh para el funcionamiento del ventilador y consume 8007132 kWh para el tratamiento del aire (calentamiento y deshumidificación). Usando el factor de conversión para electricidad de origen 100 % renovable, de 0.326 kWh E.primaria/kWh E.final (IDAE, 2014), se encuentra que el sistema produce 1383.05 kWh de energía primaria y consume 2610325.03 kWh de energía primaria. En la Tabla 7.3, se resumen las características del sistema, donde aparecen la cantidad de energía y los sistemas que consumen y/o producen energía.

Tabla 7.3: Desempeño energético del sistema de ventilación con ventilador solar. Consumo y producción de energía. Fase de uso.

| Proceso | Requerimiento energético | Consumo energía final | Consumo energía primaria | Producción energía final | Producción energía primaria |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| | (kWh/año) | (KWh) | (KWh) | (KWh) | (kWh) |
| Operación del ventilador | 169.70 | 4242.48 | 1383.05 | 0 | 0 |
| Tratamiento del aire | 320454.98 | 0 | 0 | 8007132.00 | 2610325.03 |
| Total | 320454.98 | 4242.48 | 1383.05 | 8007132.00 | 2610325.03 |

7.1.4. Desempeño ambiental del sistema de ventilación con ventilador solar

Para conocer el desempeño ambiental del sistema de ventilación con ventiladores solares fotovoltaicos, se estudian los impactos ambientales ocasionados durante la fase de uso del sistema y los ocasionados por los materiales requeridos por los equipos que forman el sistema y su disposición final una vez retirados del edificio.

En la fase de uso, se supone un periodo de operación del sistema de 25 años (Alsema, 2003).

En la fase de disposición final, se calcula la cantidad de materiales que se reciclan y la energía requerida en dicho proceso, con base en la información reportada en la literatura, resumida en las Tablas 7.4 y 7.5. El porcentaje reciclado, se supone recibe un tratamiento similar al que se realiza en Francia. El porcentaje no reciclado, se supone que va a vertedero.

En las siguientes secciones se presentan los resultados de los impactos ambientales del sistema.

Tabla 7.4: Escenario de reciclaje en España de los materiales que requieren los equipos del sistema de ventilación con ventilador solar.

| Material | Reciclaje | Referencia |
|------------------------|-----------|----------------|
| | (%) | |
| Acero, chapa | 75.0 | (Unesid, 2013) |
| Alu-zinc | 40.5 | (Arpal, 2012) |
| Aluminio | 40.5 | (Arpal, 2012) |
| Hierro | 75.0 | (Unesid, 2013) |
| Silicio policristalino | 77.0 | (VSOrg, 2010) |

Tabla 7.5: Requerimiento energético para el reciclaje de los materiales que requieren los equipos del sistema de ventilación con ventilador solar.

| Material | Energía requerida en el reciclaje | Referencia |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| | (MJ/kg) | |
| Acero, chapa | 4.30 | (Yellishetty M., 2011) |
| Alu-zinc | 0.44 | (Rabah y El-Sayed, 1995) |
| Aluminio | 0.075 | (Quinkertz et al., 2001) |
| Hierro | 4.30 | (Yellishetty M., 2011) |
| Silicio policristalino | 46.08 | (N.C. y J.M, 2010) |

7.1.4.1. Impactos ambientales del sistema de ventilación con ventilador solar. Fase de uso

El uso del sistema de ventilación con ventiladores solares ocasiona impactos ambientales debido al consumo de energía, como se aprecia en la Fig. 7.3. La producción de electricidad para el funcionamiento del ventilador, evita impactos ambientales sobre la capacidad de crecimiento de madera y sobre la producción de pescado y carne. Este aporte es pequeño comparado con los daños totales ocasionados por el consumo de energía del sistema.

Las categorías de daños más afectadas son: el agotamiento de reservas, con un 66.77 %; la esperanza de vida, con un 22.74 %; y la morbilidad severa, con un 8.05 % de los impactos totales del sistema en la fase de uso.

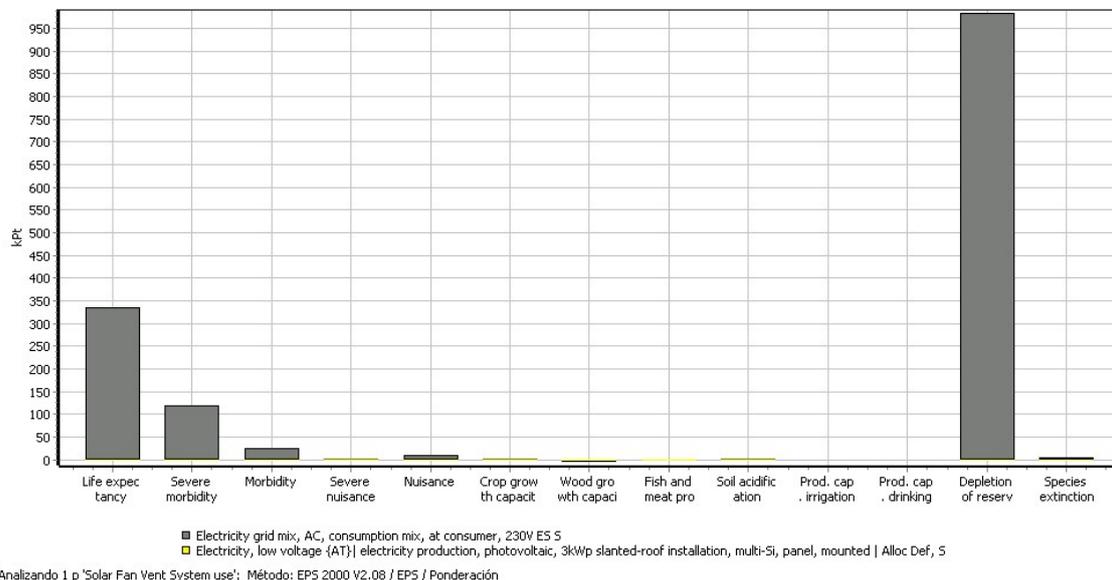


Figura 7.3: Impactos ambientales del ciclo de vida del sistema de ventilación con ventiladores solares. Fase de uso. Ponderación. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

7.1.4.2. Impactos ambientales. Materiales usados y su disposición final. Sistema de ventilación con ventilador solar

Se encuentra que en España se recicla el 50.63 % de los materiales del sistema de ventilación con ventiladores solares, con base en la Tabla 7.4. El 49.37% restante se supone va a vertedero. El sistema consume 12400.43 MJ de energía en el proceso de reciclaje de los materiales. Este valor ha sido obtenido usando las referencias de la Tabla 7.5.

El sistema requiere 119.17 tkm (toneladas kilómetro) para su transporte hasta la planta de reciclaje, BIOTRAN, ubicada en Tudela de Duero, Valladolid (Biotran, 1998).

Los resultados de la evaluación de impactos de los equipos usados por el sistema de ventilación con ventiladores solares muestra que los conductos, la unidad de tratamiento de aire y las compuertas causan los mayores impactos ambientales, como se aprecia en la Fig. 7.4. El hierro y la fibra de vidrio usados por la unidad de tratamiento de aire producen los mayores daños (ver Fig. 7.5).

Los resultados del análisis de la disposición final del sistema reflejan que el reciclaje del sistema evita daños en la mayoría de las categorías, como se aprecia en la Fig. 7.6. Las categorías de daños más beneficiadas son: el agotamiento de reservas, la esperanza de vida y la morbilidad severa. El reciclaje de los materiales del sistema evita pagar, en estas categorías, 1235.09 ELUs, 307.66 ELUs y 28.16 ELUs. Los mayores impactos son sobre el agotamiento de reservas, debiendo pagar 10079.15 ELUs para restaurar los daños causados sobre esta categoría. La principal contribución sobre este daño se debe al tratamiento de residuos del escenario francés supuesto, seguido de la energía requerida para el proceso de reciclaje.

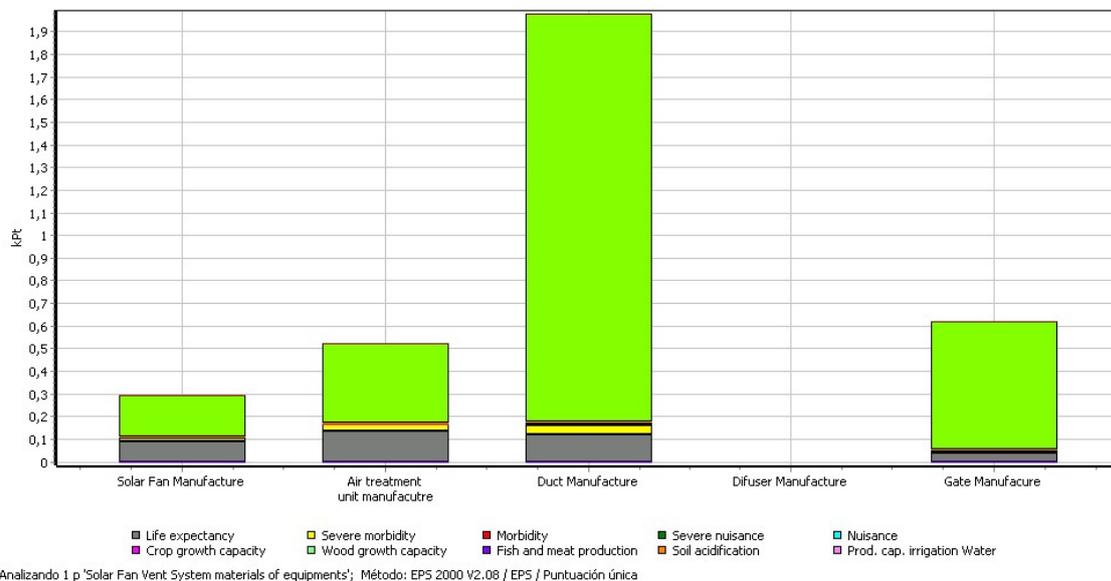


Figura 7.4: Impactos ambientales de los equipos usados por el sistema de ventilación con ventiladores solares. Puntuación única. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

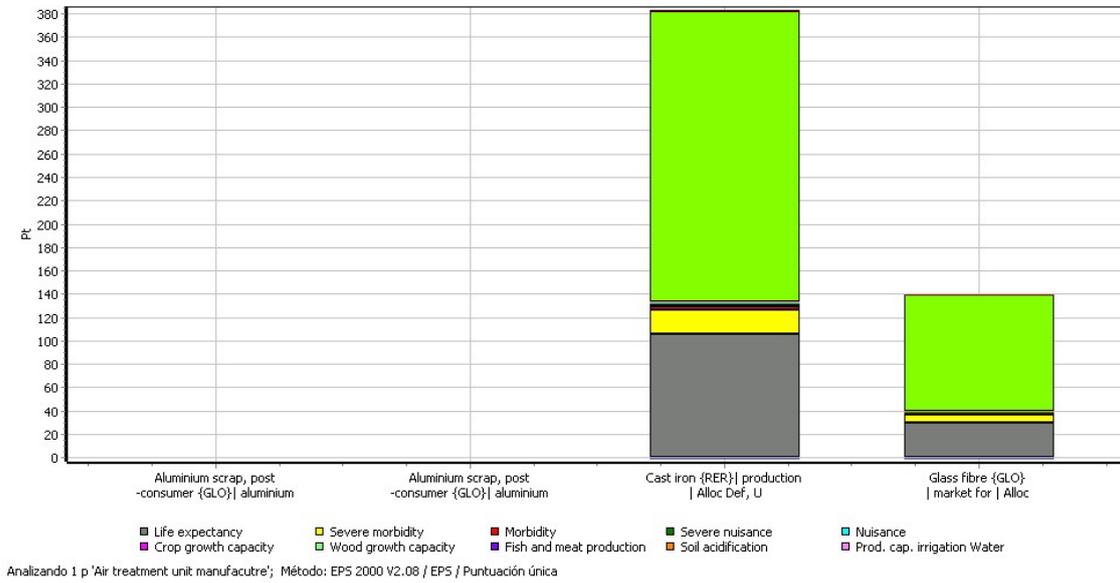


Figura 7.5: Impactos ambientales de la unidad de tratamiento de aire. Puntuación única. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

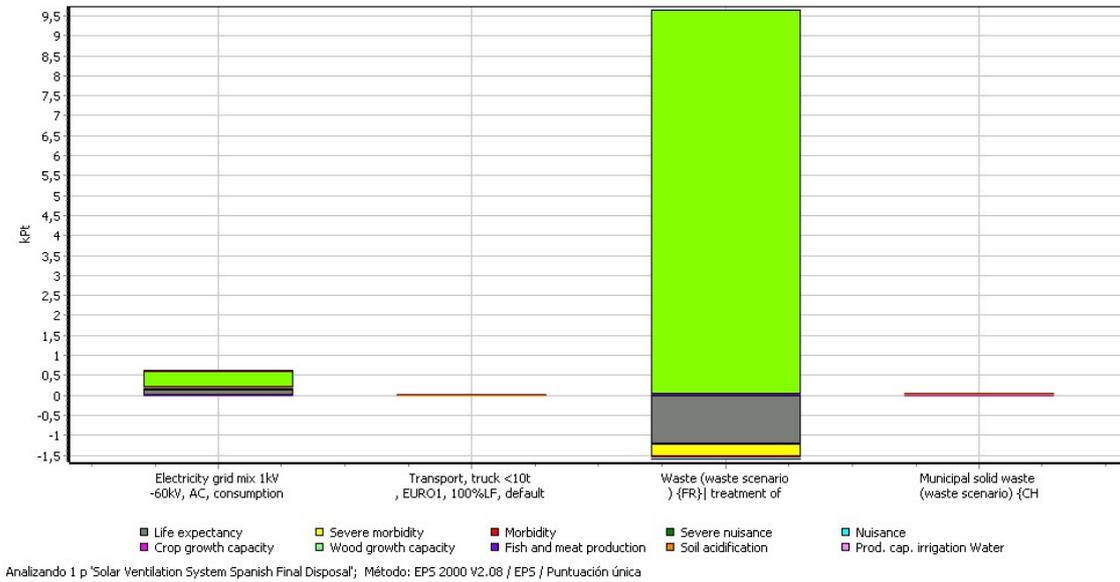


Figura 7.6: Impactos ambientales del sistema de ventilación con ventiladores solares. Fase de disposición final. Puntuación única. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

7.1.4.3. Impactos ambientales del sistema de ventilación con ventilador solar. Ciclo de vida

Durante el ciclo de vida del sistema de ventilación con ventiladores solares, se encuentra que la fase de uso es la de mayor contribución sobre el total de los impactos ambientales, debido al consumo de energía. El uso del sistema debe pagar, entre otros, para restaurar los daños ocasionados: sobre el agotamiento de reservas, 982842.85 ELUs, sobre la expectativa de vida, 334722.58 ELUs y sobre la morbilidad severa, 118557.89 ELUs.

Los materiales usados por los equipos del sistema ocasionan los principales impactos sobre las mismas categorías de daño que la fase de uso (agotamiento de reservas, expectativa de vida y morbilidad severa), debiendo pagar para restaurar los daños ocasionados, 2892.34 ELUs, 379.12 ELUs y 100.69 ELUs, respectivamente.

La disposición final del sistema evita daños ambientales, principalmente en la esperanza de vida y en la morbilidad severa evitando pagar 1080.45 ELUs, 253.24 ELUs, respectivamente.

Los mayores costes ambientales se producen sobre el agotamiento de reservas y sobre la expectativa de vida, con 994711.17 ELUs y 333958.92 ELUs, respectivamente. Los detalles de los impactos ambientales en todas las categorías de daño se presentan en la Tabla 7.6.

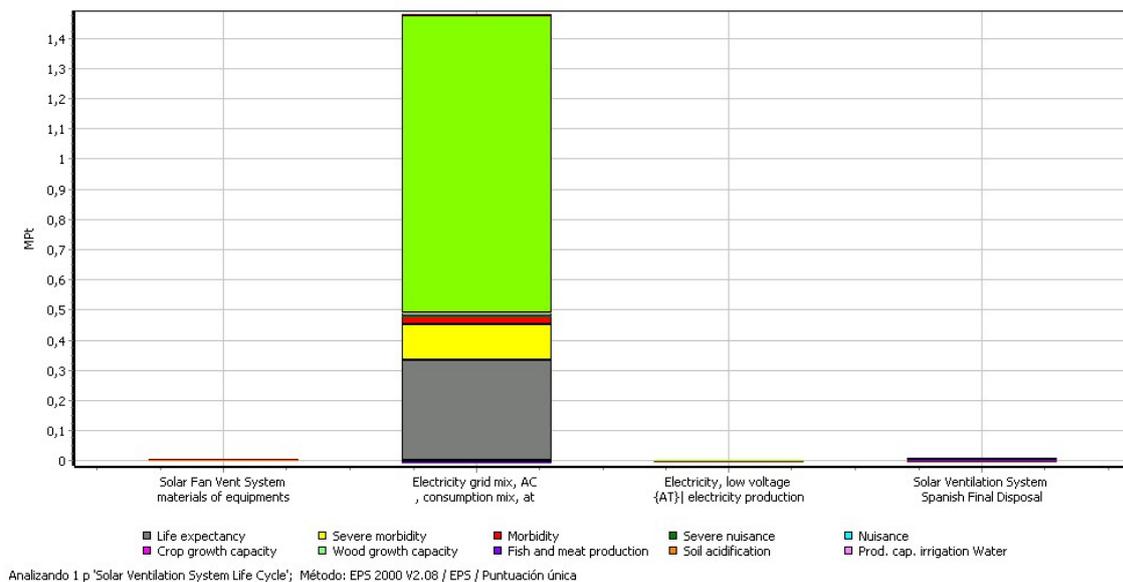


Figura 7.7: Impactos ambientales del sistema de ventilación con ventiladores solares. Ciclo de Vida. Puntuación única. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

Tabla 7.6: Impactos ambientales del ciclo de vida del sistema de ventilación con ventiladores solares. Evaluación del daño. Datos calculados usando el *software* SimaPro8.

| Categoría de daño | Unidad | Total | Materiales | Uso | | Disposición final |
|---|--------|------------|------------|-----------------|--------------------|-------------------|
| | | | | Consumo energía | Producción energía | |
| Esperanza de vida | ELU | 333958.92 | 379.12 | 334722.58 | -62.33 | -1080.45 |
| Morbilidad severa | ELU | 118391.63 | 100.69 | 118557.89 | -13.72 | -253.24 |
| Morbilidad | ELU | 25058.17 | 18.07 | 25059.25 | -2.45 | -0.26 |
| Molestia severa | ELU | 1121.12 | 11.23 | 1117.78 | -7.63 | -0.26 |
| Molestia | ELU | 9644.06 | 6.40 | 9654.12 | -1.57 | -14.89 |
| Capacidad de crecimiento de maíz | ELU | 1477.18 | 0.89 | 1477.30 | -0.15 | -0.89 |
| Capacidad de crecimiento de madera | ELU | -6214.18 | -4.46 | -6214.20 | 0.59 | 3.89 |
| Producción de pescado y carne | ELU | -225.58 | -0.15 | -225.68 | 0.04 | 0.21 |
| Acidificación del suelo | ELU | 263.52 | 0.16 | 263.76 | -0.04 | -0.36 |
| Capacidad de producción de agua para irrigación | ELU | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Capacidad de producción de agua potable | ELU | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Agotamiento de reservas | ELU | 994711.17 | 2892.34 | 982842.85 | -1103.17 | 10079.15 |
| Extinción de especies | ELU | 4670.03 | 3.83 | 4669.95 | -0.60 | -3.14 |
| Total | ELU | 1482856.04 | 3408.14 | 1471925.60 | -1191.04 | 8713.34 |

7.2. Sistema de ventilación con colector solar de aire

Se supone que la ventilación requerida por el edificio Aulario es proporcionada por colectores solares de aire, con las características descritas a continuación.

Para definir el sistema de ventilación con colector solar de aire, se establecen los equipos que constan el sistema. Para este caso, este tipo de instalaciones inyectan el aire directamente al edificio por lo que solo se requieren los colectores solar, conductos de aire, difusores de aire y compuertas, como se muestra en el esquema de la Fig. 7.8.

El diseño de los conductos y la elección de los difusores y compuertas se describió en los apéndices 1 y 2 del Capítulo 6. Posteriormente, se dimensiona el sistema, lo que requiere calcular en número de colectores solares necesarios para proporcionar el aire de ventilación del caso de estudio. Ello va a depender de las características de los equipos ofertados en el mercado. En la siguiente sección se presentan algunas de sus características.

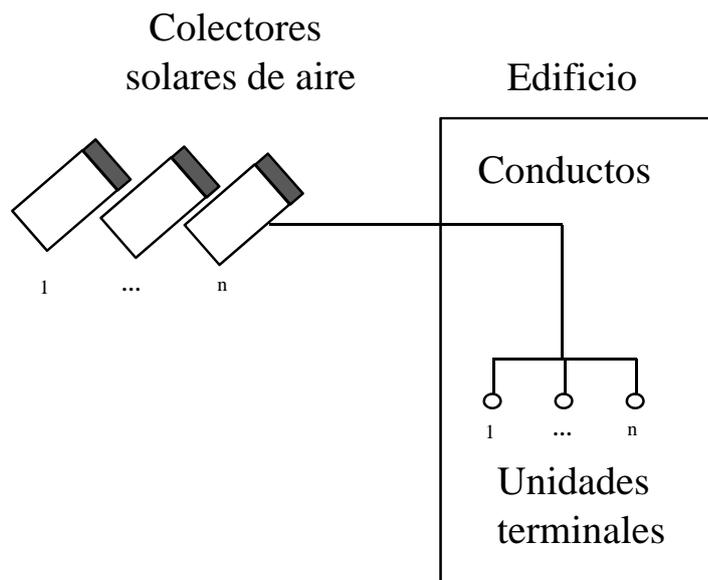


Figura 7.8: Esquema del sistema de ventilación con colector solar de aire.

7.2.1. Colector solar de aire. Características

Por su sencillez y madurez técnica, la energía solar térmica es una pieza clave dentro del desarrollo de las energías renovables y contribuye por tanto a un modelo sostenible de abastecimiento energético, que pretende reducir el impacto ambiental que supone el uso de la energía y favorecer a la independencia energética de los países.

La energía solar térmica ha tenido un gran impulso gracias a la entrada en vigor del CTE. Se cuenta con diferentes tecnologías como los captadores planos y de tubos de vacío, en aplicaciones tales como el agua caliente sanitaria (ACS) y en calefacción o refrigeración. Es importante utilizar la tecnología apropiada para cada aplicación.

La energía solar térmica es una tecnología simple y muy eficaz: la idea básica que rige su funcionamiento consiste en concentrar la energía del sol y transformarla en calor, aprovechable para múltiples aplicaciones, tanto residenciales como industriales. La transformación de la energía del sol en energía aprovechable se realiza mediante colectores solares, que concentran e intensifican el efecto térmico producido por la radiación solar. Un colector solar utiliza la radiación solar para calentar un determinado fluido (generalmente agua) a una cierta temperatura. Según la temperatura que puede alcanzar la instalación se habla de sistemas de energía solar térmica de baja, media o alta temperatura.

En aplicaciones para calefactar y ventilar, existen en el mercado una gama amplia de colectores solares. Se caracterizan por ser un sistema muy seguro en su funcionamiento y casi no necesita ningún mantenimiento, puesto que su medio caloportador es el aire. Poseen un módulo fotovoltaico integrado en el colector que garantiza su funcionamiento independiente de la red eléctrica.

Se analiza la relación prestaciones y uso de materiales de los colectores ofertados en el mercado y se elige el colector solar SolarVenti mostrado en la Fig. 7.9, algunas de cuyas principales características se describen en la Tabla 7.7 (SolarVenti, 2011). El equipo está fabricado en hierro y silicio en proporciones aproximadas de 93 % y 7 % respectivamente, (porcentajes tomados en base a la proporción de silicio en el colector térmico TwinSolar 4.0 (Grammer, 2009)).



Figura 7.9: Colector solar de aire SolarVenti. Fuente: (SolarVenti, 2011).

Tabla 7.7: Colector solar de aire SolarVenti. Características. Fuente: (SolarVenti, 2011).

| Marca | Modelo | Peso | Caudal de aire | Potencia ventilador | Potencia célula solar |
|-------------|--------|------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| | | (kg) | (m ³ /s) | W | W |
| Solar Venti | SV30AX | 28 | 0.056 | 6.7 | 23 |

7.2.2. Dimensionamiento del sistema de ventilación con colector solar de aire. Tamaño de la instalación

Para suministrar el aire de ventilación requerido por el caso de estudio se necesitan 108 colectores solares de aire. El sistema de ventilación con colectores solares de aire requiere de los siguientes equipos: colectores solares, conductos y difusores. Este tipo de sistemas no precisa de la unidad de tratamiento de aire. Los colectores solares y los conductos representan el 71.57% y el 20.83% del peso total del sistema. Los detalles de las características del sistema se resumen en la Tabla 7.8.

Tabla 7.8: Características del sistema de ventilación con colector solar de aire.

| Equipo | Peso | Material | Peso | Cantidad requerida | Peso | Proporción en peso |
|----------------|--------|-------------------------------|--------|-----------------------|----------------|-----------------------|
| | (kg) | | (kg) | | (Unidades) | |
| Colector solar | 28 | Aluminio | 7.94 | 108 | 857.91 | 71.57 |
| | | Lana de vidrio | 4.22 | | 455.41 | |
| | | Vidrio | 12.36 | | 1337.21 | |
| | | Fibra sintética: Poliéster | 0.01 | | 0.91 | |
| | | Silicio | 0.86 | | 92.84 | |
| | | Acero | 2.28 | | 246.46 | |
| | | Cobre | 0.31 | | 33.26 | |
| Conductos | 880.10 | Chapa galvanizada | 880.10 | 1 | 880.10 | 20.83 |
| Difusores | 1.00 | Aluminio | 1.00 | 46 | 46.00 | 1.09 |
| Compuertas | 12.50 | Chapa | 12.50 | 22 | 275.00 | 6.51 |
| Total | | | | | 4225.10 | 100.00 |

7.2.3. Desempeño energético del sistema de ventilación con colector solar de aire

La evaluación del desempeño energético del sistema de ventilación con colectores solares de aire muestra que el sistema produce la energía requerida para el funcionamiento de los ventiladores y para el calentamiento del aire. El sistema tiene un requerimiento energético total de 214028.35 kWh/año. Suponiendo 25 años de operación (Alsema, 2003), el sistema produce 5350708.80 kWh de energía final, de los cuales, produce 41968.80 kWh para el funcionamiento del ventilador, y consume 5308740 kWh para el calentamiento del aire. Usando el factor de conversión para electricidad de origen 100 % renovable, de 0.326 kWh E.primaria/kWh E.final (IDAE, 2014), se encuentra que el sistema produce un total de 1744331.07 kWh de energía primaria, de los cuales 13681.83 kWh para el funcionamiento de los ventiladores y 1730649.24 kWh para el calentamiento del aire. En la Tabla 7.9, se detalla la producción de energía para cada uno de los procesos.

Tabla 7.9: Desempeño energético del sistema de ventilación con colector solar de aire. Consumo y producción de energía.

| Proceso | Requerimiento energético | Consumo energía final | Consumo energía primaria | Producción energía final | Producción energía primaria |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| | (kWh/año) | (KWh) | (KWh) | (KWh) | (kWh) |
| Operación del ventilador | 1678.75 | 41968.80 | 113681.83 | 0 | 0 |
| Tratamiento del aire | 212349.60 | 5308740.00 | 1730649.24 | 0 | 0 |
| Total | 3214028.35 | 45350708.80 | 1744331.07 | 0 | 0 |

7.2.4. Desempeño ambiental del sistema de ventilación con colector solar de aire

Es posible valorar el desempeño ambiental del sistema de ventilación con colectores solares de aire a través de la evaluación de los impactos ambientales en la fase de uso, los impactos debidos a los materiales usados y su disposición final una vez se retiran del edificio.

Se comienza creando el escenario de reciclaje en España de los materiales usados por los equipos del sistema, con base en la información reportada en la Tabla 7.10. Se calcula el requerimiento energético para reciclar dichos materiales usando la información de la Tabla 7.11. Posteriormente se calculan las toneladas kilómetros requeridas para transportar los equipos del sistema hasta la planta de tratamiento.

En las siguientes secciones se presentan los impactos ambientales del sistema.

Tabla 7.10: Escenario de reciclaje en España de los materiales que requieren los equipos del sistema de ventilación con colector solar de aire.

| Material | Reciclaje | Referencia |
|------------------------|-----------|--------------------|
| | (%) | |
| Acero, chapa | 75.0 | (Unesid, 2013) |
| Alu-zinc | 40.5 | (Arpal, 2012) |
| Aluminio | 40.5 | (Arpal, 2012) |
| Lana mineral | 67.0 | (MinFomento, 2009) |
| Hierro | 7.0 | (Unesid, 2013) |
| Silicio policristalino | 77.0 | (VSOrg, 2010) |
| Vidrio | 67.0 | (MinFomento, 2009) |
| Poliéster | 25.0 | (MinFomento, 2010) |

Tabla 7.11: Requerimiento energético para el reciclaje de los materiales que requieren los equipos del sistema de ventilación con colector solar de aire.

| Material | Energía requerida en el reciclaje | Referencia |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| | (MJ/kg) | |
| Acero, chapa | 4.30 | (Yellishetty M., 2011) |
| Alu-zinc | 0.44 | (Rabah y El-Sayed, 1995) |
| Aluminio | 0.075 | (Quinkertz et al., 2001) |
| Lana mineral | 15.3 | (López et al., 2012) |
| Hierro | 4.30 | (Yellishetty M., 2011) |
| Silicio policristalino | 46.08 | (N.C. y J.M, 2010) |
| Vidrio | 3.30 | (Vossberg et al., 2014) |
| Poliéster | 1.73 | (Wordpress, 2014) |

7.2.4.1. Impactos ambientales del sistema de ventilación con colector solar de aire. Fase de uso

El uso del sistema de ventilación con colectores solares de aire evita impactos ambientales sobre la mayoría de las categorías de daño, debido a la producción de energía, como se aprecia en la Fig. 7.10.

Las categorías de daños más beneficiadas son: el agotamiento de reservas, con 96.42 %; la expectativa de vida, con 2.44 %; y la morbilidad severa, con 0.42 %, de los impactos totales del sistema en la fase de uso.

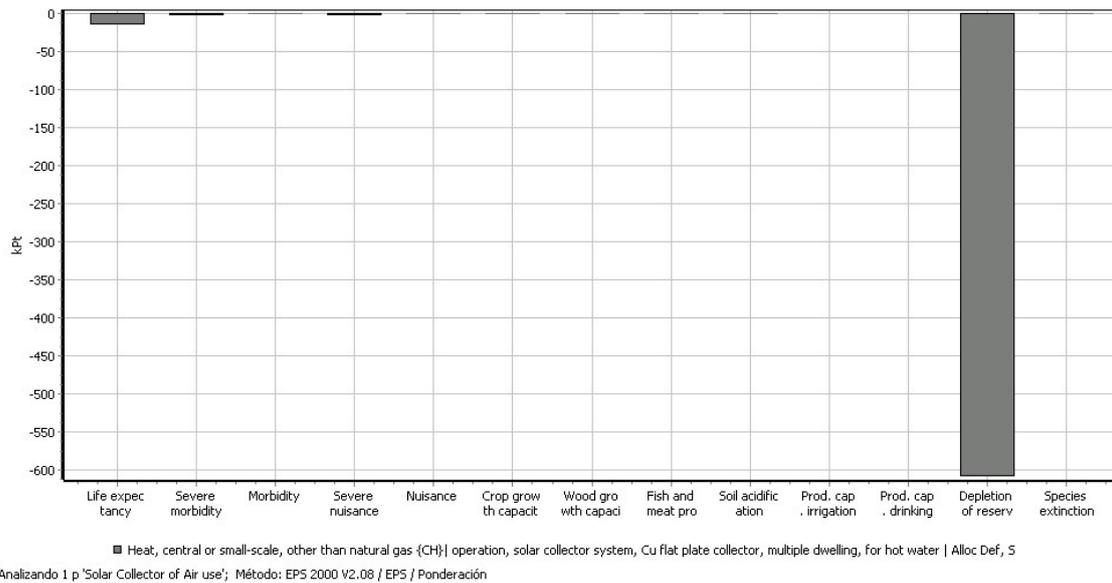


Figura 7.10: Impactos ambientales del sistema de ventilación con colectores solares de aire. Fase de uso. Ponderación. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

7.2.4.2. Impactos ambientales. Materiales usados y su disposición final. Sistema de ventilación con colector solar de aire

Se ha encontrado que en España se recicla el 59.11% de los materiales del sistema, con base en la información suministrada en la Tabla 7.10. Teniendo en cuenta la cantidad de energía requerida para el reciclaje de los materiales, detallada en la Tabla 7.11, se ha encontrado que el reciclaje de los materiales requiere 4177.78 kWh de energía final. Usando el factor de conversión para electricidad convencional nacional, de 2.461 kWh E.primaria/kWh E.final (IDAE, 2014), se encuentra un consumo de 10281.52 kWh E.primaria.

El transporte del sistema hasta la planta de tratamiento de residuos industriales BIO-TRAN ubicada en Tudela de Duero, Valladolid (Biotran, 1998), requiere 94.22 tkm.

Los colectores solares de aire del sistema ocasionan los mayores impactos ambientales, seguido de los conductos y compuertas, como se aprecia en la Fig. 7.11. Los colectores solares de aire producen daños principalmente debido al cobre y al silicio utilizados, como se aprecia en la Fig. 7.12.

La disposición final del sistema de ventilación con colector solar de aire evita daños, como muestran las barras del cero hacia abajo de la Fig. 7.13. Por otro lado, el tratamiento de los materiales y el consumo energético requerido, causan impactos principalmente sobre el agotamiento de reservas.

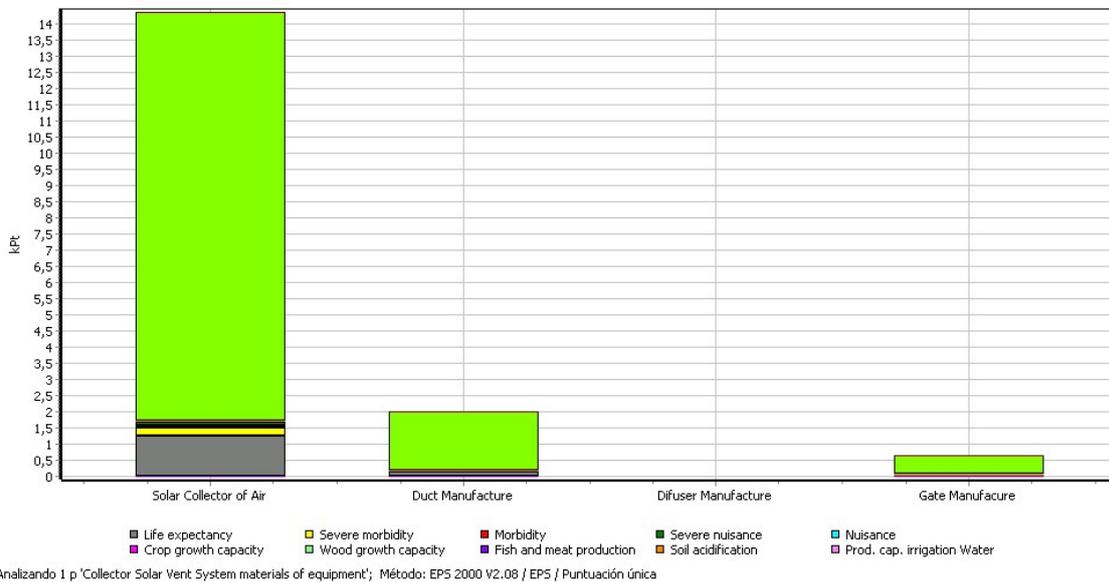


Figura 7.11: Impactos ambientales de los equipos del sistema de ventilación con colectores solares de aire. Ponderación. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

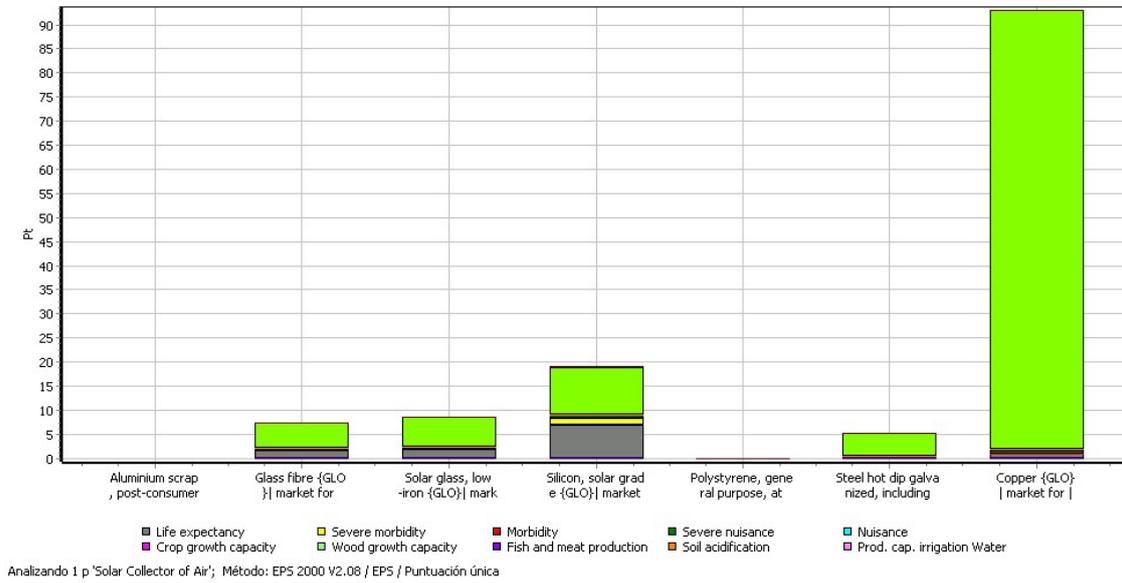


Figura 7.12: Impactos ambientales debidos a los materiales del colector solar de aire. Puntuación única. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

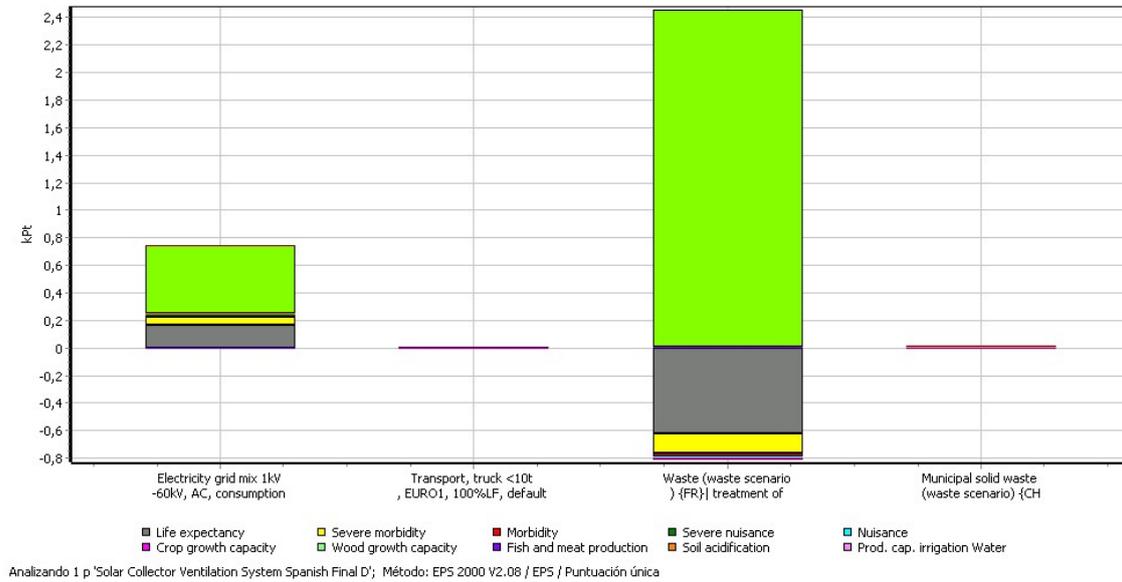


Figura 7.13: Impactos ambientales debidos a la disposición final el sistema de ventilación con colectores solares de aire. Puntuación única. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

7.2.4.3. Impactos ambientales. Ciclo de vida

Durante el ciclo de vida del sistema de ventilación con colectores solares de aire, la fase de uso evita los mayores impactos ambientales debido a la producción de energía, como se muestra en la Fig. 7.14.

El uso del sistema evita costes ambientales de: 591730.58 ELUs, sobre el agotamiento de reservas; 14495.13 ELUs sobre la esperanza de vida; y 2404.39 ELUs, sobre la morbilidad severa.

Los materiales usados por los equipos del sistema producen costes ambientales principalmente sobre el agotamiento de reservas, con 15015.61 Euros; sobre la esperanza de vida, con 1383.30 Euros; y sobre la morbilidad severa, con 322.91 ELUs.

La disposición final del sistema evita daños ambientales en todas las categorías de impacto. Los mayores costes ambientales se producen sobre el agotamiento de reservas, el crecimiento de madera, y sobre la producción de pescado y carne, con un coste de 2957.28 ELUs, 1.22 ELUs y 0.09 ELUs, respectivamente. Los detalles de los impactos ambientales en todas las categorías de daño se presentan en la Tabla 7.12.

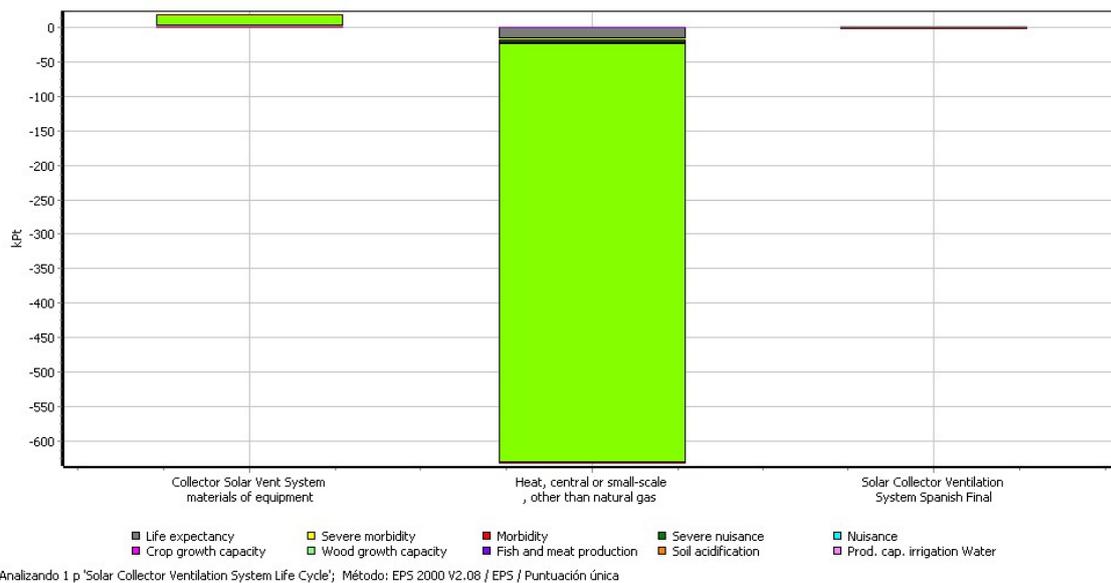


Figura 7.14: Impactos ambientales del ciclo de vida del sistema de ventilación con colectores solares de aire. Puntuación única. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

Tabla 7.12: Impactos ambientales del sistema de ventilación con colectores solares de aire. Ciclo de vida. Evaluación del daño. Datos calculados usando el *software* SimaPro8.

| Categoría de daño | Unidad | Total | Montaje | Uso Producción energía | Disposición Final |
|---|--------|------------|----------|---------------------------|-------------------|
| Esperanza de vida | ELU | -114495.13 | 1383.30 | -15429.13 | -449.30 |
| Morbilidad severa | ELU | -2404.39 | 322.91 | -2643.91 | -83.39 |
| Morbilidad | ELU | -383.78 | 69.67 | -448.40 | 5.05 |
| Molestia severa | ELU | -3498.37 | 101.34 | -3595.57 | -4.14 |
| Molestia | ELU | -431.85 | 41.03 | -2467.05 | -5.82 |
| Capacidad de crecimiento de maíz | ELU | -23.31 | 4.14 | -27.25 | -0.20 |
| Capacidad de crecimiento de madera | ELU | 89.38 | 17.53 | 105.70 | 1.22 |
| Producción de pescado y carne | ELU | 5.71 | -0.90 | 6.52 | -0.09 |
| Acidificación del suelo | ELU | -10.49 | 1,07 | -11.43 | -0.13 |
| Capacidad de producción de agua para irrigación | ELU | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Capacidad de producción de agua potable | ELU | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Agotamiento de reservas | ELU | -591730.58 | 15015.61 | -609703.47 | 2957.28 |
| Extinción de especies | ELU | -100.50 | 15.22 | -114.37 | 1.35 |
| Total | ELU | -612983.30 | 16935.85 | -632328.37 | 2409.21 |

CAPÍTULO 8

Mejora con Sistema Bio-climático para Ventilación. Muro Trombe

RESUMEN: En el presente Capítulo se realiza el ACV del muro Trombe, considerado un sistema bio-climático. Para ello, primero se diseña un muro Trombe capaz de proporcionar el aire de ventilación requerido por el edificio Aulario de la Universidad de Valladolid según normativa. Posteriormente se evalúan y comparan los impactos ambientales de tres sistemas de muro Trombe, esto es, usando hormigón convencional, usando hormigón verde y reduciendo el espesor del muro Trombe. Finalmente se propone el muro Trombe a integrar en el edificio y se evalúa su desempeño energético y ambiental.

8.1. Sistema de ventilación bioclimático con muro Trombe

Para definir el sistema de ventilación con muro Trombe se tienen en cuenta las características de los sistemas pasivos. En la sección siguiente se diseña el sistema, lo que requiere calcular las dimensiones del muro Trombe necesarias para proporcionar el aire de ventilación requerido por los espacios del edificio Aulario, de $6.042 \text{ m}^3/\text{s}$.

8.1.1. Diseño y desarrollo térmico de un muro Trombe

El diseño cuidadoso del edificio incorporando uno o más conceptos de calefacción pasiva puede proporcionar importantes cantidades de calor a los espacios del edificio. El almacenamiento del calor es un factor importante para ampliar la duración de la calefacción para los períodos sin sol (Sodha et al., 1986). Se considera una tecnología solar pasiva a la capacidad de almacenamiento de calor de los materiales y sistemas de construcción.

Una pared térmica ennegrecida y acristalada reduce considerablemente las oscilaciones de temperatura en la sala aireada. Este concepto fue patentado primero en Estados Unidos por E.L. Morse en 1881 y luego fue revivido y patentado por Trombe (1977, 1974) (Sodha et al., 1986).

El muro Trombe es el tipo de pared de almacenamiento térmico más utilizado. Básicamente consiste en un muro que tiene incorporado sobre su superficie un vidrio sencillo o doble.

Este muro tiene la capacidad de acumular el calor solar y transmitir el calor acumulado a los espacios interiores por los mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación). Si hay orificios de ventilación en la pared y en la superficie acristalada, el muro Trombe está optimizado para las temporadas de calefacción y refrigeración (Ruiz et al., 2005; Gan, 1998; Jie et al., 2008).

A fin de obtener un muro Trombe eficaz, es necesario estudiar las distintas variables que intervienen en su diseño y rendimiento, como el material utilizado y su espesor, la ubicación y la dimensión de los aireadores, la oclusión y los dispositivos de sombreado, así como su uso durante las diferentes estaciones del año, que debe ser ajustado y optimizado según el clima local y la contribución deseada del muro Trombe para la construcción. En el estudio de (BrigaSà et al., 2014) se citan varias obras en que se analiza el comportamiento térmico de muros Trombe construidos con materiales diferentes, usando o no sistemas de ventilación. El autor analizó la influencia del espesor de la masa de pared, el sistema de ventilación, los dispositivos de sombreado la influencia de los diferentes parámetros que se incluyen en las ecuaciones y la contribución de la transferencia de calor por conducción, convección y radiación, y también por la convección de aire a través de las rejillas de ventilación en la pared masiva (BrigaSà et al., 2014).

En el presente estudio, se llevó a cabo el diseño de un muro Trombe el cual no juega un papel estructural. Se evalúa el rendimiento energético para ser usado durante la temporada de calefacción en Valladolid, siguiendo la norma internacional ISO 13790:2008(E) (ISO13790, 2008) y las contribuciones dadas por (BrigaSà et al., 2014).

8.1.1.1. Metodología de cálculo

La metodología presentada permite calcular la ganancia térmica global a través del muro Trombe, teniendo en cuenta las pérdidas y las ganancias de calor (BrigaSà et al., 2014). En la Fig. 8.1 se presenta el modelo clásico de un muro Trombe y algunos de los parámetros térmicos tomados en cuenta en la metodología de cálculo, es decir, las resistencias térmicas de las diferentes capas y temperaturas.

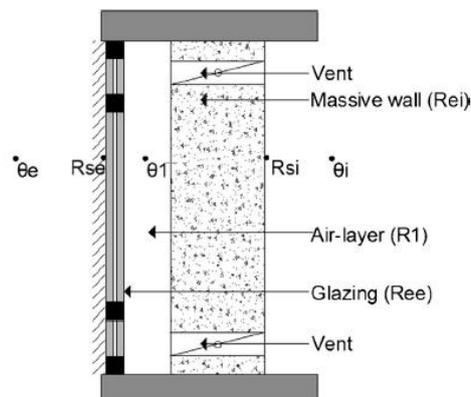


Figura 8.1: Muro Trombe (modelo clásico) (BrigaSà et al., 2014)

Ganancia térmica global

Con la finalidad de obtener un resultado final del muro Trombe, se define el rendimiento global de las ganancias de calor a través del sistema como Q_{gains} y se calcula como la suma de las contribuciones de las ganancias solares, Q_{sol} , y la transferencia de calor, Q_{trans} (ISO13790, 2008), como se muestra en la ecuación 8.1 (BrigaSà et al., 2014). Las ecuaciones físicas utilizadas para calcular sus valores implican coeficientes que representan la transferencia de calor por conducción, convección y radiación a través del sistema de muro Trombe.

$$Q_{gains} = Q_{sol} + Q_{trans} \quad (8.1)$$

Ganancia solar

El cálculo del rendimiento energético del muro Trombe durante la temporada de calefacción se basa en la contribución de las ganancias solares y transferencia de calor a través de la pared y a través del sistema de ventilación. La ganancia solar, Q_{sol} , en la zona del edificio considerado, para la temporada de calefacción se calcula utilizando la ecuación 8.2 (ISO13790, 2008), donde $\phi_{sol,mn,k}$ es el tiempo promedio de tasa de flujo de calor desde la fuente de calor solar k , específicamente, el muro Trombe, calculado de acuerdo con la ecuación 8.3.

$$Q_{sol} = \left(\sum_k \phi_{sol,mn,k} \right) t + \left(\sum_l (1 - b_{tr,l}) \phi_{sol,mn,k} \right) t \quad (8.2)$$

$$\phi_{sol,mn,k} = F_{sh,ob,k} A_{sol,k} I_{sol,k} - F_{r,k} \phi_{r,k} \quad (8.3)$$

Siguiendo la metodología de los estudios de (BrigaSà et al., 2014), se consideró que el espacio con el muro Trombe está rodeado por espacios con igual temperatura interior, excepto en la fachada que integra el muro Trombe, la cual separa el espacio del ambiente exterior. No se contabilizan las ganancias y pérdidas de calor de los espacios que lo rodean (BrigaSà et al., 2014). Así, la ecuación 8.2 se simplifica debido a que el segundo término se hace cero. Sustituyendo la ecuación 8.3 en 8.2, se obtiene la ecuación 8.4.

$$Q_{sol} = (F_{sh,ob,k} A_{sol,k} I_{sol,k} - F_{r,k} \phi_{r,k}) t \quad (8.4)$$

Donde $F_{sh,ob,k}$ es el factor de reducción de las sombras por los obstáculos externos para la zona de recolección efectiva solar del muro Trombe, que se define como la tasa entre el promedio de la irradiancia solar efectiva recibida en el plano de recolección sombreado por los obstáculos externos y el promedio de la irradiancia solar en el plano de recolección sin sombras. La ecuación 8.5 se usa para calcular $F_{sh,ob,k}$.

$$F_{sh,ob,k} = F_h F_o F_f \quad (8.5)$$

$I_{sol,k}$ representa la irradiancia solar en la temporada de calefacción. Este valor está definido como G_{sul} y se calcula para la superficie orientada al sur, variando para las diferentes regiones climáticas. Así, el valor de $I_{sol,k}$ se obtiene con la ecuación 8.6, donde M y G_{sul} se definen en función de la zona climática en invierno.

$$I_{sol,k} = \frac{M \cdot G_{sul}}{t_1} \quad (8.6)$$

El valor de $F_{r,k}$ es función de la dirección del flujo de calor (ISO13790, 2008). En el caso del muro Trombe, el flujo de calor tiene dirección horizontal, tomando el valor de 0.5 (BrigaSà et al., 2014). Las ganancias solares se calculan teniendo en cuenta la superficie de recogida efectiva, que en este caso corresponde al área del acristalamiento. El área efectiva del muro Trombe ventilado viene dada por la ecuación 8.7 (ISO13790, 2008).

$$A_{sol,k} = A_{sw} \cdot \alpha \cdot F_{sh,gl} \cdot F_f \cdot g_w \left[U_0 R_e + \frac{U_0^2 R_i}{U_i U_e} \rho_a c_a \frac{q_{ve,sw}}{A_{sw}} k_{sw} \omega \right] \quad (8.7)$$

Donde $F_{sh,gl}$ es el factor de reducción de sombreado para dispositivos de sombreado móviles, calculado de acuerdo a la ecuación 8.8.

$$F_{sh,gl} = \frac{(1 - f_{sh,with})g_{\perp} + f_{sh,with}g_{\perp}100\%}{g_{\perp}} \quad (8.8)$$

El valor de $f_{sh,with}$ se asumió igual a 0.5, considerando que en invierno las protecciones están activas un 50 % del tiempo, asumiendo condiciones climáticas similares para España y Portugal (BrigaSà et al., 2014). El producto $F_{sh,gl} \cdot g_w$ representado en la ecuación 8.7 se modifica y se representa por g_{\perp} . Así, la ecuación 8.7 para calcular el área efectiva se simplifica obteniéndose la ecuación 8.9.

$$A_{sol,k} = A_{sw} \cdot \alpha \cdot F_f \cdot g_{\perp} \left[U_0 R_e + \frac{U_0^2 R_i}{U_i U_e} \rho_a c_a \frac{q_{ve,sw}}{A_{sw}} k_{sw} \omega \right] \quad (8.9)$$

La influencia de la transferencia de calor por conducción, convección y radiación sobre las ganancias solares contabiliza las propiedades térmicas de las diferentes capas que componen el muro Trombe, representado por su resistencia térmica o por los valores del coeficiente de conductividad térmica, definido abajo. El parámetro U_0 es el coeficiente de transferencia de calor del muro Trombe, calculado usando las ecuaciones 8.10, 8.11 y 8.12.

$$U_0 = \frac{1}{R_i + R_1 + R_e} \quad (8.10)$$

$$R_i = R_{si} + R_{se} \quad (8.11)$$

$$R_e = R_{se} + R_{ee} \quad (8.12)$$

Los valores de U_i y U_e representan los coeficientes de transferencia de calor de los elementos internos y externos del muro Trombe, obtenidos de acuerdo a las ecuaciones 8.14 y 8.13, respectivamente. El elemento interno es la masa de pared y el externo es el acristalamiento.

$$U_i = \frac{1}{R_i + (R_1/2)} \quad (8.13)$$

$$U_e = \frac{1}{R_e + (R_1/2)} \quad (8.14)$$

La influencia del sistema de ventilación en la pared masiva se considera incluido en el caudal de aire debido a la convección de aire a través de los aireadores, y está definido por el parámetro $q_{ve,sw}$. Para calcular el valor del caudal de aire a través de los orificios de ventilación con área igual, situados en la parte inferior y en la parte superior de la pared masiva, se usa la ecuación 8.15 (Portuguese, 1967).

$$q_{ve,sw} = 0.16 \cdot S \sqrt{\frac{h_t}{2} (\theta_i - \theta_1)} \quad (8.15)$$

El parámetro k_{sw} presente en la ecuación 8.9 se define en la ecuación 8.16, donde Z es un parámetro determinado de acuerdo a la ecuación 8.17 (ISO13790, 2008).

$$k_{sw} = \left[1 - \exp\left(\frac{-A_{sw}Z}{\rho_a c_a q_{ve,sw}}\right) \right] \quad (8.16)$$

$$\frac{1}{Z} = \frac{h_r}{h_c(h_c + 2h_r)} + \frac{1}{U_i + U_e} \quad (8.17)$$

El valor de h_c , el coeficiente de transferencia de calor entre la separación de aire, la pared y el acristalamiento, depende de si existe o no flujo de aire a través de la brecha (Trnsys, 1967). Por tanto, h_c se calcula como se describe a continuación.

Si $\dot{m} = 0$

$$h_c = \frac{k_a}{L} \left(0.01711 (Gr.Pr)^{0.29} \right) \quad (8.18)$$

Si $\dot{m} \neq 0$ and $Re > 2000$

$$h_c = \frac{k_a}{L} \left(0.0158 Re^{0.8} \right) \quad (8.19)$$

Si $\dot{m} \neq 0$ and $Re \leq 2000$

$$h_c = \frac{k_a}{L} \left[4.9 + \frac{0.06068(x^*)^{-1.2}}{1 + 0.08568(x^*)^{-0.7}} \right] \quad (8.20)$$

En el muro Trombe ventilado, $\dot{m} \neq 0$.

La transferencia de calor por radiación térmica al cielo también se representó en el área efectiva del sistema por el coeficiente de transferencia de calor radiativo externo, h_r . En una primera aproximación, puede tomarse igual a 5ϵ , dependiendo de la emisividad de la superficie de cristal del muro Trombe.

El área de recolección efectiva del muro Trombe se calcula considerando un parámetro definido como ω , que representa la relación de la caída total de radiación en el elemento cuando la capa de aire está abierta a la radiación solar total. Su cálculo se realiza usando la ecuación 8.21 definida en la Norma Internacional ISO 133790 (ISO13790, 2008).

$$\omega = 1 - \exp(-2.2\gamma_{al}) \quad (8.21)$$

Donde γ_{al} representa la relación entre la ganancia solar, $Q_{gn,sw}$, y las pérdidas de calor de la capa de aire, $Q_{ht,al}$, durante el periodo de cálculo, que pueden obtenerse de las ecuaciones 8.22 y 8.23.

$$Q_{gn,sw} = I_w A_{sw} (MJ) \quad (8.22)$$

$$Q_{ht,al} = U_e A_{sw} (\theta_1 - \theta_e) t (MJ) \quad (8.23)$$

La ganancia solar, $Q_{gn,sw}$, depende de la radiación solar, I_w , y su valor fue calculado de acuerdo a la ecuación 8.24.

$$I_w = 3.6 \cdot M \cdot G_{sul} \quad (8.24)$$

Finalmente, para calcular la velocidad de flujo de calor $\phi_{sol,mn,k}$, definida en la ecuación 8.3, también se tuvo en cuenta un componente que se refiere al flujo de calor adicional debido a la

radiación térmica emitida desde el muro Trombe al cielo, definido en el documento normalizado (ISO13790, 2008) por la ecuación 8.25.

$$\phi_{r,k} = R_{se} U_0 A_{sw} h_r \Delta\theta(W) \quad (8.25)$$

Transferencia de calor

La transferencia de calor a través del muro Trombe se aborda en el documento estándar (ISO13790, 2008) mediante el cálculo del coeficiente de transferencia de calor, H , usando la ecuación 8.26.

$$H = H_0 + \Delta H \quad (8.26)$$

Las ganancias de la transferencia de calor a través del muro Trombe se calculan en función del coeficiente de transferencia de calor, H , y de las condiciones climáticas que caracterizan la zona climática considerada, representadas por el valor de los grados día GD . Estas ganancias se definen como $Q_{gn,sw}$ y pueden obtenerse utilizando la ecuación 8.27.

$$Q_{trans} = 0.0864 \cdot H \cdot GD \quad (8.27)$$

El cálculo del coeficiente de transferencia de calor H , incluye la contribución de dos componentes, representados por los parámetros H_0 y ΔH . El coeficiente de transferencia de calor del muro Trombe no ventilado, H_0 , resulta de la transferencia de calor por conducción, convección y radiación por el sistema dado por la ecuación 8.28.

$$H_0 = U_0 \cdot A_{sw} \quad (8.28)$$

El coeficiente de transferencia de calor adicional debido a los fenómenos de convección a través de las rejillas de ventilación en la masa de pared, ΔH , se obtiene con las ecuaciones 8.29 y 8.30.

$$\Delta H = \rho_a c_a \cdot q_{ve,sw} \left[\frac{U_e}{U_i} \right]^2 \delta \cdot K_{sw} \quad (8.29)$$

$$\delta = 0.3\gamma_{al} + 0.03(0.0003^{\gamma_{al}} - 1) \quad (8.30)$$

Parámetros y valores climáticos

Para determinar el desarrollo energético del muro Trombe, se consideró la temporada de calefacción de Septiembre a Abril con una longitud t , de 20.91 Msegundos; t_1 , de 5808 h; con un promedio mensual de incidencia de la energía solar en el sur, G_{sul} , de 94.68 kWh/m² mes; y Grados Día $GD(20\text{ }^\circ\text{C})20\text{ }^\circ\text{C}$, de 2757 (IDAE, 2010).

En la Tabla 8.1 se muestran los datos del vidrio, donde se consideró el valor de 0.89 para el parámetro ϵ , que es el típico muro y representa la habilidad de los acristalamientos de emitir calor por radiación. El parámetro que se refiere a la fracción de vidrio, F_F , toma el valor de 0.7 porque el marco del cristal no tiene rejillas. El parámetro g_{\perp} es 0.75 para el acristalamiento. Para el factor de reducción del sombreado por los obstáculos externos, $F_{sh,ob,k}$, se considera que no hay obstáculos en el horizonte y desde la posición horizontal. Así, el valor de F_h corresponde a 0.9 y el valor de $F_o \cdot F_f$ es igual a 0.9 para la temporada de calefacción.

La Tabla 8.2 muestra las características de los materiales del muro Trombe considerados en los cálculos de los valores de conductividad térmica y resistencias térmicas. Para el valor del coeficiente de absorción, α , se asumió un obturador externo no activo, por tanto, la superficie exterior de la masa de pared pintada de negro contribuye al aumento de la capacidad de almacenamiento de calor del sistema y tiene un valor de 0.8. El valor de $F_{r,k}$ de la dirección del flujo de calor es 0.5, pues en el caso del muro Trombe dicho flujo de calor tiene dirección horizontal (BrigaSà et al., 2014).

En la Tabla 8.3 se muestran las diferentes temperaturas del aire. Para la temperatura del aire en el exterior, θ_e , se consideró un valor promedio de 8.8 °C para la temporada de calefacción en Valladolid (IDAE, 2010). El valor la temperatura del aire en el interior, θ_i , se asumió como 21 °C de acuerdo a la legislación española se encuentra dentro de las temperaturas de confort en la temporada de calefacción (RITE, 2013). Para la temperatura θ_1 se tomó el valor promedio de 45 °C (BrigaSà et al., 2014).

Tabla 8.1: Características del vidrio (BrigaSà et al., 2014).

| Parámetro | Valor |
|---|-------|
| Emisividad, ϵ , ($W/(m^2\text{°C})$) | 0.89 |
| Fracción vidriada, F_F | 0.70 |
| Factor solar del vidrio, g_{\perp} | 0.75 |
| Factor de reducción de sombreado por obstáculos Elementos de construcción desde el horizonte o de otros, F_h | 0.9 |
| Factor de reducción de sombreado por obstáculos desde los elementos horizontales sobre el acristalamiento, F_o | 1 |
| Factor de reducción de sombreado por obstáculos desde los elementos verticales sobre el acristalamiento, F_f | 1 |

Tabla 8.2: Características de los materiales del muro Trombe (BrigaSà et al., 2014).

| Parameter | Value |
|--|-------|
| Resistencia térmica interna superficial R_{si} ($(m^2\text{°C})/W$) | 0.13 |
| Resistencia térmica externa superficial R_{se} ($(m^2\text{°C})/W$) | 0.04 |
| Conductividad térmica del concreto ($W/(m\text{°C})$) | 1.5 |
| Resistencia térmica de la capa de aire R_1 ($(m^2\text{°C})/W$) | 0.18 |
| Resistencia térmica del acristalamiento R_{ee} ($(m^2\text{°C})/W$) | 0.29 |
| Anchura entre el vidrio y el muro (m) | 0.1 |
| Coefficiente de absorción solar de la superficie exterior de la pared, α | 2.8 |
| Factor de forma entre el muro Trombe y el cielo, del muro Trombe ventilado, $F_{r,k}$ | 0.5 |

Tabla 8.3: Temperaturas del sistema del muro Trombe usado en Valladolid, España

| Temperatura | Valor |
|---|---------------------------|
| Temperatura del ambiente exterior (°C) θ_e | 8.8 (IDAE, 2010) |
| Temperatura de ambiente interior (°C) θ_i | 21 (RITE, 2013) |
| Temperatura de la capa de aire (°C) θ_1 | 45 (BrigaSà et al., 2014) |

Resultados del caso de estudio

Se hicieron varias iteraciones (utilizando Matlab) para encontrar las dimensiones del muro Trombe adecuado para suministrar el caudal de aire necesario para el caso de estudio. Se encontró un muro Trombe con área de 107.8 m^2 y velocidad de flujo de aire en la brecha de $3.06 \text{ m}^3/\text{s}$. Se analizaron durante la temporada de calefacción diferentes espesores de la pared masiva. Los resultados fueron validados con el estudio de Briga-Sà, (2014). Los resultados obtenidos indican que la ganancia térmica a través del muro Trombe aumenta con el aumento del espesor de la masa de pared, como se muestra en la Fig. 8.2 y en la Tabla 8.4. Para 15 cm de espesor de pared la ganancia solar es de 11984 kWh, aumentando a 24583 kWh para 40 cm de espesor de pared.

La contribución de la ganancia solar incrementa y la contribución debida a la ganancia por transmisión disminuye cuando incrementa el espesor de la pared, como se muestra en la Fig. 8.3. Para el caso de estudio se encuentra que para espesores desde 30 cm a 40 cm la ganancia solar Q_{sol} y la ganancia por transmisión Q_{trans} es casi la misma.

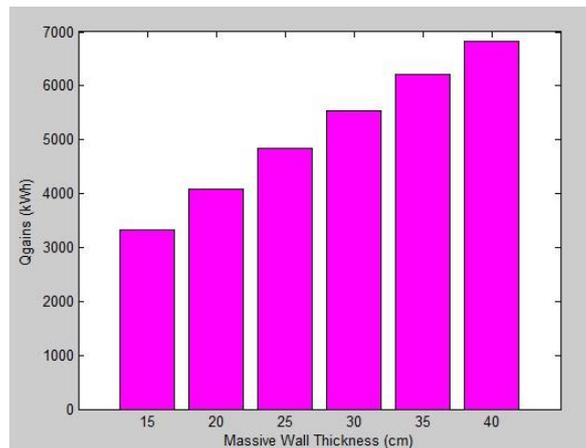


Figura 8.2: Ganancia solar del muro Trombe, Q_{gains} , dependiendo del espesor de la pared.

Tabla 8.4: Ganancia solar del muro Trombe, Q_{gains} , dependiendo del espesor de la pared. Datos.

| Thickness (cm) | Q_{gains} (kWh) |
|-------------------|-----------------------------|
| 15 | 12009 |
| 20 | 14725 |
| 25 | 17404 |
| 30 | 19949 |
| 35 | 22343 |
| 40 | 24587 |

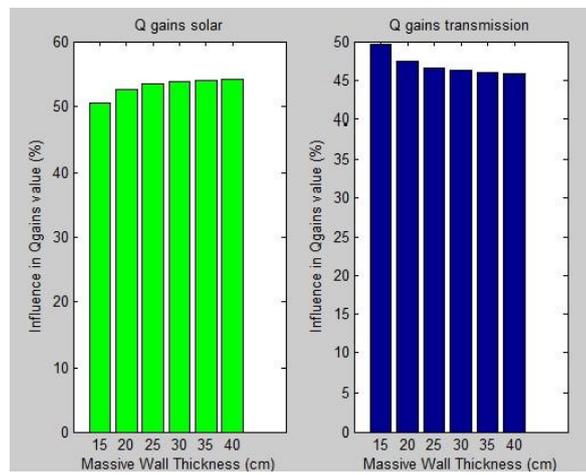


Figura 8.3: Valores de la contribución de la transmisión de calor Q_{gains} .

8.1.2. Características del sistema de ventilación con muro Trombe

Un sistema de ventilación clásico está constituido por los siguientes equipos: equipo de ventilación, unidad de tratamiento de aire, conductos de aire y difusores de aire. El sistema de ventilación con muro Trombe no requiere unidad de tratamiento de aire, ni conductos de aire, ni difusores de aire, debido a que precalienta el aire de ventilación y lo introduce dentro del edificio.

Muro Trombe. Integración en la envolvente del edificio

Para el caso de estudio se sugiere la integración de dos muros Trombe con las siguientes dimensiones: altura 2.8 m y longitud 38.5 m, con un área total de 107.8 m^2 , como se muestra en la Fig. 8.4, para proporcionar el mismo flujo de aire en la planta baja y en la primera planta, de $3.021 \text{ m}^3/\text{s}$. Se seleccionó el espesor de 40 cm de masa de pared para un volumen total de 43.12 m^3 , que proporciona una ganancia de calor global de 24583 kWh, de los cuales 13304 kWh provienen de la ganancia solar y 11276 kWh de la ganancia por transmisión. Se asumió un hormigón convencional, con los componentes mostrados en la Tabla 8.5 (Turk et al., 2015). El vidrio tiene un peso de 1792 kg suponiendo la misma área de la masa de pared.

El sistema de ventilación pasiva con muro Trombe propuesto para el caso de estudio, produce la energía para calentar el aire y no requiere equipos adicionales para suministrar el aire al recinto.

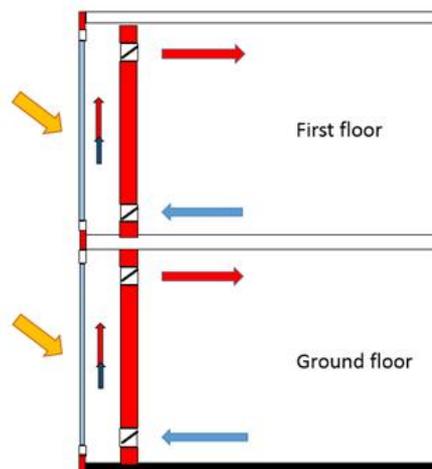


Figura 8.4: Integración del muro Trombe en la envolvente del edificio. Operación en la temporada de calefacción

Tabla 8.5: Hormigón convencional. Características (Turk et al., 2015).

| Materia prima | Cantidad |
|----------------------|----------------------|
| | (kg/m ³) |
| Agregado | 1926 |
| Cemento | 175 |
| Agua | 17394 |
| Aditivos | 2 |

8.1.3. Propuestas de mejoras en el sistema con muro Trombe

Con la finalidad de reducir los impactos ambientales del muro Trombe, antes de la integración en el edificio, se estudia la relación entre el espesor y la capacidad de almacenamiento de energía, de acuerdo con los estudios de Saadatian O., et al., (2012). Para el caso de estudio se analizaron dos posibles mejoras en la generación de impactos ambientales: la primera reduciendo el espesor desde 40 cm to 20 cm (Saadatian et al., 2012). La segunda, usando un muro Trombe fabricado con hormigón verde, comparándolo con el hormigón convencional. Conforme a los estudios de (Turk et al., 2015), las características se muestran en la Tabla 8.6.

Tabla 8.6: Hormigón verde y convencional. Características. Fuente: (Turk et al., 2015).

| Materia prima | Hormigón convencional | Hormigón verde |
|---------------|-----------------------|----------------------|
| | (kg/m ³) | (kg/m ³) |
| Agregado | 1926 | 1867 |
| Ceniza | | 80 |
| Cemento | 320 | 240 |
| Agua | 175 | 174 |
| Aditivos | 2 | 2 |
| Total | 2423 | 2363 |

8.1.4. Impactos ambientales comparativos de diferentes clases de muro Trombe

El análisis de las mejoras se realizó evaluando y comparando los impactos ambientales de tres clases de muro Trombe: usando hormigón convencional de 40 cm de espesor, usando hormigón verde de 40 cm de espesor y usando hormigón verde de 20 cm de espesor. Los tres casos analizados cumplen con los requerimientos energéticos del caso de estudio. Se encontró la mayor reducción en los impactos ambientales al disminuir el espesor, como se muestra en la Fig. 8.5 y en la Tabla 8.7. Para el caso de estudio se elige en muro Trombe fabricado en hormigón verde de 20 cm.

Tabla 8.7: Impactos ambientales de diferentes tipos de muros Trombe. Datos obtenidos usando el *software* SimaPro8.

| Categorías de daño | Unidad | Muro Trombe hormigón convencional 40 cm espesor | Muro Trombe hormigón verde 40 cm espesor | Muro Trombe hormigón verde 20 cm espesor |
|--|--------|---|--|--|
| Salud humana | ELU | 5120 | 5140 | 3280 |
| Capacidad de producción de los ecosistemas | ELU | -52.1 | -52.1 | -31 |
| Fuentes de recursos abióticos | ELU | 13100 | 13100 | 8280 |
| Bio-diversidad | ELU | 59.2 | 58 | 34.3 |

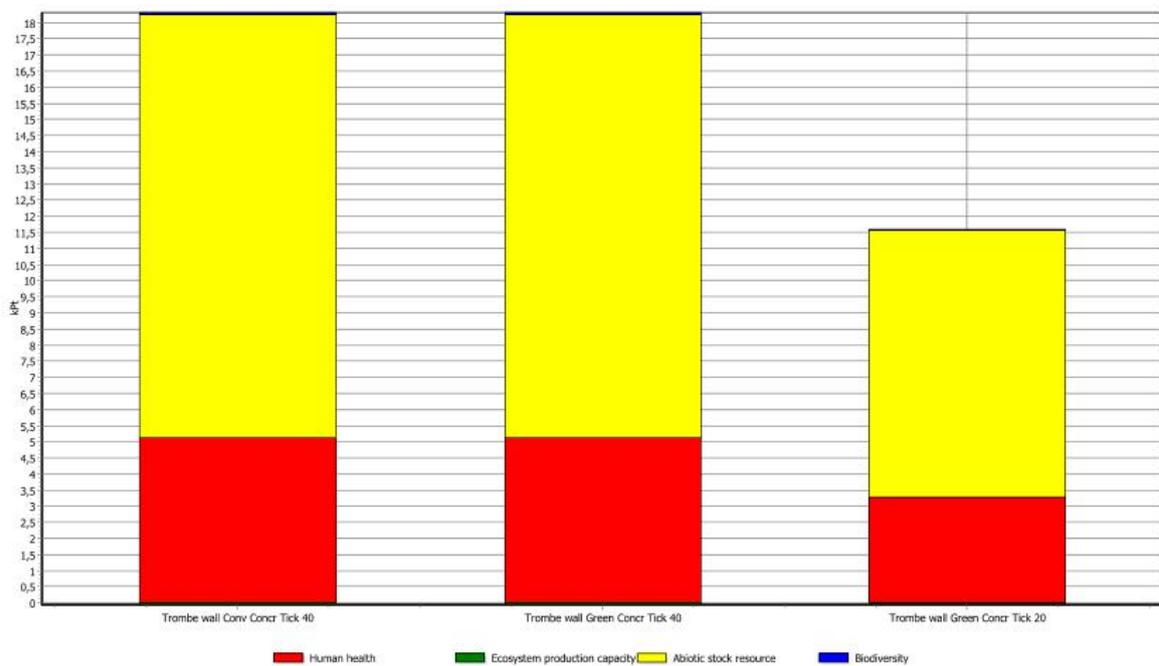


Figura 8.5: Impactos ambientales comparativos de diferentes tipos de muro Trombe. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

8.1.5. Dimensionamiento. Tamaño del sistema bioclimático

Para suministrar el aire de ventilación requerido por el caso de estudio, se necesitan 2 muros Trombe con las características descritas en la Tabla 8.8. El sistema bioclimático con muro Trombe no requiere de: unidad de tratamiento de aire, conductos, rejillas y compuertas, debido a que el aire se suministra directamente al edificio, como ya se ha indicado anteriormente. Para futuros estudios se sugiere estudiar la ubicación más recomendada de los muros Trombe.

Tabla 8.8: Características del sistema de ventilación con muro Trombe

| Material | Peso | Cantidad requerida | Peso Total | Proporción en Peso |
|----------|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| | (kg) | (Unidades) | (kg) | (%) |
| Vidrio | 1792.70 | 2 | 3585.40 | 0.85 |
| Hormigón | 208959.50 | 2 | 417919.00 | 99.15 |
| Total | 210752.20 | | 421504.40 | 100.00 |

8.1.6. Desempeño energético del sistema de ventilación bioclimático con muro Trombe

El sistema de ventilación con muro Trombe produce la energía para calentar el aire de ventilación. Sus características de construcción hacen que no requiera energía externa para inyectar el aire dentro del edificio. El desempeño energético del muro Trombe, muestra que el sistema requiere 212349.60 kWh/año. Suponiendo 25 años de operación, el sistema produce 5308740 kWh de energía final, equivalentes a 1730649.24 kWh de energía primaria, según factor de conversión de 0.326 kWh E.primaria/kWh E.final para España (IDAE, 2014) (ver Tabla 8.9).

Tabla 8.9: Desempeño energético del muro Trombe. Consumo y producción de energía.

| Proceso | Requerimiento energético | Consumo energía final | Consumo energía primaria | Producción energía final | Producción energía primaria |
|----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| | (kWh/año) | (KWh) | (KWh) | (KWh) | (kWh) |
| Tratamiento del aire | 212349.60 | 5308740.00 | 1730649.24 | 0 | 0 |
| Total | 212349.60 | 5308740.00 | 1730649.24 | 0 | 0 |

8.1.7. Desempeño ambiental del sistema de ventilación bioclimático con muro Trombe

Para el Análisis de Ciclo de Vida del sistema de ventilación con muro Trombe, se estudian los impactos ambientales ocasionados durante la fase de uso del sistema y los ocasionados por los materiales usados y su disposición final una vez retirado del edificio.

Con la finalidad de comparar los sistemas de ventilación, se establece, en la fase de uso, el mismo tiempo de operación de 25 años, aunque el sistema de ventilación con muro Trombe tiene una vida útil 50 años.

En la fase de disposición final se calcula la cantidad de materiales que se reciclan y la energía requerida en dicho proceso en base a la información reportada en la literatura, resumida en las Tablas 8.10 y 8.11. El porcentaje reciclado se supone que tiene igual tratamiento de residuos de Francia. El porcentaje no reciclado se supone que va a vertedero.

En las siguientes secciones se presentan los resultados de los impactos ambientales del sistema.

Tabla 8.10: Escenario de reciclaje en España de los materiales que requiere el sistema de ventilación con muro Trombe.

| Material | Reciclaje | Referencia |
|----------|-----------|--------------------|
| | (%) | |
| Vidrio | 67.0 | (MinFomento, 2009) |
| Hormigón | 40.5 | (Arpal, 2012) |

Tabla 8.11: Requerimiento energético para el reciclaje de los materiales del sistema de ventilación con muro Trombe.

| Material | Energía requerida en el reciclaje | Referencia |
|----------|-----------------------------------|-------------------------|
| | (MJ/kg) | |
| Vidrio | 3.30 | (Vossberg et al., 2014) |
| Hormigón | 1.73 | (Serres et al., 2016) |

8.1.7.1. Impactos ambientales. Fase de uso

El uso del sistema de ventilación con muro Trombe produce energía para su funcionamiento, lo que evita impactos ambientales en casi todas las categorías de análisis, como se aprecia con las barras del rango de cero hacia abajo de la Fig. 8.6.

Los daños evitados en la fase de uso son principalmente sobre, el agotamiento de reservas, con un 96.42 %; sobre la esperanza de vida, con un 2.44 %; y sobre la morbilidad severa, con un 0.42 %. La fase de uso del sistema sólo causa daños sobre la capacidad de crecimiento de madera y la producción de pescado y carne, con un 0.0167 % y un 0.0010 %, respectivamente.

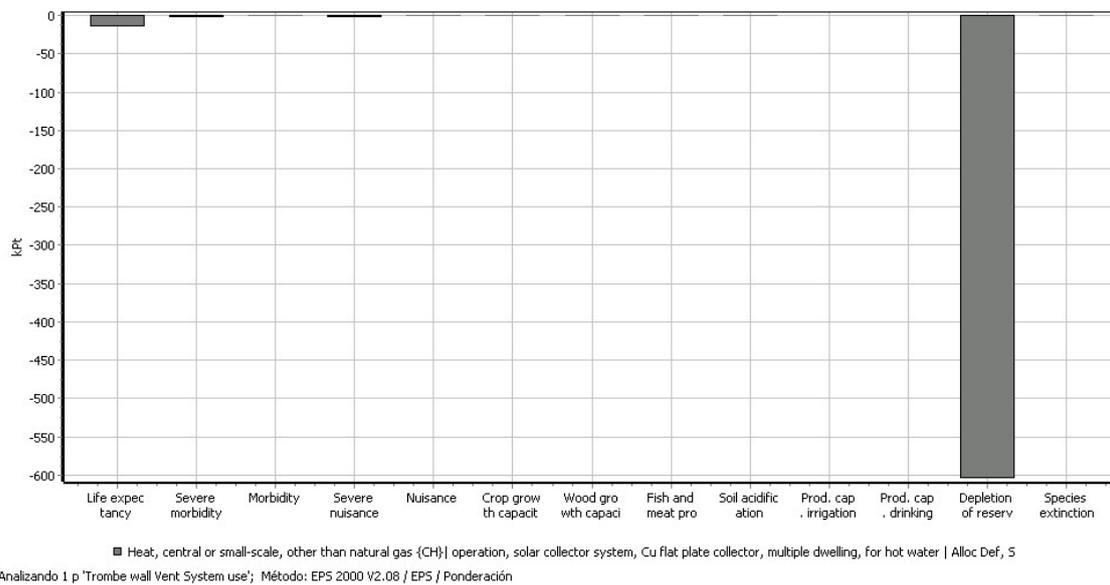


Figura 8.6: Impactos ambientales del sistema de ventilación con muro Trombe. Fase de uso. Evaluación del daño. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

8.1.7.2. Impactos ambientales. Materiales usados y su disposición final

Debido a que el sistema de ventilación con muro Trombe consta de 99.15 % de hormigón y 0.85 % de vidrio (ver sección 8.1.5), y teniendo en cuenta que en España se recicla el 40.5 % del hormigón, (ver sección 8.1.7, se ha encontrado que en la fase de disposición final se recicla el 17.43 % de los materiales del sistema.

El reciclaje de estos materiales requiere 2213.54 kWh de energía final, en base a los datos reportados en la Tabla 8.11. Usando el factor de conversión para electricidad convencional nacional, de 2.461 kWh E.primaria/kWh E.final (IDAE, 2014), se encuentra un consumo de 5447.52 kWh E.primaria en el proceso de reciclaje.

El transporte del sistema hasta la planta de tratamiento de residuos de construcción ubicada en San Martín de Valvení, Valladolid, requiere 7460.63 tkm.

Los materiales usados por el sistema de ventilación con muro Trombe causan impactos como se aprecia en la Fig. 8.7.

Se encuentra que la disposición final del sistema ocasiona impactos ambientales principalmente debido al tratamiento de residuos del escenario francés considerado y a la proporción del sistema que va a vertedero, como se aprecia en la Fig. 8.8.

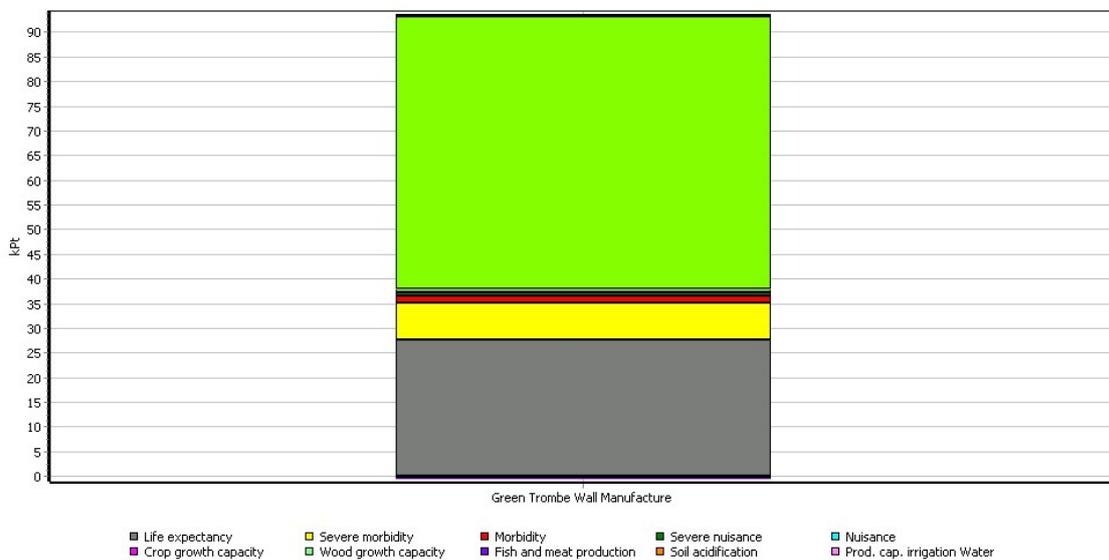


Figura 8.7: Impactos ambientales debido a los materiales del sistema de ventilación con muro Trombe. Puntuación única. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

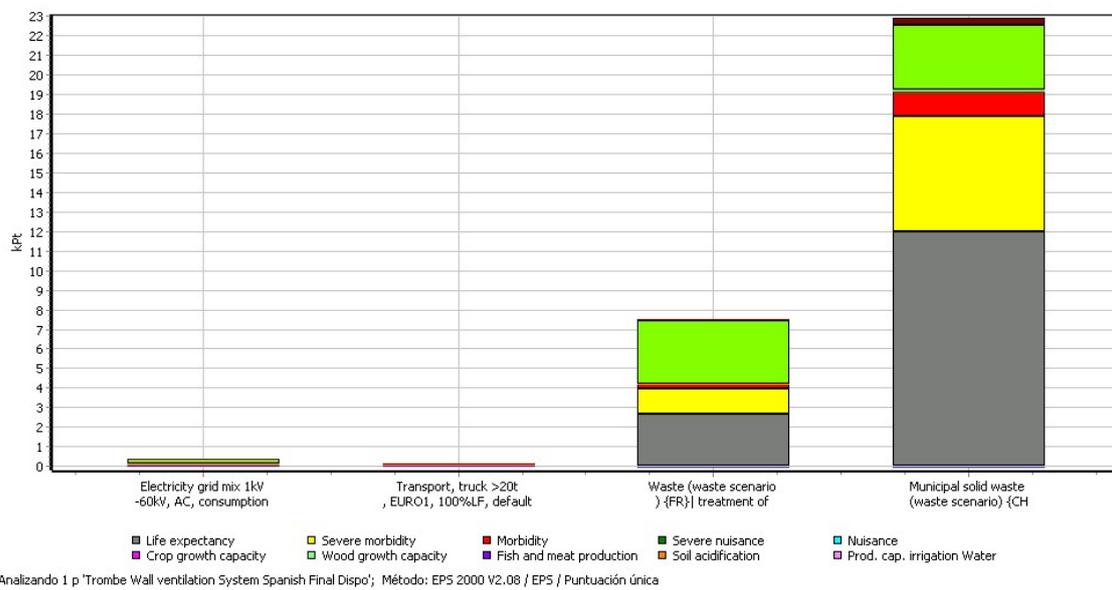


Figura 8.8: Impactos ambientales del sistema de ventilación con muro Trombe. Fase de disposición final. Puntuación única. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

8.1.7.3. Impactos ambientales. Ciclo de vida

Durante el ciclo de vida del sistema de ventilación con muro Trombe, la fase de uso evita los mayores impactos ambientales debido a la producción de energía, como se muestra en la Fig. 8.9.

El uso del sistema evita costes ambientales, entre otros, de 604921.21 ELUs sobre el agotamiento de reservas, de 15308.11 ELUs sobre la esperanza de vida y de 2623.44 ELUs sobre la morbilidad severa.

Los materiales usados por los equipos del sistema causan costes ambientales principalmente sobre el agotamiento de reservas, con 55210.07 ELUs; sobre la esperanza de vida, con 27757.98 ELUs; y sobre la morbilidad severa, con 7289.52 ELUs.

La disposición final del sistema evita daños ambientales principalmente sobre la capacidad de crecimiento de madera y la producción de pescado y carne, con 83.98 ELUs y 5.19 ELUs, respectivamente. Los mayores costes ambientales se producen sobre la esperanza de vida, sobre la morbilidad severa y sobre el agotamiento de reservas, con un coste de 14774.06 ELUs, 7226.96 ELUs y 6931.12 ELUs, respectivamente. Los detalles de los impactos ambientales en todas las categorías de daño se presentan en la Tabla 8.12.

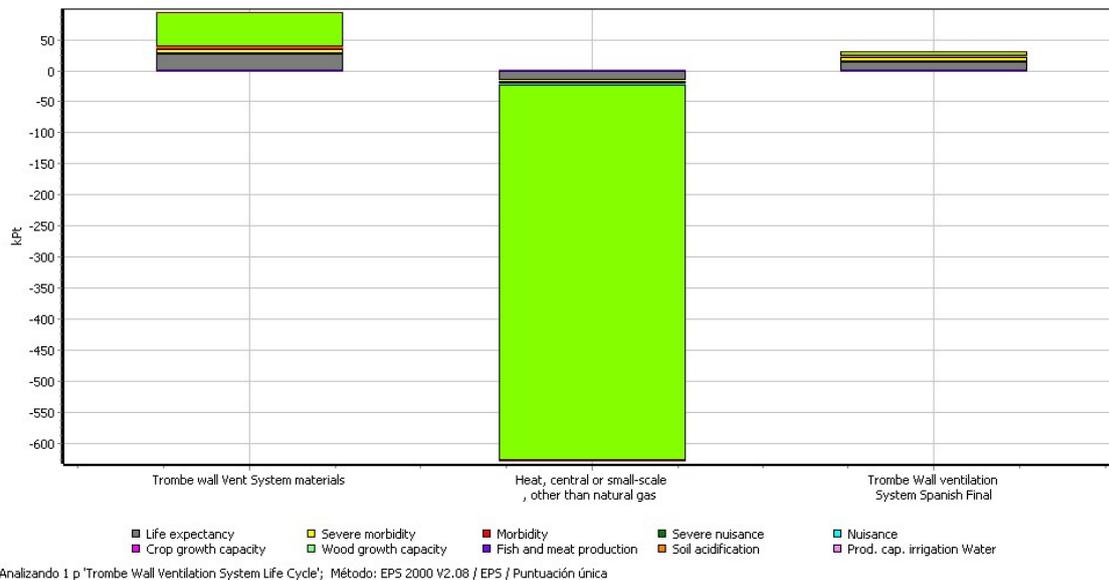


Figura 8.9: Impactos ambientales del sistema de ventilación con muro Trombe. Ciclo de vida. Puntuación única. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

Tabla 8.12: Impactos ambientales del sistema de ventilación, con muro Trombe. Datos calculados usando el *software* SimaPro8.

| Categoría de daño | Unidad | Total | Montaje | Uso: producción energía | Disposición final |
|---|--------|------------|----------|----------------------------|-------------------|
| Esperanza de vida | ELU | 27223.93 | 27757.98 | -15308.11 | 14774.06 |
| Morbilidad severa | ELU | 11893.31 | 7289.52 | -2623.17 | 7226.96 |
| Morbilidad | ELU | 2616.00 | 1555.81 | -444.88 | 1505.07 |
| Molestia severa | ELU | -3023.06 | 528.11 | -3567.37 | 16.20 |
| Molestia | ELU | 342.47 | 766.08 | -463.39 | 39.78 |
| Capacidad de crecimiento de maíz | ELU | 136.55 | 87.30 | -27.03 | 76.28 |
| Capacidad de crecimiento de madera | ELU | -370.17 | -391.06 | 104.88 | -83.98 |
| Producción de pescado y carne | ELU | -16.16 | -117.44 | 6.47 | -5.19 |
| Acidificación del suelo | ELU | 10.10 | 20.18 | -11.34 | 1.26 |
| Capacidad de producción de agua para irrigación | ELU | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Capacidad de producción de agua potable | ELU | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Agotamiento de reservas | ELU | -542780.01 | 55210.07 | -604921.21 | 6931.12 |
| Extinción de especies | ELU | 683.16 | 397.60 | -113.48 | 399.04 |
| Total | ELU | -503283.87 | 93204.16 | -627368.64 | 30880.61 |

8.2. Nomenclatura y Abreviaciones

| | |
|-------------------|---|
| A_{sw} | área del muro Trombe (m^2) |
| $A_{sol,k}$ | área efectiva de colección de energía solar del muro Trombe (m^2) |
| ϵ | emisividad de la superficie de vidrio |
| $F_{sh,ob,k}$ | factor de reducción de sombras de los obstáculos externos |
| F_h | factor de reducción de sombras de los obstáculos desde el horizonte o desde otros elementos del edificio |
| F_o | factor de reducción de sombras de los obstáculos a partir de la superposición de elementos horizontales en el acristalamiento |
| F_f | factor de reducción de sombras de los obstáculos a partir de la superposición de elementos verticales en el acristalamiento |
| $F_{r,k}$ | factor de forma entre el muro Trombe y el cielo |
| $F_{sh,gl}$ | factor de reducción del sombreado debido a dispositivos móviles |
| $f_{sh,with}$ | fracción de tiempo con los dispositivos activos de sombreado |
| F_F | fracción acristalada |
| G_{sul} | promedio mensual de la energía solar incidente en el sur (kWh/m^2 mes) |
| g_w | transmitancia de la energía solar a través de los cristales que cubren la capa de aire |
| g_{\perp} | factor solar del acristalamiento |
| $g_{\perp} 100\%$ | factor solar del acristalamiento con los dispositivos de sombreado 100 % activos |
| GD | grados día ($^{\circ}C$ día) |
| H | coeficiente de transferencia de calor ($W/^{\circ}C$) |
| H_0 | ($W/(m^{\circ}C)$) coeficiente de transferencia de calor del muro Trombe no ventilado |
| h_t | distancia entre los puntos medios de la parte superior y la parte inferior de las rejillas de ventilación (m) |
| L | espacio entre la pared y el primer acristalamiento (m) |
| h_r | coeficiente de transferencia de calor por radiación de la capa de aire ($W/(m^2^{\circ}C)$) |
| h_c | coeficiente de transferencia de calor por conducción de la capa de aire ($W/(m^2^{\circ}C)$) |
| I_w | irradiancia solar, la energía media de la irradiación solar en la temporada de calefacción ($WMseg/m^2$) |
| I_r | irradiancia solar, la energía media de la irradiación solar en la temporada de refrigeración (kWh/m^2) |
| $I_{sol,k}$ | irradiancia solar, la energía media de la irradiación solar en la temporada de calefacción (W/m^2) |
| K_{sw} | parámetros adimensionales función de la tasa de flujo de aire a través de la capa ventilada |
| M | duración de la temporada de calefacción (mes) |
| $Q_{gn,sw}$ | ganancias de calor solar (MJ) |
| $Q_{ht,al}$ | pérdidas de calor (MJ) |
| Q_{sol} | ganancias de calor solar (MJ) |
| Q_{trans} | transferencia de calor a través del muro Trombe (MJ) |
| $q_{ve,sw}$ | valores establecidos de la de flujo de aire a través de la capa ventilada (m^3/s) |
| PV | fotovoltaica |

| | |
|-------------------|--|
| R_i | resistencia térmica interna de la pared, entre la capa de aire y el ambiente interno ($(^{\circ}\text{C})/\text{W}$) |
| R_{si} | resistencia térmica interna superficial ($(\text{m}^2\ ^{\circ}\text{C})/\text{W}$) |
| R_1 | resistencia térmica de la masa de pared ($(\text{m}^2\ ^{\circ}\text{C})/\text{W}$) |
| R_e | resistencia térmica de la masa de pared, entre la capa de aire y el entorno externo ($(\text{m}^2\ ^{\circ}\text{C})/\text{W}$) |
| R_{se} | resistencia térmica externa superficial ($(\text{m}^2\ ^{\circ}\text{C})/\text{W}$) |
| R_{ee} | resistencia térmica del acristalamiento ($(\text{m}^2\ ^{\circ}\text{C})/\text{W}$) |
| S | zona de las aberturas de ventilación (m^2) |
| t | longitud de la temporada considerada (Megasegundos) |
| t_1 | duración de la temporada de calefacción (h) |
| U_0 | coeficiente de transferencia de calor del muro Trombe ($\text{W}/(\text{m}^2\ ^{\circ}\text{C})$) |
| U_i | coeficiente de transferencia de calor ($\text{W}/(\text{m}^2\ ^{\circ}\text{C})$) del elemento interno en el muro Trombe |
| U_e | coeficiente de transferencia de calor ($\text{W}/(\text{m}^2\ ^{\circ}\text{C})$) del elemento externo en el muro Trombe |
| α | coeficiente de absorción solar de la superficie exterior de la pared masiva |
| δ | proporción acumulada de la diferencia de temperatura interna, externa cuando la ventilación se realiza a través de los respiraderos |
| $\phi_{sol,mn,k}$ | tiempo promedio de tasa de flujo de calor desde la fuente de calor interna en el espacio no condicionado adyacente (W) |
| $\phi_{r,k}$ | flujo de calor adicional debido a la radiación térmica al cielo desde el muro Trombe (W) |
| γ_{al} | relación entre la ganancia térmica solar y la pérdida de calor de la capa de aire |
| θ_i | temperatura del ambiente interno ($^{\circ}\text{C}$) |
| θ_1 | temperatura de la capa de aire ($^{\circ}\text{C}$) |
| θ_e | temperatura del ambiente exterior ($^{\circ}\text{C}$) |
| $\Delta\theta$ | promedio de la diferencia entre la temperatura exterior y la temperatura aparente del cielo |
| $\rho_a c_a$ | capacidad de almacenamiento de calor de aire por volumen ($\text{J}/(\text{m}^3\ ^{\circ}\text{C})$) |
| ω | parámetros adimensionales que representan la proporción de la radiación solar total cayendo sobre el elemento cuando la capa de aire está abierta |
| \dot{m} | air flow rate (kg/s) |
| k_a | conductividad térmica del aire ($\text{W}/(\text{m}\ ^{\circ}\text{C})$) |
| k_w | conductividad térmica de la pared ($\text{W}/(\text{m}\ ^{\circ}\text{C})$) |
| Gr | número de Grashof |
| Pr | número de Prandtl |
| Re | número de Reynold's |
| CO_2 | dióxido de carbono |

CAPÍTULO 9

Sistema de Calefacción con Caldera de Gasóleo

RESUMEN: En el presente Capítulo, se presentan las características de la instalación térmica del edificio Aulario. Se define la instalación de calefacción usada actualmente con caldera de gasóleo y se describen los equipos usados y sus características técnicas. En base a este análisis se calcula: en la fase de montaje del sistema, la cantidad y tipo de materiales usados en su fabricación; en la fase de uso, se tiene en cuenta el tipo y cantidad de combustible usado para la operación del sistema durante una vida útil de 30 años; y en la fase de disposición final, se elabora el escenario de disposición final del sistema en España, donde se calcula el porcentaje de materiales del sistema que se reciclan. Finalmente, se evalúa el desempeño energético y ambiental del sistema.

9.1. Sistema de calefacción actual con caldera de gasóleo

El edificio Aulario cubre los requerimientos energéticos de calefacción a través de la instalación térmica formada por dos calderas de gasóleo. El sistema está formado por la instalación de calefacción y la instalación de climatización. En el presente estudio se tiene en cuenta la instalación de calefacción.

9.1.1. Instalación térmica

Se describen las características de la instalación térmica en base a los siguientes trabajos previos: inventario de equipos térmicos realizado por la Universidad de Valladolid en el Proyecto de Reforma del Aulario Campus Esgueva (Blanco, 1992); el inventario realizado por el Ente Regional de la Energía (EREN) (EREN, 2007) y el Proyecto Fin de Grado donde se realizó el estudio energético del edificio (Torres, 2009). El edificio Aulario no cuenta con los manuales técnicos de los equipos, por lo que se buscaron en Internet sus características para incluir los datos de material y peso, y de esta manera tener un inventario completo de los equipos que conforman el sistema de calefacción usado actualmente. En caso de encontrarse el equipo descatalogado, se han tomado los datos de los catálogos técnicos de otros equipos con características similares.

La instalación de calefacción tiene dos grupos térmicos o generadores de calor y la red de distribución y consumo. En la Fig. 9.1 se muestra el circuito de calor (EREN, 2007).

Cada grupo térmico está formado por una caldera y su quemador, una bomba de circulación, dos válvulas de aislamiento, un servomotor, una centralita de regulación, dos válvulas de seguridad, un vaso de expansión, las válvulas de corte, la red de tuberías y la chimenea, como se aprecia en las Figs. 9.2: (a) y (b).

Las calderas mostradas en la Fig. 9.3 se encuentran bien aisladas y mantenidas. La primera caldera, marca ROCA modelo NTD-165, tiene una potencia de 191 kW, como se describe en la Tabla 9.1. Las características de fabricación se toman del catálogo general BaxiRoca (BaxiRoca, 2011a), donde se elige el modelo CPA-130 con 385 kg de peso fabricada en acero. Se elige esta caldera por su similitud con el volumen de agua manejado, esto es, 170 litros. La segunda caldera, marca ROCA, modelo NTD-200, tiene una potencia de 232 kW (ver la Tabla 9.2. Las características de fabricación se toman del modelo CPA-160 con 425 kg de peso fabricada en acero. Esta caldera tiene una capacidad mayor de volumen de agua manejado: 180 litros. La caldera NTD-200 actualmente en uso maneja 176 litros de agua.

Los quemadores de la primera y segunda caldera se muestran en las Tablas 9.3 y 9.4. Las características de fabricación se toman del catálogo general BaxiRoca (BaxiRoca, 2011a), donde se elige el modelo THECNO-100-L, fabricado en acero con 73 kg de peso. Este quemador procesa un caudal de combustible entre 30-30.6 kg/h, similar al máximo manejado por los quemadores usados en la actualidad, de 30 kg/h.

Las bombas de circulación son marca Grundfos (ver descripción en las Tablas 9.5 y 9.6). La bomba modelo UMC 40-30 se encuentra descatalogada, por lo que sus características de fabricación se toman del catálogo general de Grundfos (Grundfos, 2011), donde se elige el modelo UPS 40-30F con 20.1 kg de peso. El manual técnico de las bombas no detalla la cantidad de cobre usado en el bobinado, por lo que no se incluye en este estudio.

Se requieren dos válvulas de aislamiento por cada caldera, descritas en la Tabla 9.7. Las características de fabricación se toman del manual técnico de Sauter (Sauter, 2010), del modelo DEF 065 F200 fabricado en fundición gris con aproximadamente 4.05 kg de peso.

El servomotor es de plástico y acero inoxidable, y su descripción se muestra en la Tabla 9.8. El servomotor modelo AR30W13 se encuentra descatalogado, por lo que se toman las características de fabricación del catálogo general Suter (Sauter, 2010), donde se elige el modelo AR30W23 F001 fabricado en fundición de aleación ligera con aproximadamente 1.1 kg de peso, debido a que el tiempo de giro es de 120 s para 90°. El modelo usado AR30W13 tiene un tiempo de giro de 110 s para 90°.

Respecto de la centralita de regulación, se considera que está fabricada principalmente en plástico, cuyas características se resumen en la Tabla 9.9. La centralita de regulación modelo Sauter Flexotron 2000 se encuentra descatalogada, por lo que se toman las características de fabricación de las especificaciones técnicas de Testgut (Testgut, 2002), donde se elige el modelo D116 fabricado principalmente en plástico con aproximadamente 0.7 kg de peso. Se elige este equipo porque permite la regulación de sistemas de calefacción a baja y alta

temperatura en función de la temperatura exterior.

Las válvulas de seguridad son de latón forjado (ver Tabla 9.10). Las características de fabricación se toman del catálogo general de Jefferson (Lupatech, 2013), donde se elige la válvula solenoide de dos vías serie 1342 con 1 1/2" de diámetro de salida, fabricada en latón forjado, con aproximadamente 3.1 kg de peso.

Los vasos de expansión están fabricados en acero (ver Tabla 9.11). Las características de fabricación se toman del catálogo técnico de Industrias Ibaiondo (Ibaiondo, 2012). Se elige el modelo 400CMF, con capacidad de 400 l, fabricado en acero, con aproximadamente 56 kg de peso.

Las válvulas de corte están fabricadas en latón, como se describe en la Tabla (9.12). Las características de fabricación se toman del catálogo general (Sauter, 2010), donde se elige el modelo DEF032F200 usado en la regulación continua de agua, aire y vapor de agua (uso actual), con aproximadamente 1.15 kg de peso.

El material de la red de tuberías es de hierro galvanizado (ver Tabla 9.13). Las características de fabricación se toman del catálogo general Daunis (Daunis, 2014). Se elige el modelo DIN 2440, con aproximadamente 3.25 kg/m de peso.

Por último se considera la chimenea, fabricada en aluminio y acero, como se muestra en la Tabla 9.14. Las características de fabricación se toman del catálogo general Dinak (Dinak, 2014). Se elige el modelo 036CPD90220008, fabricado en acero inoxidable con aproximadamente, 7.3 kg de peso.

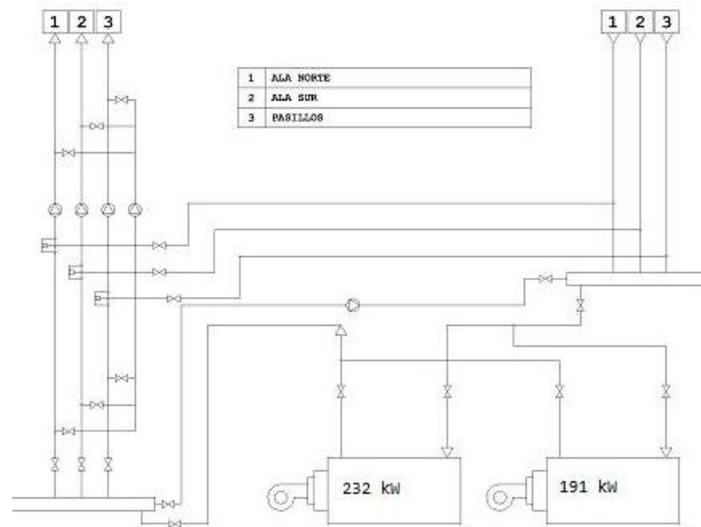
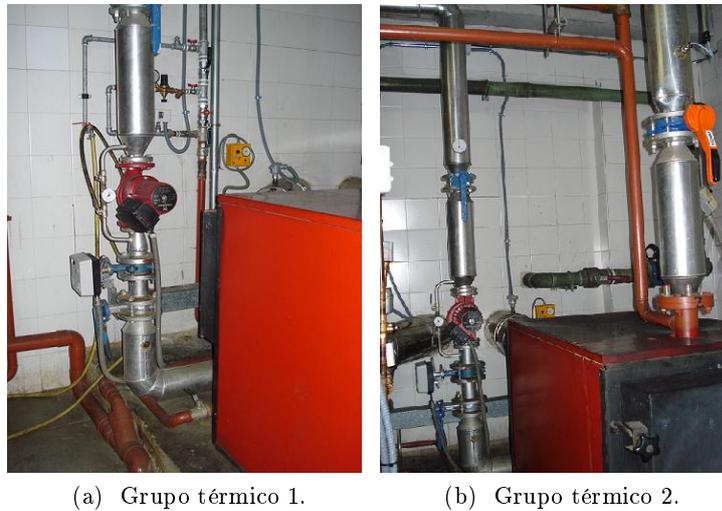


Figura 9.1: Circuito de calor del edificio aulario. Fuente:(EREN, 2007).



(a) Grupo térmico 1.

(b) Grupo térmico 2.

Figura 9.2: Equipos de los grupos térmicos.

Tabla 9.1: Características de la primera caldera de la instalación de calefacción. Fuente: (BaxiRoca, 2011a) y modificado de (Blanco, 1992; Torres, 2009).

| Equipo | Caldera |
|---------------------|-------------------|
| Unidades | 1 |
| Marca, modelo | BaxiRoca, CPA-130 |
| Combustible | Gasóleo |
| Fluido caloportador | Agua |
| Temp. máxima | 100 °C |
| Potencia | 191 kW |
| Rendimiento | 0.90 |
| Material y peso | Acero: 385 kg |

Tabla 9.2: Características de la segunda caldera de la instalación de calefacción. Fuente: (BaxiRoca, 2011a) y modificado de (Blanco, 1992; Torres, 2009).

| Equipo | Caldera |
|---------------------|-------------------|
| Unidades | 1 |
| Marca, modelo | BaxiRoca, CPA-160 |
| Combustible | Gasóleo |
| Fluido caloportador | Agua |
| Temp. máxima | 100 °C |
| Potencia | 232 kW |
| Rendimiento | 0.90 |
| Material y peso | Acero: 425 kg |



Figura 9.3: Calderas. Fuente:(Torres, 2009)

Tabla 9.3: Características del quemador de la primera caldera de la instalación de calefacción. Fuente: (BaxiRoca, 2011a) y modificado de (Blanco, 1992; Torres, 2009).

| Equipo | Quemador de la primera caldera |
|-----------------|---------------------------------------|
| Unidades | 1 |
| Marca, modelo | BaxiRoca, THECNO-100-L |
| Combustible | Gasóleo |
| Consumo | 15-30 kg/h |
| Potencia | 177-355 kW |
| Tensión | 220 V |
| Material y peso | Acero: 73 kg |

Tabla 9.4: Características del quemador de la segunda caldera de la instalación de calefacción. Fuente: (BaxiRoca, 2011a) y modificado de (Blanco, 1992; Torres, 2009).

| Equipo | Quemador de la segunda caldera |
|-----------------|---------------------------------------|
| Unidades | 1 |
| Marca, modelo | BaxiRoca, THECNO-100-L |
| Combustible | Gasóleo |
| Consumo | 15-30 kg/h |
| Potencia | 177-355 kW |
| Tensión | 220 V |
| Material y peso | Acero: 73 kg |

Tabla 9.5: Características de la bomba de circulación de la primera caldera de la instalación de calefacción. Fuente: (Grundfos, 2011) y modificado de (Blanco, 1992; Torres, 2009).

| Equipo | Bomba de circulación de la primera caldera |
|-----------------|--|
| Unidades | 1 |
| Marca, modelo | Grundfos, UMC 40-30 |
| Tensión | 400/3/50 |
| Potencia | 80-140 kW |
| Intensidad | 0.17-0.52 A. |
| Material y peso | Hierro fundido: 20.1 kg |

Tabla 9.6: Características de la bomba de circulación de la segunda caldera de la instalación de calefacción. Fuente:(Grundfos, 2011) y modificado de (Blanco, 1992; Torres, 2009).

| Equipo | Bomba de circulación de la segunda caldera |
|-----------------|--|
| Unidades | 1 |
| Marca, modelo | Grundfos, UMC 40-30 |
| Tensión | 400/3/50 |
| Potencia | 50-235 kW |
| Intensidad | 0.11-0.76 A. |
| Material y peso | Hierro fundido: 20.1 kg |

Tabla 9.7: Características de la válvula de aislamiento de la instalación de calefacción. Fuente: (Sauter, 2010) y modificado de (Blanco, 1992).

| Equipo | Válvula de aislamiento |
|-----------------|-------------------------------|
| Marca, modelo | Sauter, DEF 065 F200 |
| Unidades | 4 |
| Material y peso | Fundición gris: 4.05 kg |

Tabla 9.8: Características del servomotor de la instalación de calefacción. Fuente: (Sauter, 2010) y modificado de (Blanco, 1992).

| Equipo | Servomotor |
|-------------------------|-------------------------|
| Unidades | 2 |
| Marca, modelo | Sauter, AR30W23 F001 |
| Tensión de alimentación | 220 V |
| Tiempo de giro | 90° en 110sg |
| Material y peso | Aleación ligera: 1.1 kg |

Tabla 9.9: Características de la centralita de regulación de la instalación de calefacción. Fuente: (Testgut, 2002) y modificado de (Blanco, 1992).

| Equipo | Centralita de regulación |
|-----------------|---------------------------------|
| Unidades | 2 |
| Marca, modelo | Testgut, D116 |
| Material y peso | Plástico: 0.7 kg |

Tabla 9.10: Características de la válvula de seguridad de la instalación de calefacción. Fuente: (Lupatech, 2013) y modificado de (Blanco, 1992).

| Equipo | Válvula de seguridad |
|-----------------|----------------------------------|
| Marca, modelo | Jefferson, solenoide de dos vías |
| Serie | 1342 con 1 1/2" |
| Unidades | 4 |
| Material y peso | Latón forjado: 3.1 kg |

Tabla 9.11: Características de los vasos de expansión de la instalación de calefacción. Fuente: (Ibaiondo, 2012) y modificado de (Blanco, 1992).

| Equipo | Vasos de expansión |
|-----------------|---------------------------|
| Marca, modelo | Ibaiondo, 400CMF |
| Unidades | 2 |
| Material y peso | Acero: 56 kg |

Tabla 9.12: Características de las válvula de corte de la instalación de calefacción. Fuente: (Sauter, 2010) y modificado de (Blanco, 1992).

| Equipo | Válvulas de corte |
|-----------------|--------------------------|
| Unidades | 2 |
| Marca, modelo | Sauter, DEF032F200 |
| Material y peso | Latón: 1.15 kg |

Tabla 9.13: Características de la red de tuberías de la instalación de calefacción. Fuente: (Daunis, 2014) y modificado de (Blanco, 1992).

| Equipo | Tubería |
|-----------------|-------------------------------|
| Tipo | tubo negro o galvanizado ISO |
| Marca, modelo | Daunis, DIN 2440 |
| Longitud | 20 m |
| Paso nominal | 1 1/2" |
| Material y peso | Hierro galvanizado: 3.25 kg/m |

Tabla 9.14: Características de la chimenea de la instalación de calefacción. Fuente: (Dinak, 2014), modificado de (Blanco, 1992).

| Equipo | Chimenea |
|-----------------|--------------------------|
| Marca, modelo | Dinak, 036CPD90220008 |
| Unidades | 2 |
| Material y peso | Acero inoxidable: 7.3 kg |

9.1.2. Red de distribución y consumo

La red de distribución y consumo está formada por bombas de circulación, válvulas de tres vías, servomotor, centralitas de regulación, depósito de gasóleo, grupo de gasóleo, tuberías y los cuadros eléctrico y de control. Como emisores se usan radiadores de agua caliente. El sistema de distribución se muestra en las Fig. 9.4: (a) y (b).

La distribución se realiza mediante dos bombas de circulación por circuito (norte, centro y sur) para un total de seis bombas. Las bombas son marca Grundfos (Grundfos, 2011) con potencia entre 145-545 kW fabricadas en acero. Los modelos y las características de fabricación se detallan a continuación. El circuito norte usa dos bombas de circulación modelo UPS40-120F, de 20.4 kg de peso (ver Tabla 9.15). Los circuitos centro y sur usan cuatro bombas de circulación modelo UPS32-120F, de 18.6 kg de peso (ver Tabla 9.16). El manual técnico de las bombas no detalla la cantidad de cobre usado en el bobinado, por lo que no se incluye en este estudio.

Se requieren dos válvulas de tres vías por circuito, es decir, un total de seis (ver la Tabla 9.17). Las características de fabricación de las válvulas se toman del catálogo técnico Esbe (Esbe, 2009-2010), encontrando que el modelo VLE132 DN40 está fabricado en latón y tiene un peso de 2.9 kg.

El servomotor marca Sauter modelo AR30W13 (Sauter, 2010), con tensión de alimentación de 230 V, está fabricado en aleación ligera con 1.1 kg de peso, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 9.18.

La centralita de regulación Sauter Equitherm-M10 EQJW120 se encuentra descatalogada, por lo que se toman las características de fabricación de las especificaciones técnicas de Testgut (Testgut, 2002), donde se elige el modelo D116, fabricado principalmente en plástico, con aproximadamente 0.7 kg de peso, como se muestra en la Tabla 9.19.

El depósito de gasóleo, tiene un volumen de 7000 l. Las características de fabricación se tomaron del catálogo técnico de Salvador Escoda (BaxiRoca, 2011b), donde se elige la Marca Salvador Escoda, modelo, GA 01 112 fabricado en acero, con capacidad de 8000 l y peso 1700 kg, como se muestra en la Tabla 9.20.

El grupo gasóleo, marca Calpeda modelo MCAM-80, se encuentra descatalogado, por lo que se tomaron las características de fabricación del catálogo técnico Calpeda (Calpeda, 2007) modelo CA80E con 6 kg de peso, fabricado en hierro, latón, acero y cerámicos. Debido a que en el catálogo no se desglosa el porcentaje en peso de cada uno de los materiales mencionados, se asume que está fabricada 100 % en acero. Las características se muestran en la Tabla 9.21.

La instalación de distribución está compuesta por las tuberías generales, los cuadros eléctrico y de control y las llaves de corte.

Las tuberías, descritas en la Tabla 9.22, son de hierro bitubo. Algunas se encuentran a la vista y otras empotradas. Se asume que las características de las tuberías de distribución

son las mismas de las tuberías usadas en la sala de calderas, descritas en la Tabla 9.13. Se calcula la longitud de la red de tuberías del sistema de distribución, encontrándose 871.4 m de tubería, aproximadamente.

Para conocer las características de fabricación de los cuadros eléctrico y de control se procedió, vía Internet, a la consulta de las que pudieran proporcionar los fabricantes. Sin embargo, toda vez que esta información parece reservada, se ha asumido que en su fabricación se usa principalmente plástico (90 %) y cables de cobre (10 %), con un peso total de 5 kg. Su descripción se encuentra en la Tabla 9.23.

La red de radiadores están distribuidos en 3 circuitos de ida y otros tantos de retorno: circuito norte, circuito sur y circuito zona de pasillos. Los radiadores mostrados en la Fig. 9.5 son marca FERROLI modelo EUROPA 600, están fabricados en aluminio, y sus características se describen en la Tabla 9.26. Las dimensiones de los elementos son: 581 mm de alto, 100 mm de profundidad, 80 mm de ancho y 1.85 kg de peso. El salto térmico para una diferencia de temperaturas de 60°C es de 152.30 W por elemento (EREN, 2007). En las Tablas 9.24 y 9.25 se describen las principales características de la red de radiadores ubicados en la planta baja y en la primera planta.



(a) Sistema de distribución.



(b) Centralita de regulación.

Figura 9.4: Sistema de distribución y consumo

Tabla 9.15: Características de la bomba de circulación del circuito norte del sistema de distribución y consumo. Fuente: (Grundfos, 2011) y modificado de (Blanco, 1992).

| Equipo | Bomba de circulación |
|-----------------|-----------------------------|
| Unidades | 2 |
| Marca, Modelo | Grundfos, UPS 40-120 |
| Tensión | UPC 400/3/50 |
| Potencia | UPC 145-545 W |
| Intensidad | UPC 0.27/1.13 A |
| Conexión | UPC DN40 bridas |
| Material y peso | Acero inoxidable: 20.4 kg |

Tabla 9.16: Características de la bomba de circulación de los circuitos centro y sur del sistema de distribución y consumo. Fuente: (Grundfos, 2011) y modificado de (Blanco, 1992).

| Equipo | Bomba de circulación |
|-----------------|-----------------------------|
| Unidades | 2 |
| Marca, modelo | Grundfos, UPS 32-120 |
| Tensión | UPC 400/3/50 |
| Potencia | UPC 120-485 W |
| Intensidad | UPC 0.23/1.05 A |
| Conexión | UPC DN32 bridas |
| Material y peso | Acero inoxidable: 18.6 kg |

Tabla 9.17: Características de la válvula de tres vías del sistema de distribución y consumo. Fuente: (Esbe, 2009-2010) y modificado de (Blanco, 1992).

| Equipo | Válvula de tres vías |
|-----------------|-----------------------------|
| Unidades | 6 |
| Marca, modelo | Esbe, VLE132 DN40 |
| Material y peso | Latón: 2.9 kg |

Tabla 9.18: Características del servomotor del sistema de distribución y consumo. Fuente: (Sauter, 2010) y modificado de (Blanco, 1992).

| Equipo | Servomotor |
|-----------------|-------------------------|
| Unidades | 1 |
| Marca, modelo | Sauter, AR30W13 |
| Tensión | 230 V |
| Tiempo de giro | 90° en 110s |
| Material y peso | Aleación ligera: 1.1 kg |

Tabla 9.19: Características de la centralita de regulación del sistema de distribución y consumo. Fuente: (Testgut, 2002) y modificado de (Blanco, 1992).

| Equipo | Centralita de regulación |
|-----------------|---------------------------------|
| Unidades | 1 |
| Marca, modelo | Sauter, Equitherm-M10 EQJW120 |
| Tensión | 230 V |
| Reloj | Semanal |
| Material y peso | Plástico: 0.7 kg |

Tabla 9.20: Características del depósito de gasóleo del sistema de distribución y consumo. Fuente: (BaxiRoca, 2011b) y modificado de (Blanco, 1992).

| Equipo | Depósito de gasóleo |
|-----------------|----------------------------|
| Unidades | 1 |
| Marca, modelo | Salvador Escoda, GA 01 112 |
| Volumen | 8000 l |
| Material y peso | Acero: 1700 kg |

Tabla 9.21: Características de grupo gasóleo del sistema de distribución y consumo. Fuente: (Calpeda, 2007) y modificado de (Blanco, 1992).

| Equipo | Grupo gasoil |
|-----------------|---------------------|
| Unidades | 1 |
| Marca, modelo | Calpeda, CA80E |
| Caudal | 300 l |
| Material y peso | Hierro: 6 kg |

Tabla 9.22: Características de la tuberías del sistema de distribución y consumo. Fuente: (Daunis, 2014) y modificado de (Blanco, 1992).

| Equipo | Tuberías |
|-----------------|-------------------------------|
| Sistema | Bitubo, por circuitos |
| Tipo | Tubo negro o galvanizado ISO |
| Marca, modelo | Daunis, DIN 2440 |
| Longitud | 871.4 m |
| Paso nominal | 1 1/2" |
| Material y peso | Hierro galvanizado: 3.25 kg/m |

Tabla 9.23: Características del cuadro eléctrico del sistema de distribución y consumo. Fuente: Modificado de (Blanco, 1992).

| Equipo | Cuadro eléctrico |
|--------------------------|-------------------------------|
| Unidades | 1 |
| Seta de desconexión | Sí, en vestíbulo |
| Protecciones generales | Sí |
| Protecciones por equipo | Sí |
| Guardamotores bombas | Sí |
| Lámparas de señalización | Sí |
| Material y peso | Plástico: 4 kg Cobre: 1 kg |

Tabla 9.24: Inventario de equipos térmicos: sistema de calefacción. Red de radiadores en la planta baja. Fuente: (EREN, 2007).

| Zona | Modelo | No radiadores | Nº elementos radiador | W/elemento $\Delta T=60^{\circ}\text{C}$ | kW total |
|---------------------|--------|---------------|-----------------------|--|----------|
| Aula 1 | EU-600 | 6 | 11 | 152.30 | 10.05 |
| Aula 2 | EU-600 | 6 | 11 | 152.30 | 10.05 |
| Aula 3 | EU-600 | 6 | 11 | 152.30 | 10.05 |
| Aula 4 | EU-600 | 6 | 11 | 152.30 | 10.05 |
| Seminario 1 | EU-600 | 2 | 11 | 152.30 | 3.35 |
| Servicios alumnos 1 | EU-600 | 1 | 21 | 152.30 | 3.50 |
| Servicios alumnos 2 | EU-600 | 1 | 23 | 152.30 | 18.28 |
| Vestíbulo | EU-600 | 6 | 20 | 152.30 | 18.28 |
| Pasillo 1 | EU-600 | 4 | 8 | 152.30 | 4.87 |
| | EU-600 | 2 | 11 | 152.30 | 3.35 |
| Pasillo 2 | EU-600 | 4 | 8 | 152.30 | 4.87 |
| | EU-600 | 2 | 11 | 152.30 | 3.35 |
| Aula 6 | EU-600 | 6 | 11 | 152.30 | 10.05 |
| Aula 7 | EU-600 | 6 | 11 | 152.30 | 10.05 |
| Aula 8 | EU-600 | 6 | 11 | 152.30 | 10.05 |
| Seminario 2 | EU-600 | 2 | 11 | 152.30 | 3.35 |
| Servicios alumnas 2 | EU-600 | 1 | 21 | 152.30 | 3.20 |
| Servicios alumnos 2 | EU-600 | 1 | 23 | 152.30 | 3.50 |

Tabla 9.25: Inventario de equipos térmicos: sistema de calefacción. Red de radiadores en la primera planta. Fuente:(EREN, 2007).

| Zona | Modelo | No radiadores | Nº elementos radiador | W/elemento $\Delta T=60^{\circ}\text{C}$ | kW total |
|---------------------|--------|---------------|-----------------------|--|----------|
| Sala de estudio | EU-600 | 12 | 11 | 152.30 | 20.10 |
| Aula 1 | EU-600 | 6 | 12 | 152.30 | 10.97 |
| Aula 2 | EU-600 | 6 | 12 | 152.30 | 10.97 |
| Seminario 1 | EU-600 | 2 | 11 | 152.30 | 3.35 |
| Servicios alumnos 1 | EU-600 | 1 | 22 | 152.30 | 3.35 |
| Servicios alumnas 1 | EU-600 | 1 | 25 | 152.30 | 3.81 |
| Vestíbulo | EU-600 | 2 | 17 | 152.30 | 5.18 |
| | EU-600 | 2 | 14 | 152.30 | 4.26 |
| Pasillo 1 | EU-600 | 2 | 10 | 152.30 | 3.05 |
| | EU-600 | 2 | 8 | 152.30 | 2.44 |
| | EU-600 | 2 | 11 | 152.30 | 3.35 |
| Pasillo 2 | EU-600 | 2 | 10 | 152.30 | 3.05 |
| | EU-600 | 2 | 8 | 152.30 | 2.44 |
| | EU-600 | 2 | 11 | 152.30 | 3.35 |
| Aula 3 | EU-600 | 6 | 12 | 152.30 | 10.97 |
| Aula 4 | EU-600 | 6 | 12 | 152.30 | 10.97 |
| Aula 5 | EU-600 | 6 | 11 | 152.30 | 10.05 |
| Aula 6 | EU-600 | 6 | 11 | 152.30 | 10.05 |
| Seminario 2 | EU-600 | 2 | 11 | 152.30 | 3.35 |
| Servicio alumnas 2 | EU-600 | 1 | 22 | 152.30 | 3.35 |
| Servicio alumnos 2 | EU-600 | 1 | 25 | 152.30 | 3.81 |

Tabla 9.26: Características de los radiadores del sistema de calefacción. Fuente: (Ferroli, 2014) y modificado de (EREN, 2007).

| Nombre | Emisores |
|--|-------------------|
| Tipo | Radiador |
| Unidades totales planta baja y primera planta | 140 |
| Dimensiones (Ancho/fondo/altura) | 80/100/781 |
| Emisión calorífica para un $\Delta T=60^{\circ}\text{C}$ | 152.30 W |
| Material y peso | Aluminio: 1.85 kg |



Figura 9.5: Radiador. Fuente:(Torres, 2009).

9.2. Fase de montaje del sistema de calefacción con caldera de gasóleo

La fase de montaje del sistema requiere conocer el tipo y cantidad de materiales usados para fabricar los equipos que forman el sistema, la energía requerida en la fabricación de estos equipos, el transporte de las materias primas hasta la fábrica, el transporte de los equipos hasta el edificio y la energía requerida para incorporar el sistema al edificio. En el presente estudio, sólo se definen los equipos básicos que debe tener el sistema y se calcula el tipo y cantidad de materiales requeridos para fabricar estos equipos. Las demás etapas de esta fase no se contemplan en este documento, por lo que se sugiere que sean objeto de futuras investigaciones.

Para el estudio de las características del sistema de calefacción con caldera de gasóleo se tienen en cuenta las instalaciones y los equipos descritos en la siguiente sección.

9.2.1. Características del sistema de calefacción con caldera de gasóleo

En base al análisis y cálculos anteriores, se definen las características del sistema de calefacción con caldera de gasóleo, teniendo en cuenta las instalaciones mostradas en la Fig. 9.6. Se encuentra que el sistema tiene un peso total de 5767.38 kg. Los detalles de los equipos, materiales y peso se describen en la Tabla 9.27, donde se detalla la instalación de calefacción y la instalación de distribución y consumo.

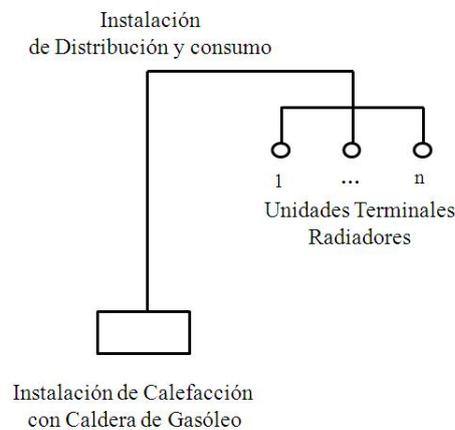


Figura 9.6: Esquema de la instalación de calefacción con caldera de gasóleo.

Tabla 9.27: Características del sistema de calefacción con caldera de gasóleo.

| Ubicación | Equipo | No. Unidades | Material | Peso/Unidad | Peso Total |
|---|---------------------------------|--------------|------------------|-------------|----------------|
| | | | | kg | kg |
| Instalación de calefacción con caldera de gasóleo | Caldera | 2 | Acero | 228 | 456 |
| | Quemador | 2 | Acero | 73 | 146 |
| | Bomba de circulación | 2 | Hierro | 20.1 | 40.2 |
| | Válvula de aislamiento | 4 | Hierro | 4.05 | 16.2 |
| | Servomotor | 2 | Hierro | 1.1 | 2.2 |
| | Centralita de regulación | 4 | Plástico | 0.7 | 1.4 |
| | Válvula de seguridad | 4 | Hierro | 3.1 | 12.4 |
| | Vaso de expansión | 2 | Acero | 56 | 112 |
| | Válvula de corte | 2 | Hierro | 1.15 | 2.3 |
| | Tubería (m) | 20 | Hierro | 3.25 | 65 |
| | Chimenea | 2 | Acero | 7.3 | 14.6 |
| Instalación de distribución y consumo | Radiadores | 140 | Aluminio | 1.85 | 259 |
| | Bomba de circulación UPS-40-120 | 2 | Acero inoxidable | 20.4 | 40.8 |
| | Bomba de circulación UPS-32-120 | 2 | Acero inoxidable | 18.6 | 37.2 |
| | Válvula de tres vías | 6 | Latón | 2.9 | 17.4 |
| | Servomotor | 1 | Aleación ligera | 1.1 | 1.1 |
| | Centralita de regulación | 2 | Plástico | 0.7 | 1.4 |
| | Tubería | 871.4 | Hierro soldado | 3.25 | 2832.18 |
| | Cuadro eléctrico | 1 | Plástico | 4 | 4 |
| | | | Cobre | 1 | 1 |
| Total | | | | | 5768.38 |

En base a las características del sistema de calefacción con caldera de gasóleo descritas en las secciones: 9.1.2, Red de distribución y consumo y 9.1.1, Instalación térmica, se calcula el tipo y cantidad de materiales usados en el montaje del sistema, como se muestra en la Tabla 9.28. Se encuentra que el sistema tiene un peso total de 5768.38 kg, de los cuales el acero constituye el 43 % y el hierro el 52 %. Los materiales usados en la fabricación de los equipos se tomaron de los manuales técnicos. Estos manuales no especifican la cantidad de cobre usada en la fabricación de los motores, por lo que se sugiere que sean objeto de futuras investigaciones.

Tabla 9.28: Montaje del sistema de calefacción actual con caldera de gasóleo. Fuente: modificado de (EREN, 2007).

| Materiales | Peso |
|-------------------|-------------|
| Acero | 2506.06 |
| Hierro | 2994.98 |
| Plástico | 6.80 |
| Aluminio | 259 |
| Total | 5768.38 |

9.3. Fase de uso del sistema de calefacción con caldera de gasóleo

En la presente sección se analiza la fase de uso del sistema de calefacción del edificio objeto de estudio. Para ello, se presenta un resumen del estudio previo del edificio, donde se realizó la evaluación energética obtenida por medio de simulación dinámica con EnergyPlus. Posteriormente, se informa sobre los datos de consumo térmico obtenidos de la factura de consumo de combustible para el funcionamiento de las calderas, que representa el mayor consumo energético del sistema. Seguidamente, se compara este dato con el obtenido por medio de la simulación con EnergyPlus. No se tiene en cuenta el consumo eléctrico para la operación del cuadro de control, debido a que no se encuentra desglosado dentro del consumo eléctrico total del edificio y se considera que su magnitud se puede despreciar respecto al consumo térmico. Finalmente, se analiza el desempeño energético del sistema de calefacción con caldera de gasóleo y se obtienen los impactos ambientales ocasionados.

9.3.1. Evaluación energética del edificio Aulario. Situación actual

El edificio cuenta con un estudio de evaluación energética (Blázquez, 2011). Dicho estudio parte de las cargas térmicas y evalúa las demandas energéticas del edificio objeto y del edificio de referencia. La evaluación del edificio de referencia se calcula usando las transmitancias térmicas mínimas exigidas por el CTE, y la del edificio objeto, usando las transmitancias térmicas de los materiales con los que fue construido el edificio. Respecto a la ventilación, el edificio de referencia usa los valores exigidos por el actual RITE, mientras que el edificio objeto tiene una ventilación inferior a la marcada por la normativa (RITE, 2007), debido a que en el momento de su construcción no se exigía la ventilación en edificios (Blázquez, 2011).

El estudio obtiene demandas de calefacción para el edificio objeto y de referencia de 330777.9 kWh/año y de 292961.7 kWh/año, respectivamente. Las demandas de refrigeración para el edificio objeto y de referencia son 20047.2 kWh/año y 44650.5 kWh/año, respectivamente, como puede observarse en la Tabla 9.29 y en la Fig. 9.7.

Tabla 9.29: Edificio Aulario. Demanda energética para los edificios objeto y de referencia. Fuente: (Blázquez, 2011).

| Demandas | Edificio objeto | Edificio referencia | Área | Edificio objeto | Edificio referencia |
|---------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|---------------------|
| | (kWh/m ²) | (kWh/m ²) | (m ²) | (kWh) | (kWh) |
| Calefacción | 72.6 | 64.3 | 4556.17 | 330777.9 | 292961.7 |
| Refrigeración | 4.4 | 9.8 | 4556.17 | 20047.2 | 44650.5 |

Tabla 9.30: Demanda térmica de calefacción del edificio Aulario. Fuente: modificado de (Blázquez, 2011).

| Demanda | Meses | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|---------|-----|-----|-----|-----|---------|----------|----------|
| | Ener | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
| (kWh/m ²) | 19.18 | 12.09 | 7.72 | 4.59 | 1.15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.62 | 9.34 | 17.87 |
| (kWh) | 85505.39 | 53897.82 | 34416.15 | 20462.45 | 5126.70 | | | | | 2763.99 | 41638.19 | 79665.35 |

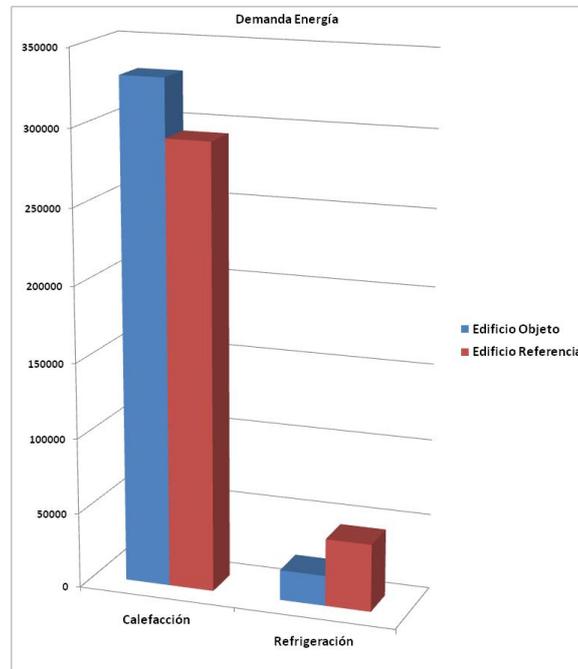


Figura 9.7: Edificio Aulario. Demanda energética para los edificios objeto y de referencia. Fuente: (Blázquez, 2011).

Tabla 9.31: Demanda de refrigeración del edificio Aulario. Fuente: modificado de (Blázquez, 2011).

| Demanda | Meses | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-----|-----|-------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|-----|-----|
| | Ener | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
| (kWh/m ²) | 0 | 0 | 0 | 0.02 | 0.21 | 0.45 | 1.30 | 1.54 | 0.72 | 0.21 | 0 | 0 |
| (kWh) | 0 | 0 | 0 | 89.16 | 936.19 | 2006.12 | 5795.47 | 6865.39 | 3209.79 | 936.19 | 0 | 0 |

9.3.2. Calificación energética del edificio Aulario. Situación actual

La calificación energética del edificio se obtiene de la comparación de las demandas del edificio objeto con el edificio de referencia. Observamos que el edificio objeto no cumple la normativa establecida en el DB HE1 en cuanto a la demanda de calefacción, debido a que dicha demanda es un 112 % la de calefacción del edificio de referencia mientras que sí cumple la normativa establecida en el DB HE1 en cuanto a la demanda de refrigeración, debido a que esta demanda es un 45 % la de refrigeración del edificio de referencia, como aparece reflejado en la Tabla 9.29 y en la Fig. 9.7. Las razones por las cuales el edificio aulario no cumple con la reglamentación exigida son las siguientes:

- La proporción relativa de calefacción no es acorde a la normativa.
- Existen elementos que superan los valores permitidos de transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica.
- Existen elementos para los que se producen condensaciones superficiales o intersticiales para las condiciones del mes de enero.

Respecto del impacto al medioambiente, el edificio produce emisiones anuales de CO₂ de 249484.30 kg (Blázquez, 2011) de las cuales 92829.00 kgCO₂, 12872.34 kgCO₂ y 143782.95 kgCO₂ son debidas al sistema de calefacción, refrigeración e iluminación, respectivamente, como se aprecia en la Tabla 9.32 y en la Fig. 9.8 (Blázquez, 2011).

En base a estos resultados, el edificio aulario obtiene la calificación energética global de C, como se observa en la Fig. 9.9 (Blázquez, 2011).

Tabla 9.32: Emisiones de CO₂. Fuente: (Blázquez, 2011).

| Emisiones de CO ₂ | Edificio objeto | Edificio referencia | Área (m ²) | Edificio objeto | Edificio referencia |
|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| | (kgCO ₂ /m ²) | (kgCO ₂ /m ²) | | (kgCO ₂) | (kgCO ₂) |
| Calefacción | 20.37 | 18.04 | 4556.17 | 92829.00 | 82222.06 |
| Refrigeración | 2.82 | 6.19 | 4556.17 | 12872.34 | 28231.68 |
| Iluminación | 31.55 | 31.55 | 4556.17 | 143782.95 | 143782.95 |
| Total | 54.75 | 55.80 | 4556.17 | 249484.30 | 254236.70 |

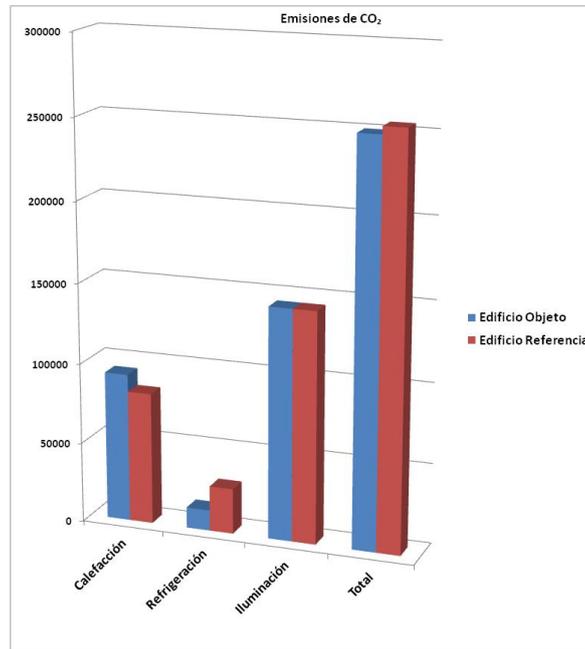


Figura 9.8: Emisiones de CO₂. Fuente: (Blázquez, 2011).

| Certificación Energética de Edificios Indicador kgCO ₂ /m ² | Edificio Objeto |
|--|-----------------|
| A | |
| B | |
| C | 43.2 C |
| D | |
| E | |
| F | |
| G | |
| Demanda calefacción kWh/m ² | C 56,8 |
| Demanda refrigeración kWh/m ² | C 26,6 |
| Emisiones CO ₂ calefacción kgCO ₂ /m ² | C 16,2 |
| Emisiones CO ₂ refrigeración kgCO ₂ /m ² | B 1,2 |
| Emisiones CO ₂ ACS kgCO ₂ /m ² | A 0,0 |
| Emisiones CO ₂ Iluminación kgCO ₂ /m ² | C 25,8 |

Figura 9.9: Calificación energética. Fuente: (Blázquez, 2011).

9.3.3. Consumo térmico del edificio Aulario

Para conocer el consumo de energía en calefacción del edificio Aulario se ha contado con dos fuentes de datos: La primera corresponde a los resultados del estudio energético del edificio, en el cual se ha evaluado el consumo de energía usando la herramienta de simulación dinámica EnergyPlus (Blázquez, 2011). En base a estos resultados se ha podido discriminar el consumo de energía asociado a la calefacción, encontrando que el edificio objeto consume 323446.01 kWh/año de energía final. La segunda fuente de datos proviene de las facturas de gasóleo de los últimos seis años, con los que ha sido posible establecer un consumo promedio de 459180 kWh/año (González, 2013b) (Ver Tabla 9.33).

Comparando estas dos fuentes de datos se ha obtenido como resultado que el consumo según la factura de gasóleo es un 30 % superior al valor obtenido mediante simulación (Blázquez, 2011).

El presente estudio toma el valor promedio del consumo obtenido de la factura de combustible, de 459180 kWh/año. Suponiendo un periodo de 30 años de uso (Alsema, 2003) del sistema de calefacción con caldera de gasóleo, el sistema consume 13775390 kWh de energía final, equivalentes a 16282511 kWh de energía primaria, utilizando un factor de conversión de 1.182 para el gasóleo de calefacción (IDAE, 2014). Se encuentran 3788 tCO₂ emitidas al medioambiente, como se detalla en la Tabla 9.34.

Tabla 9.33: Consumo térmico edificio Aulario durante los años 2007 a 2012. Fuente: (González, 2013b; EREN, 2007).

| Consumo | Año | | | | | | Promedio consumo energía final |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------------------|
| | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | |
| (kWh) | 404000 | 494900 | 472720 | 505000 | 403758 | 474700 | 459180 |

Tabla 9.34: Consumo térmico y emisiones de CO₂ totales del edificio Aulario durante la fase de uso.

| Promedio Energía final | Vida útil | energía final total | Emisiones CO ₂ | Emisiones totales CO ₂ |
|------------------------|-----------|---------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| (kWh/año) | (años) | (kWh) | (t/año) | (t) |
| 459180 | 30 | 13775390 | 126 | 3788 |

9.4. Fase de disposición final del sistema de calefacción con caldera de gasóleo

En esta sección se construye el escenario de reciclaje en España de los materiales que forman el sistema de calefacción con caldera de gasóleo en base a los datos obtenidos de la bibliografía y que aparecen recogidos en la Tabla 9.35. El porcentaje de reciclado de los materiales metálicos y plásticos alcanza el 79 %. Posteriormente, se calculan las toneladas kilómetro del transporte del sistema hasta la planta de reciclaje BIOTRAN ubicada en Tudela de Duero, Valladolid (Biotran, 1998). El resultado es de 67.29 tkm.

Tabla 9.35: Escenario de reciclaje del sistema de calefacción con caldera de gasóleo.

| Materiales | Reciclaje | Referencia |
|------------|-----------|--------------------|
| | (%) | |
| Acero | 80.6 | (Unesid, 2012) |
| Hierro | 80.6 | (Unesid, 2012) |
| Plástico | 41.9 | (MinFomento, 2010) |
| Aluminio | 40.5 | (Arpal, 2012) |
| Cobre | 39 | (Arpal, 2012) |

9.5. Análisis de ciclo de vida del sistema de calefacción con caldera de gasóleo

Se realiza el análisis de ciclo de vida del sistema de calefacción actual con caldera de gasóleo. Se tienen en cuenta las características del sistema en las fases de montaje, uso y disposición final, descritas en las secciones: 9.2, 9.3 y 9.4. Como resultado, se identifican y cuantifican los impactos ambientales que se describen en la siguiente sección.

9.5.1. Impactos ambientales del sistema de calefacción con caldera de gasóleo

La evaluación del ciclo de vida del sistema de calefacción con caldera de gasóleo encuentra los mayores impactos ambientales en la fase de uso y en la fase de montaje del sistema, como se muestra en Fig. 9.10.

En la fase de montaje, el uso de los materiales para el montaje del sistema originan impactos principalmente sobre las reservas de recursos abióticos y la salud humana. El acero produce los mayores impactos ambientales, como se aprecia en la Fig.9.11.

En la fase de uso, el sistema ocasiona los mayores impactos ambientales debido al gasóleo consumido, como se aprecia en la Fig. 9.12. Los mayores daños son sobre la biodiversidad y la salud humana.

La disposición final del sistema de climatización actual con gasóleo ocasiona impactos ambientales como consecuencia del proceso de los materiales reciclados y que van a vertedero. En base al escenario de residuos en España, el 79 % del sistema se recicla y el resto, se supone que va a vertedero. Los principales daños son los que afectan a la salud humana (ver Fig.9.13).

La evaluación de los impactos ambientales durante el ciclo de vida del sistema de calefacción con caldera de gasóleo encuentra daños en casi todas las categorías. Los mayores daños son sobre: agotamiento de reservas, esperanza de vida, morbilidad severa, morbilidad y molestias, siendo preciso que el sistema pague, en cada una de las categorías citadas, las siguientes cantidades: 1291305.63 ELUs, 1092073.82 ELUs, 324141.08 ELUs, 74307.98 ELUs y 43285.60 ELUs, respectivamente, para restaurar los daños causados. Los detalles del coste ambiental en cada una de las categorías se encuentran desglosados en la Tabla 9.36.

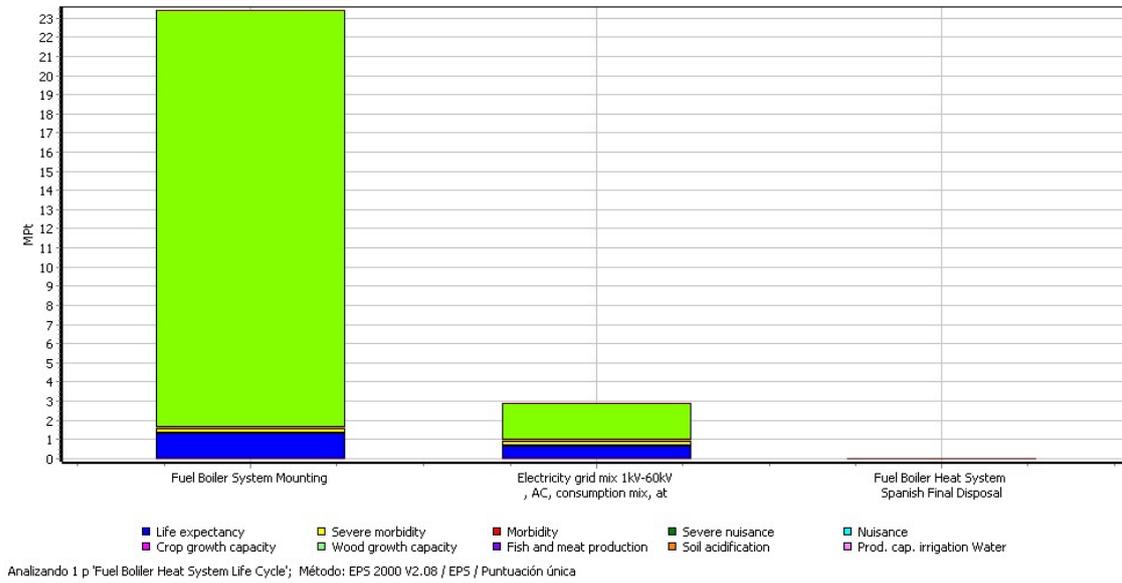


Figura 9.10: Impactos ambientales el sistema de calefacción con caldera de gasóleo. Ciclo de vida. Diagrama usando el *software* SimaPro8.

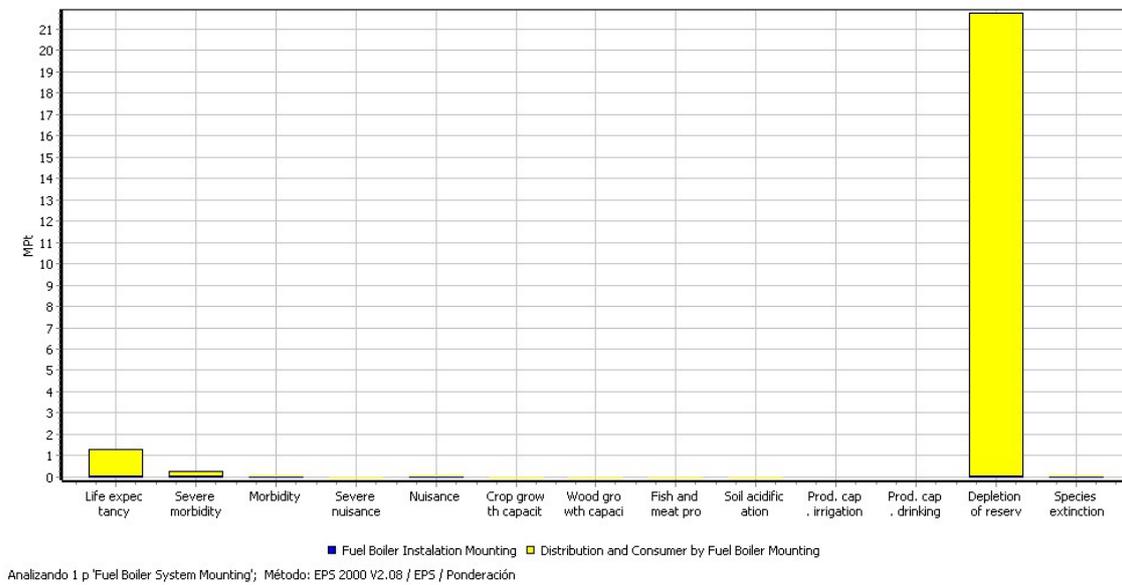


Figura 9.11: Impactos ambientales del sistema de calefacción con caldera de gasóleo. Fase de montaje. Ponderación. Diagrama usando el *software* SimaPro8.

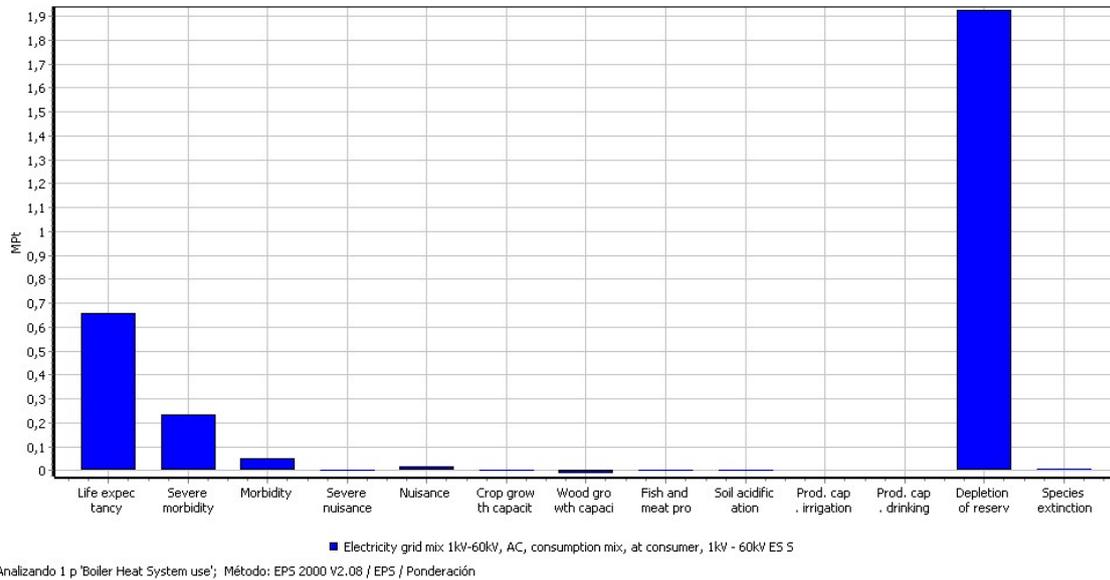


Figura 9.12: Impactos ambientales del sistema de calefacción con caldera de gasóleo. Fase de uso. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

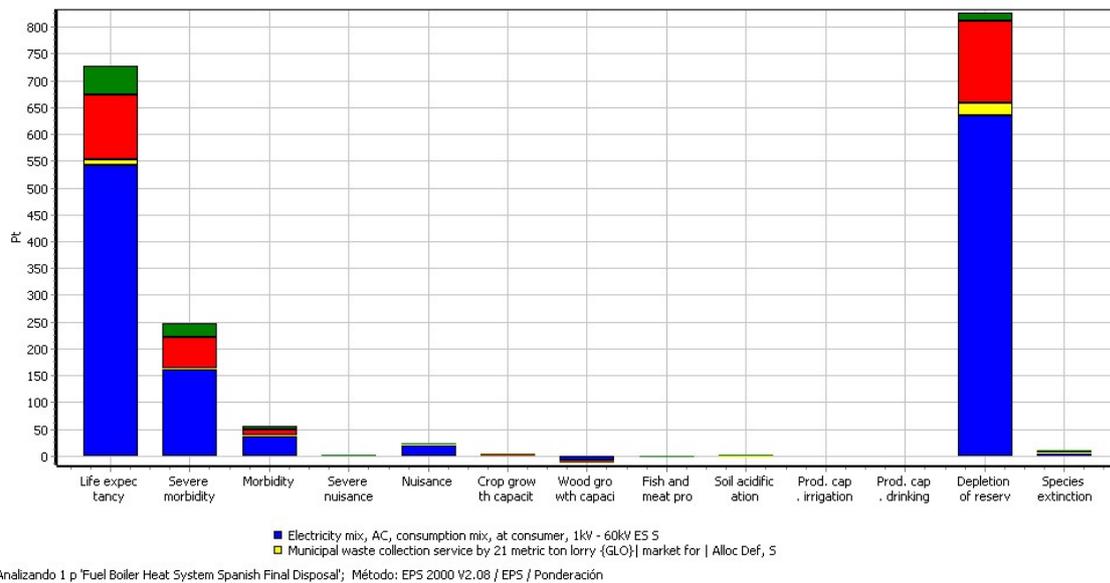


Figura 9.13: Impactos ambientales del sistema de calefacción con caldera de gasóleo. Fase de disposición final. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

Tabla 9.36: Impactos ambientales el sistema de calefacción con caldera de gasóleo. Ciclo de vida. Datos calculados usando el *software* SimaPro8.

| Categoría de daño | Unidad | Total | Montaje | Uso: Consumo energía | Disposición final |
|---|--------|------------|----------|-------------------------|-------------------|
| Esperanza de vida | ELU | 1092073.82 | 911.01 | 1091937.58 | -774.78 |
| Morbilidad severa | ELU | 324141.09 | 301.49 | 323948.61 | -109.01 |
| Morbilidad | ELU | 74307.98 | 57.84 | 74250.80 | -0.66 |
| Molestia severa | ELU | 4405.08 | 36.16 | 4385.17 | -16.25 |
| Molestia | ELU | 43285.60 | 16.66 | 43264.86 | 4.08 |
| Capacidad de crecimiento de maíz | ELU | 4020.84 | 2.62 | 4018.06 | 0.16 |
| Capacidad de crecimiento de madera | ELU | -18455.99 | -14.33 | -18441.60 | -0.06 |
| Producción de pescado y carne | ELU | -734.88 | -0.36 | -734.49 | -0.04 |
| Acidificación del suelo | ELU | 1144.95 | 0.44 | 1144.32 | 0.18 |
| Capacidad de producción de agua para irrigación | ELU | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Capacidad de producción de agua potable | ELU | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Agotamiento de reservas | ELU | 1291305.63 | 11945.21 | 1280238.26 | -877.84 |
| Extinción de especies | ELU | 12628.58 | 11.42 | 12618.97 | -1.81 |
| Total | ELU | 2828122.70 | 13268.19 | 2816630.54 | -1776.03 |

CAPÍTULO 10

Mejoras con Bomba de Calor Geotérmica para Calefacción

RESUMEN: Se diseña el sistema de climatización con bomba de calor geotérmica para cubrir los requerimientos de calefacción del edificio Aulario de la Universidad de Valladolid. Se presenta el marco teórico sobre energía geotérmica y bombas de calor. Posteriormente se diseña el intercambiador geotérmico usando el *software* Earth Energy Designer y se dimensionan los equipos requeridos por el sistema. Finalmente se evalúa el desempeño energético y ambiental del sistema.

10.1. Energía Geotérmica. Definición

La energía geotérmica es la energía que se encuentra en el interior de la tierra en forma de calor, como resultado de la desintegración de elementos radioactivos y el calor permanente que se originó en los primeros momentos de formación del planeta. El objetivo de la geotermia es el aprovechamiento de esa energía calorífica del interior de la tierra.

10.1.1. Clasificación de los yacimientos geotérmicos

Los yacimientos geotérmicos convencionales se clasifican de acuerdo con los niveles energéticos de los recursos que albergan, es decir, de los fluidos en ellos contenidos. La Fig.10.1 muestra los tipos de yacimientos geotérmicos (González, 2013a).

Yacimientos de alta entalpía: El fluido se encuentra en condiciones de presión y alta temperatura (superior al menos a los 150 °C). Las características termodinámicas del fluido permiten su aprovechamiento para producción de electricidad.

Yacimientos de media entalpía: Los fluidos se encuentran a temperaturas situadas entre los 100 °C y los 150 °C, lo que permite su uso para producción de electricidad mediante ciclos binarios que, en general, tienen rendimientos algo inferiores.

Yacimientos de baja entalpía: Cuando la temperatura del fluido es inferior a los 100 °C y su aplicación son los usos directos del calor (calefacción, procesos industriales y usos en

balneoterapia).

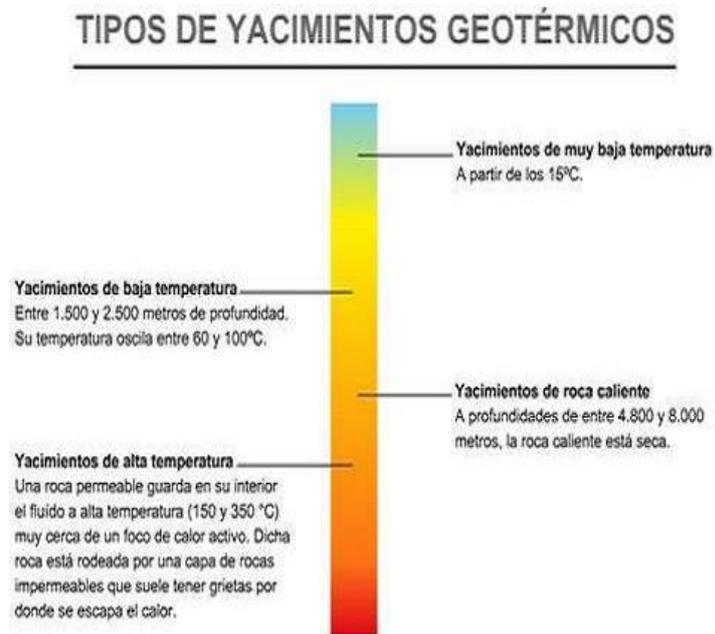


Figura 10.1: Tipos de yacimientos geotérmicos. Fuente: (González, 2013a)

10.1.2. Temperatura del terreno

Suponiendo un suelo homogéneo con propiedades térmicas constantes, la temperatura a cualquier profundidad z puede calcularse a partir de la ecuación 10.1 (Kusada y Achenbach, 1965).

$$T(z, t) = T_m - A_s e^{(-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}})} \cos \left[\frac{2\pi}{365} \left(t - t_0 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right) \right] \quad (10.1)$$

Donde $T(z,t)$ es la temperatura en °C del suelo en el tiempo t a una profundidad z , T_m es la temperatura media anual del suelo en °C (a una profundidad en donde no son perceptibles las variaciones de temperatura), A_s es la oscilación de la temperatura superficial en °C, t es el tiempo en días, t_0 el desfase en días y α es la difusividad térmica del suelo en $\text{m}^2/\text{día}$. La temperatura media del terreno T_m se puede asumir como constante hasta profundidades de 100 metros. El valor de la oscilación anual A_s depende de la localización, del tipo de suelo y del contenido de agua. El desfase en días t_0 se refiere al desplazamiento de la temperatura superficial con la profundidad, un valor típico de este parámetro es 35 ± 10 días (Kusada y Achenbach, 1965). Los valores de la difusividad térmica del suelo (α) dependen del tipo de suelo y del contenido de agua.

Otras formas para determinar las temperaturas del suelo son:

- El conocimiento de las condiciones de temperatura locales del suelo basadas en la experiencia o datos medidos.
- Las gráficas de diseño (curva de embudo), como la mostrada en la Fig. 10.2, para la determinación de la temperatura máxima y mínima del suelo en función del tipo y profundidad del suelo.
- Las tablas de diseño para determinar las temperaturas máxima y mínima del suelo para distintos valores de oscilación anual del suelo A_s .

La Fig. 10.2 muestra la evolución de la temperatura con la profundidad para diferentes días a lo largo del año. “La curva roja corresponde a la distribución de temperaturas en el día 30 (finales de enero), las curvas magenta, azul claro y amarillo, respectivamente, a los días 90, 180 y 270” (IDAE, 2010). “La energía aportada por la radiación solar, precipitaciones y otros efectos atmosféricos es transferida diariamente a y desde la superficie de la tierra produciéndose un equilibrio térmico. Como consecuencia de este equilibrio, la temperatura de la tierra a ciertas profundidades (aproximadamente 10 m) se mantiene constante” (IDAE, 2010). La estructura interna de la tierra está formada por capas sucesivas. Se han analizado unos pocos kilómetros al interior de la superficie, encontrándose que en la capa más externa del globo (la corteza) la temperatura aumenta a medida que se profundiza. Este incremento de la temperatura se conoce como gradiente geotérmico. El gradiente geotérmico observado en la mayor parte del globo es de unos $3 \text{ °C}/100 \text{ m}$, (IDAE, 2008).

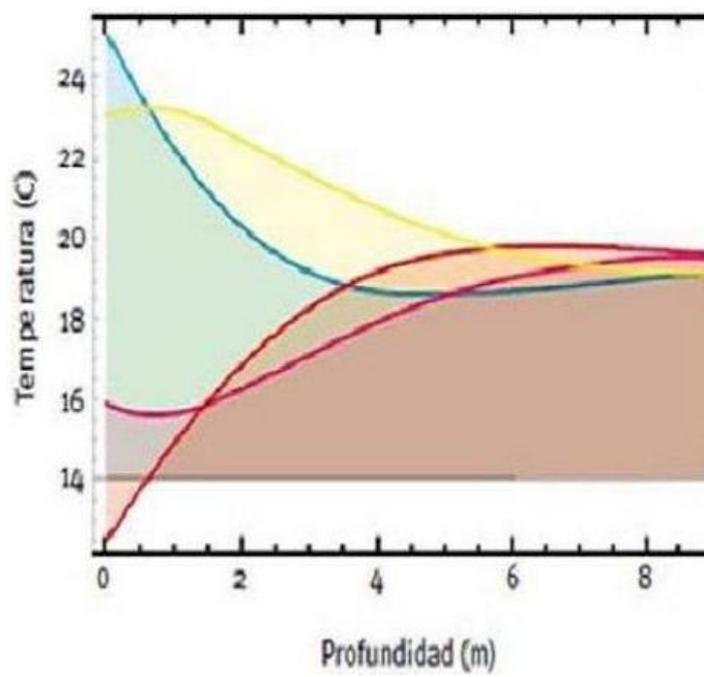


Figura 10.2: Evolución de la temperatura del suelo. Curva embudo. Fuente:(IDAE, 2010).

10.1.3. Potencial geotérmico mundial

El potencial geotérmico mundial se ha calculado, de acuerdo con el tipo de recursos, en recursos de alta temperatura y baja temperatura. Según los datos de la Internacional Geothermal Association 2001 (IDAE, 2008), el potencial geotérmico proveniente de recursos de alta temperatura en función de la tecnología usada es: 9.632 ktep/año de electricidad con tecnología convencional, 19.264 Ktep/año de electricidad con tecnología convencional y binaria (uso de recursos geotérmicos); y el potencial geotérmico proveniente de recursos de baja temperatura es de 33.200 ktep/año de calor, como se muestra en la Fig. 10.3. Los principales productores de potencia geotérmica son América (41 %) y Asia (34 %) (IDAE, 2012).

La generación de electricidad se realiza principalmente mediante turbinas de vapor convencionales y plantas de ciclo binario. Las turbinas de vapor convencionales generan electricidad usando el vapor directamente de los pozos. Las plantas de ciclo binario utilizan un fluido secundario, el cual es calentado y vaporizado, el vapor activa la turbina y genera electricidad (IDAE, 2010).

Respecto de la potencia instalada de energía geotérmica en el mundo, se estima que es de 10.715 MWe en 2010 (IDAE, 2008), lo que supone un incremento de aproximadamente el 20 % en los últimos cinco años, como se puede observar en las Fig. 10.4: (a), y (b).

Potencial geotérmico mundial por continentes (International Geothermal Association 2001)

| | Recursos de alta Tª para generación de electricidad (Ktep/año de electricidad) | | Recursos de baja Tª para uso directo (Mtep/año de calor) |
|--------------------------|--|---|--|
| | Tecnología convencional | Tecnología convencional y binaria | |
| Europa | 1.574 | 3.182 | >8.800 |
| Asia | 2.554 | 5.074 | >7.600 |
| África | 1.049 | 2.064 | >5.700 |
| América del Norte | 1.144 | 2.322 | >2.800 |
| América del Sur | 2.408 | 4.816 | >5.700 |
| Oceanía | 993 | 1.806 | >2.600 |
| Potencial mundial | 9.632 | 19.264 | >33.200 |

Figura 10.3: Potencial geotérmico mundial por continente. Fuente:(IDAE, 2008).

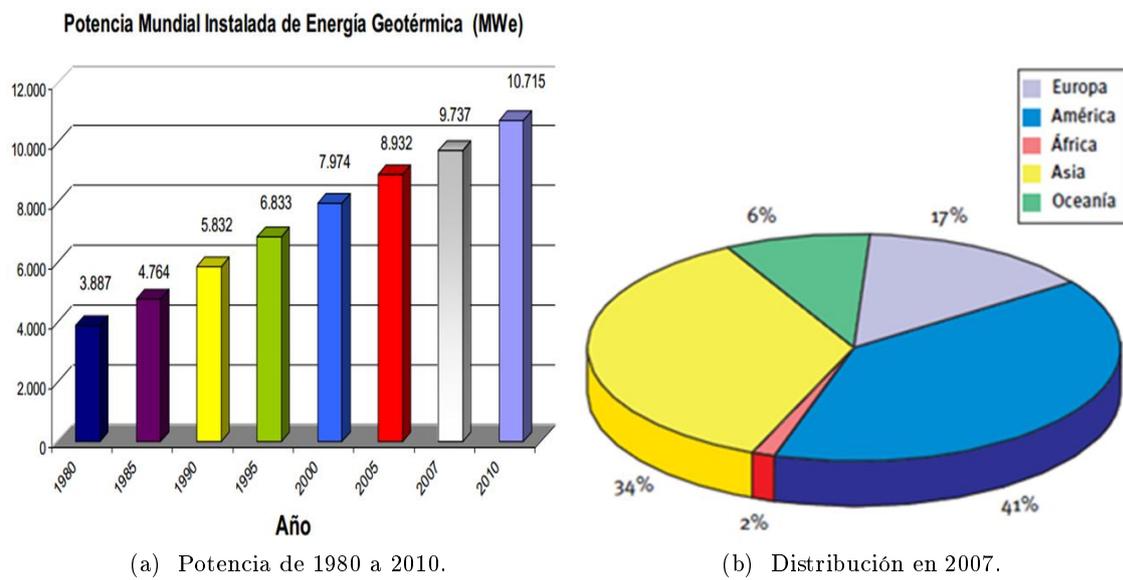


Figura 10.4: Potencia mundial instalada de energía geotérmica. Fuente: (IDAE, 2008).

10.1.4. Energía geotérmica en España

En España la energía geotérmica no está tan extendida como en otros países, como Alemania y países nórdicos. El estudio de la tierra y sus características geológicas se han realizado desde los años 70, pero los sistemas geotérmicos no tienen un gran éxito hoy en día. El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) inició el estudio del potencial del subsuelo español a mediados de los 70, debido a la crisis energética de 1973. En 1975 se elaboró el inventario general de las manifestaciones geotérmicas en España y en los años 80 se hizo la delimitación de las áreas donde se encuentran los tres tipos clásicos de yacimientos geotérmicos, como se muestra en la Tabla 10.1, planificándose varios proyectos geotérmicos que fueron abandonados porque usaban una tecnología muy costosa y no eran rentables económicamente (Pomar, 2012). En los últimos años, con el desarrollo de nuevas tecnologías, ha sido viable el uso de este recurso. España se ha centrado en el uso de la energía geotérmica de baja temperatura y en el desarrollo de instalaciones con bombas de calor, para aplicaciones de calefacción y agua caliente sanitaria y en aire acondicionado.

La producción de electricidad a partir de energía geotérmica en España en el año 2012 fue de 80 MW (Pomar, 2012). Se prevé la ampliación del uso de este recurso renovable debido a que se han previsto varios proyectos grandes en más de 50 permisos de explotación e investigación para la generación de electricidad, y alrededor de 10 millones de Euros han sido comprometidos. Se espera un aumento en la generación de electricidad para el año 2020 de entre 1000-1700 MWe y para el año 2030 hasta 3000 MWe (Pomar, 2012).

Tabla 10.1: Clasificación de las áreas de energía geotérmica en España. Fuente: (Pomar, 2012).

| Tipo | Características | Lugar |
|--|--------------------------------------|---|
| Baja temperatura ($T < 100$ °C) | Almacenes sedimentos profundos | Cuenca del Tajo: Madrid Cuenca del Duero: León, Burgos y Valladolid Áreas Ibéricas y pre-Bética: Albacete y Cuenca |
| | Áreas volcánicas e intermontañas | Galicia: Área de Orense y Pontevedra Depresiones catalanas: Vallés, Penedés, La Selva y Ampurdán Depresiones internas del sistema montañoso bético: Granada, Guadalix, Baza, Cartagena, Mula, Mallorca Islas Canarias: Isla de Gran Canaria |
| Temperatura media (100 °C $< T < 150$ °C) | | Sistema bético: Murcia, Almería y Granada Cataluña: Vallés, Penedés, La Selva y Olot Galicia: Áreas de Orense y Pontevedra Pirineos orientales: Área de Jaca-Sabiñánigo |
| Alta Temperatura ($T > 150$ °C) | | Islas Canarias: Tenerife, Lanzarote y La Palma |

10.2. Bomba de Calor

El calor fluye de forma natural desde las altas temperaturas a las bajas temperaturas. Sin embargo, la bomba de calor es capaz de forzar el flujo de calor en la dirección contraria, utilizando una cantidad de trabajo relativamente pequeña. Conceptualmente, una bomba de calor es una máquina térmica cuyo principal fin es transportar calor desde un ambiente a una temperatura relativamente baja, a otro con un nivel de temperatura mayor (Merino, 1999).

La termodinámica nos enseña que cualquier cuerpo o ambiente que se encuentre a una temperatura por encima del cero absoluto (o cero Kelvin) es susceptible de actuar como una fuente de calor; de forma espontánea, si el ambiente de destino se encuentra a una temperatura menor (el calor fluye de forma espontánea del foco caliente al foco frío), o mediante el empleo de trabajo mecánico, en el caso de encontrarse a una temperatura mayor. Por tanto, si se desea extraer el calor de la fuente que se encuentra a menor temperatura y transportarlo a la fuente de mayor temperatura debe usarse un fluido y una máquina capaz de adaptarse a estas condiciones. Sabiendo que un líquido cuando hierve se evapora y en este proceso absorbe calor, se usa un líquido que hierva a una temperatura baja y transporte el calor absorbido del foco frío al foco caliente. Los fluidos frigoríficos o refrigerantes cumplen estas condiciones, como se explica a continuación (Merino, 1999).

El principio de funcionamiento de las bombas de calor no es reciente. Sus orígenes provienen de las leyes sobre la forma de comportarse los gases enunciadas por Boyle (1662), Mariotte (1676), Charles (1787) y Gay-Lussac (1803), que son reflejo del principio ya conocido desde muy antiguo por los físicos y que puede enunciarse así: “un gas se calienta cuando se comprime y se enfría cuando se expande” (Llopis y Rodrigo, 2008). Posteriormente el establecimiento por Carnot en 1824 de los conceptos de ciclo y reversibilidad, y por la concepción teórica posterior de Lord Kelvin (Rey y Velasco, 2005), dan origen a las bombas de calor.

Para aplicaciones de calefacción de viviendas, el funcionamiento de la bomba de calor es el siguiente: de una forma cíclica, el fluido refrigerante absorbe calor del exterior, hierve en el interior de un haz de tubos, y, ayudado de un compresor, el fluido caliente es bombeado hacia el haz de tubos ubicados en el interior del local, donde cede su calor al ambiente y se transforma nuevamente en líquido al condensarse. Por último, el fluido una vez que ha cedido todo su calor regresa de nuevo al haz tubular exterior para hervir y evaporarse de nuevo e iniciarse otra vez el ciclo (Merino, 1999).

En su modo de funcionamiento básico, la bomba de calor es utilizada para aportar calor a una estancia a través del ciclo Rankine de refrigeración, como se explicó arriba. Sin embargo, este ciclo puede ser inverso. En este caso se habla de una bomba de calor reversible, que tiene capacidad de sustraer calor, además de aportarlo, según la dirección de su ciclo. Es así que las bombas de calor también pueden ser utilizadas para refrigerar. En este caso, la transferencia de calor se realiza en el sentido contrario, es decir, desde la aplicación que requiere refrigeración al entorno que se encuentra a temperatura superior (Rey y Velasco, 2005).

Se distinguen 3 tipos principales de bombas de calor: aire-aire, aire-agua y agua-agua (Rey y Velasco, 2005). A continuación se describen cada una de ellas.

- Bomba de calor aire-aire: el calor que se toma del aire se transfiere directamente al aire del local que debe enfriarse o calentarse.
- Bomba de calor aire-agua: el calor se toma del aire y se transfiere a un circuito de agua que abastecerá un suelo radiante/techo refrescante.
- Bomba de calor agua-agua: el sistema toma el calor de un circuito de agua en contacto con un elemento que le proporcionará el calor (la tierra, capa freática) para transferirlo a otro circuito de agua, como en el caso anterior. Este es el sistema generalmente adoptado por las bombas de calor geotérmicas.

10.2.1. Rendimiento de la bomba de calor

La bomba de calor no genera calor por los procedimientos habituales como son, el quemar algún tipo de combustible fósil o el uso de resistencias eléctricas. La bomba de calor transporta calor de una manera continua de un lugar a otro. Ésta es la gran ventaja de la bomba de calor: la electricidad que consume el compresor se utiliza en transportar el calor, no en generarlo. Esto tiene una repercusión inmediata en el rendimiento de la máquina. Cualquier tipo de combustión en calderas, o calentamiento por resistencias eléctricas, posee siempre unos rendimientos inferiores al 100 %: de cada 100 vatios consumidos se aprovecha una cantidad menor de forma útil. Por el contrario, una bomba de calor puede llegar a tener un rendimiento del 300 % e incluso superior, o lo que es lo mismo, por cada 100 vatios consumidos se obtienen 300 vatios de calentamiento. Este rendimiento tan alto es explicable precisamente por tratarse de una máquina que transporta el calor en lugar de generarlo, pues lo que realmente se está midiendo es la eficiencia energética de este transporte, es decir, que por cada vatio de electricidad que consume se transportan tres en forma de calor (Merino, 1999).

Esta eficiencia se mide a través del coeficiente de rendimiento (COP, por sus siglas en inglés *coefficient of performance*), también llamado coeficiente de prestación, y que es el cociente entre la energía térmica cedida por el sistema y la energía de tipo convencional absorbida. Para una correcta eficiencia y funcionalidad, una bomba de calor debe alcanzar un COP de entre 2 y 6, dependiendo de la diferencia entre las temperaturas de ambos focos (interior y exterior) (Rey y Velasco, 2005).

$$COP_{bomba} = \frac{\text{Calor}_{producido}}{\text{Energía}_{consumida}} \quad (10.2)$$

10.2.2. Bomba de calor y avances tecnológicos

En el año 1852 el físico británico William Thomson (Lord Kelvin), presentó en Glasgow a la Royal Philosophical Society un informe que presentaba la idea básica de la bomba de calor. Durante varios lustros la tecnología fue incapaz de diseñar una máquina que pudiera proporcionar el medio mecánico a que Lord Kelvin se refería. En los Estados Unidos se comenzó a experimentar sobre la bomba de calor hacia el año 1920, instalando uno de los primeros sistemas en 1932 en el edificio de la U.J.J. Electric Company en Japón, a la que seguirían otras instalaciones en los propios Estados Unidos. En Europa se había comenzado a experimentar sobre la bomba de calor hacia el año 1929, poniendo en marcha las primeras instalaciones alrededor de 1934. Aproximadamente sobre 1950 tuvo lugar en Estados Unidos

la primera gran expansión de utilización de la bomba de calor. En Europa la expansión del mercado de la bomba de calor se produjo en el año 1970. En España, las bombas de calor comenzaron a instalarse aproximadamente en el año 1974.

La tecnología de la bomba de calor ha tenido un gran impulso debido a que los sistemas de bombas de calor han demostrado ser una alternativa económica de recuperación de calor de diferentes fuentes para su uso en diversas aplicaciones industriales, comerciales y residenciales. A medida que el coste de la energía sigue aumentando, se hace imperativo ahorrar energía y mejorar la eficiencia energética global. La bomba de calor se ha convertido en un componente clave de los sistemas de recuperación de energía, con un gran potencial de ahorro energético (Chua et al., 2010).

Los avances tecnológicos se han enfocado en mejorar el rendimiento, fiabilidad, y el impacto ambiental de la bomba de calor. Como ejemplo se encuentran, entre otros, los sistemas de bomba de calor híbridos adecuados para su aplicación con diferentes fuentes de calor (Chua et al., 2010).

Las últimas tendencias en la tecnología de las bombas de calor han sido su aplicación en el sector de la edificación. Es así que se aprecia el uso térmico del subsuelo, que se puede utilizar no sólo en el modo de calefacción en clima frío, sino también en el modo de refrigeración como un disipador de calor en clima caliente; como suelo radiante y techo refrescante; las bombas de calor sin agua; el uso de refrigerantes naturales; entre otras. Los sistemas de bomba de calor han recibido incentivos económicos, como es el caso por parte del gobierno alemán para sustituir instalaciones de bomba de calor existentes y mejorar el indicador de COP (incrementando a COP de 3.5 en 1998) (Gillet, 1996).

10.3. Bomba de calor geotérmica

“En sistemas de bomba de calor geotérmica, el calor es extraído del fluido en conexión con la tierra por una bomba de calor geotérmica y distribuido al edificio. El fluido se vuelve a calentar a medida que fluye a través del suelo. En el modo de refrigeración, el proceso es invertido. Esto hace que sea una fuente de energía renovable, respetuosa del medio ambiente” (Blomberg et al., 2008).

La bomba de calor permite el intercambio de calor con el subsuelo. En invierno el subsuelo tiene una temperatura más elevada que el aire exterior y en verano una temperatura más baja, por lo que puede usarse tanto para calefactar como para refrigerar. Lo que se hace es aprovechar la temperatura prácticamente homogénea del subsuelo a lo largo del año, como se mostró en la Fig. 10.2, usándolo como intercambiador de calor mediante una bomba de calor.

Un fluido, normalmente agua con anticongelante, circula por el interior del lazo enterrado y, a medida que lo va recorriendo, intercambia calor con el suelo (Fig. 10.5). Si se desea calentar el recinto, el fluido saldrá más frío que la tierra y se irá calentando, absorbiendo el calor almacenado en ella y entregándolo a la bomba de calor. Si se desea refrigerar el recinto, el fluido saldrá con el calor absorbido del interior y se irá enfriando, cediendo el calor que tenía al subsuelo y retornando más frío (Rey y Velasco, 2005).

10.3.1. Principales componentes de un sistema de calefacción geotérmica

Los principales componentes de un sistema de climatización geotérmica son: circuito de intercambio geotérmico (llamado también intercambiador geotérmico), bomba de calor geotérmica formada por dos intercambiadores de calor (el evaporador y el condensador), un compresor, una válvula de expansión y el refrigerante que es bombeado por el sistema. La Fig. 10.5 muestra el sistema de climatización geotérmica operando en modo calefacción. La función de cada componente se describe a continuación.

El captador o colector.

El diseño del sistema captador dependerá de la naturaleza de la fuente. Durante el verano, el aire, el subsuelo y el agua de los lagos y ríos se calientan; este calor se conserva y se almacena. A medida que la temperatura ambiente disminuye durante los meses de invierno, el calor almacenado se emite gradualmente: por aire mediante convección, por agua mediante conducción y del subsuelo por conducción y después por radiación desde la superficie. Este se enfría más lentamente a uno o más metros de profundidad. Esto contrasta con la temperatura del aire, que puede bajar bajo cero durante una noche clara de los meses más fríos de invierno.

La longitud de la tubería del captador dependerá de la capacidad calorífica del sistema, de la temperatura ambiente de la fuente y del índice de transmisión de calor hacia el líquido del captador. La tubería se puede instalar horizontalmente o verticalmente, dependiendo del espacio disponible. A medida que el calor se extrae durante los meses de invierno, la fuente de calor se enfría y el subsuelo puede quedar, incluso, congelado. No obstante, durante el siguiente verano el sol renovará la fuente de calor, calentándola de nuevo. De manera que la provisión de calor es renovable.

El refrigerante.

El refrigerante es una sustancia que existe en estado gaseoso a temperatura ambiente y se convierte en líquido a una temperatura inferior a 0 °C, en torno a -5 ó -10 °C. El calor extraído de la fuente se transfiere por evaporación al refrigerante en el intercambiador de calor.

El compresor.

Después de que el refrigerante sale del evaporador, el compresor lo comprime y se transforma en líquido. Mientras se comprime, su temperatura se eleva debido a que la temperatura de un líquido aumenta cuando aumenta la presión.

El condensador.

Desde el compresor el refrigerante pasa a través del condensador, donde el calor de alta temperatura del refrigerante se transfiere al sistema de distribución. Si se trata de aire, puede

circular directamente a través de la vivienda por conductos. Si es agua, entonces el agua caliente se puede distribuir por los radiadores con un sistema convencional para suministrar calefacción, o bien se puede almacenar en un depósito para proporcionar agua caliente sanitaria. Para el caso estudiado, que trata de un sistema de climatización operando en modo calefacción, el refrigerante pasa a través del condensador, donde el calor del refrigerante se transfiere al intercambiador geotérmico y la tierra actúa como sumidero de frío en invierno y como sumidero de calor en verano.

La válvula de expansión.

Una vez fuera del condensador, el refrigerante se ha enfriado y pasa a través de una válvula de expansión que retorna el refrigerante a un estado gaseoso antes de que entre de nuevo en el evaporador y empiece otra vez el ciclo.

Cuando se realiza la transferencia de calor en sentido inverso, esto es, desde el recinto que requiere frío hacia el ambiente que se encuentra a temperatura superior, la bomba de calor trabaja en modo refrigeración. La bomba de calor geotérmica extrae energía térmica del suelo en invierno transfiriéndola al interior, mientras que en verano extrae el calor del interior y lo devuelve al subsuelo. Las Figs. 10.6: (a), y (b), muestran el esquema de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica, en modo refrigeración y en modo calefacción.

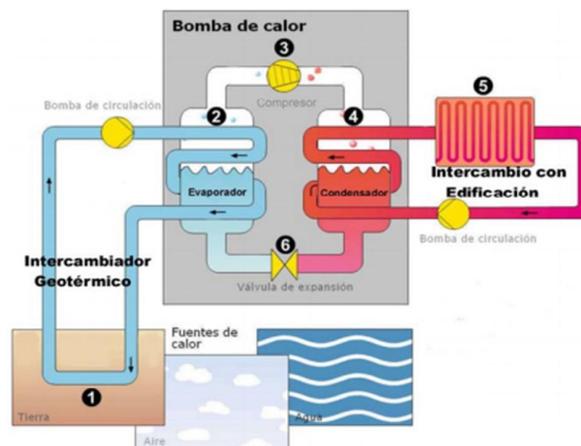


Figura 10.5: Componentes de un sistema de calefacción geotérmica. Fuente: Modificado de (Dimplex, 2008).

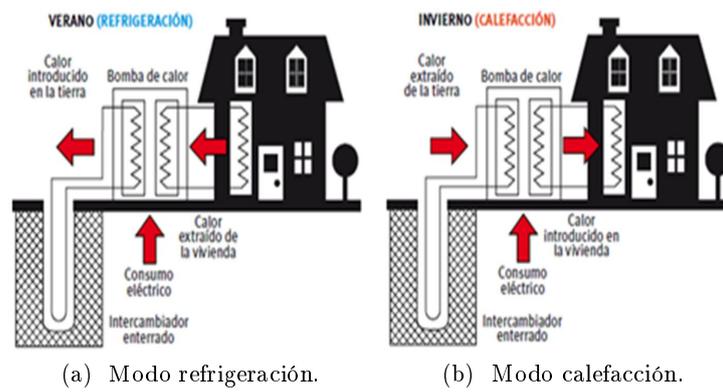


Figura 10.6: Funcionamiento de una bomba de calor geotérmica. Fuente: (IDAE, 2010).

10.4. Diseño del sistema de calefacción geotérmico

El diseño del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica se realiza en base al método de diseño de este tipo de instalaciones sugerido en la Guía de la Energía Geotérmica (Llopis y Rodrigo, 2008). El presente estudio considera que el sistema de calefacción geotérmico usado por el edificio Aulario está formado por los siguientes componentes: intercambiador geotérmico, accesorios del intercambiador geotérmico, bomba de circulación, vaso de expansión, bomba de calor geotérmica, refrigerante R407c y radiadores. Se siguen los pasos mostrados en el esquema de la Fig. 10.7 (Llopis y Rodrigo, 2008), donde se establece la demanda energética, se define el consumo teórico anual, se calcula la potencia teórica de la bomba de calor, se calcula la potencia real de la bomba de calor con la que se elige el equipo, y finalmente se diseña el intercambiador geotérmico. A continuación se describen cada uno de estos pasos para el caso de estudio.

La demanda energética consiste en determinar el consumo térmico en los puntos de demanda, bien en los distintos puntos de calefacción, en el agua caliente sanitaria o en los de refrigeración. Este consumo dependerá de la climatología del emplazamiento, de la orientación del inmueble y su situación (horas de sol) así como de la forma de entrega final del calor o el frío (intercambiadores finales de calor o frío), con sus rendimientos correspondientes.

El siguiente paso para el diseño del sistema de climatización geotérmico consiste en calcular la potencia teórica requerida, que responde a los parámetros empleados y proporciona unos resultados teóricos. Posteriormente se calcula la potencia real, que es la obtenida cuando la bomba de calor geotérmica se diseña para la potencia máxima. De esta manera se tendrán unos resultados prácticos que dependerán del rendimiento de dicha bomba, el cual depende a su vez de varias condiciones exteriores, principalmente de la temperatura del foco frío (que es la que el sistema obtiene de la fuente de energía geotérmica). En base a la potencia real requerida se elige el equipo dentro de los ofertados en el mercado, como se describe en el siguiente apartado.

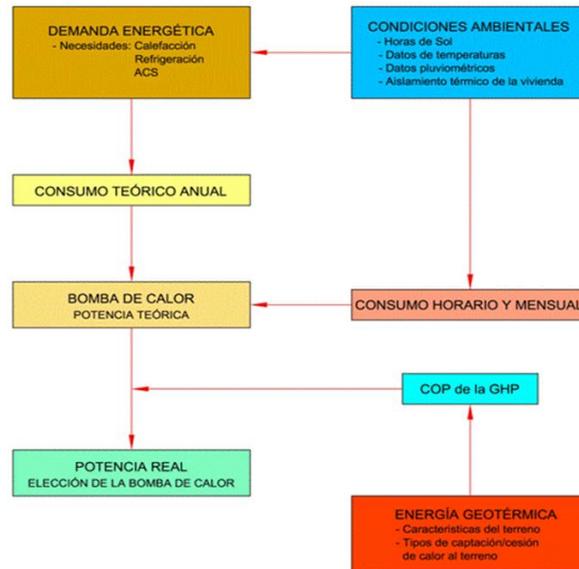


Figura 10.7: Etapas para el dimensionamiento de un sistema de climatización geotérmico. Fuente: (Llopis y Rodrigo, 2008).

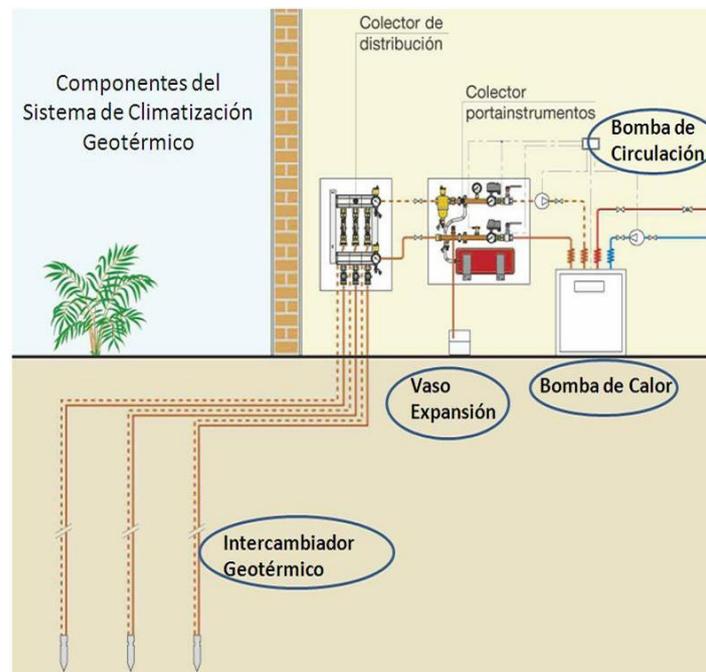


Figura 10.8: Componentes de un sistema de calefacción geotérmico. Fuente: (Llopis y Rodrigo, 2008).

10.4.1. Elección de la bomba de calor geotérmica

Las especificaciones de la bomba de calor fijan varios parámetros de diseño del intercambiador de calor geotérmico o intercambiador enterrado, ya que determinan el calor intercambiado con el suelo y el caudal circulante por el intercambiador de calor, además de fijar el rendimiento del sistema (COP) de acuerdo con sus curvas características de potencia-temperatura. El COP de una bomba de calor representa la relación entre la capacidad térmica de la misma, Q , y la potencia eléctrica consumida para suministrarla, W . Su definición para los modos de calefacción y refrigeración se describe en las ecuaciones 10.4 y 10.5, así como la relación entre el calor absorbido o inyectado al terreno, descritas en las ecuaciones 10.6 y 10.7.

Para el cálculo de los parámetros de la bomba de calor geotérmica se parte de la demanda de calefacción y refrigeración del edificio Aulario. Se encuentra que existen ocho meses de demanda de calefacción y aproximadamente cuatro meses de demanda de refrigeración, con demandas de 330777,9 kWh/año y 292961,7 kWh/año (Blázquez, 2011) respectivamente (ver Tablas 9.31 y 9.30 del Capítulo 9).

El sistema con bomba de calor geotérmica se diseña para la mayor potencia requerida, esto es, calefacción. Es necesario que el sistema opere en ambos modos (calefacción y refrigeración) para regenerar térmicamente el suelo. Se asume un COP medio estacional de 3.16 para este tipo de equipos, como se detalla en la sección 10.4.4, subsección carga base.

Se diseña la instalación con base en el requerimiento de calefacción y el horario de funcionamiento del edificio, con los que se estableció el siguiente periodo de operación de lunes a viernes: en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, 13 horas diarias (de 8:00 horas a 21:00 horas); en los meses de octubre y marzo, 7 horas diarias, (de 8:00 horas a 15:00 horas) y en el mes de abril, 3 horas diarias. El número de horas en que el equipo proporciona calefacción es de 2070 h/año. En base a este requerimiento se calcula la potencia total real según la ecuación 10.3, encontrando que se precisan 70.20 kW para atender los requerimientos de calefacción del edificio. Se supone un incremento del 30 % para cubrir picos, por tanto la potencia requerida es de aproximadamente 91.20 kW.

Para conocer las características del equipo, se buscaron en el mercado bombas de calor geotérmicas de los diferentes fabricantes y se eligió el equipo mostrado en la Fig. 10.9 de 97.1 kW de potencia calórica aproximada. El equipo está fabricado en acero y pesa 540 kg. La bomba de calor requiere 7 kg de refrigerante R407c, (Immosolar, 2011).

$$Q_{Total} = \frac{Q \cdot \Delta T}{\bar{Q}} \quad (10.3)$$

$$COP_{calefacción} = Q_{calefacción} / W_{calefacción} \quad (10.4)$$

$$COP_{refrigeración} = Q_{refrigeración} / W_{refrigeración} \quad (10.5)$$

$$Q_{absorbido} = Q_{calefacción} - W_{calefacción} \quad (10.6)$$

$$Q_{inyectado} = Q_{refrigeración} + W_{refrigeración} \quad (10.7)$$



Figura 10.9: Bomba de calor geotérmica. Fuente:(Immosolar, 2011).

10.4.2. Diseño del intercambiador geotérmico

El intercambiador de calor geotérmico es un circuito generalmente cerrado que contiene agua o agua glicolada que va acoplado a la bomba de calor geotérmica. “La capacidad de intercambiar calor con la fuente de energía geotérmica dependerá de las características del terreno, pero éstas son las impuestas por la naturaleza y no se pueden modificar. Lo que sí puede modificarse es la capacidad del intercambiador para absorber o ceder el calor, y ésta dependerá de las necesidades de la bomba de calor geotérmica calculadas y de su rendimiento (COP)” (Linares, 2010).

Existen dos variables que influyen en la optimización del intercambio de calor en los captadores: el material y las variables interrelacionadas tiempo-superficie de contacto.

El material de fabricación del captador: los materiales metálicos se caracterizan por tener la mejor conductividad de calor conocida, pero este material no es apto para el captador geotérmico por los problemas de corrosión que presentarían, como consecuencia de la agresividad del terreno y que conllevarían a un elevado costo de mantenimiento. Es por esto que se usan intercambiadores de policloruro de vinilo (PVC) o plásticos de la familia de los propilenos, porque aúnan buena conducción del calor y flexibilidad, lo que facilita su instalación además de tener un coste reducido.

Las variables interrelacionadas tiempo-superficie de contacto: esto es, el tiempo de contacto del intercambiador con el terreno y la superficie de contacto con el mismo. Para una cantidad determinada de calor a intercambiar, a mayor tiempo de intercambio se precisa menor superficie y viceversa. En realidad los tubos captadores son de una sección estándar por razones de mercado y las dos variables tiempo-superficie de contacto se aúnan en el cálculo de la longitud del tubo captador. Esta longitud será una función del calor capaz de ser absorbido o cedido por el terreno, de las temperaturas del suelo y del fluido intercambiador, de la resistencia térmica del terreno y de las características conductivas del material del que está compuesto el tubo captador.

La caída de presión a través del intercambiador geotérmico puede descomponerse en dos partes diferentes: la ocasionada por el rozamiento del fluido en las paredes de los tramos rectos de tubería (pérdidas por fricción) y la provocada por los cambios de velocidad o dirección en los distintos accesorios que, junto con los tramos rectos de tubería, integran la red de distribución (pérdidas singulares).

Las pérdidas por fricción en los tramos rectos se calculan por medio de la ecuación de Hazen-Williams (NCEES, 2005). Esta ecuación se puede expresar en función de la velocidad del fluido y del diámetro de la tubería, como se observa en la ecuación 10.8 (Jutglar et al., 2011), siendo $\frac{\Delta P_f}{L}$ la caída de presión debida al rozamiento por unidad de longitud del conducto, en unidades de Pa/m; la velocidad del fluido está dada por v_i , en m/s; el diámetro del conducto por D_i en m; el coeficiente adimensional que depende de la rugosidad del tubo se expresa como C ; y la densidad del fluido como ρ , en kg/m². El coeficiente i se utiliza cuando se tienen conductos con diferentes diámetros.

Las pérdidas de carga en el tramo recto se calculan con la longitud de cada tramo

mediante la ecuación 10.9. Las pérdidas en las singularidades se calculan empleando el método de los coeficientes de pérdidas singulares, que calcula la pérdida de presión en cada accesorio estimando la longitud equivalente en cada uno de ellos aplicando la ecuación 10.10 (Giles et al., 1996), siendo $\sum \xi$ la sumatoria de las singularidades en cada tramo. La pérdida de carga total en cada tramo se calcula sumando las pérdidas de carga en los tramos rectos y las pérdidas de carga debidas a las singularidades, como se muestra en la ecuación 10.11.

En la siguiente sección se describen los tipos de intercambiador geotérmicos más comunes.

$$\left(\frac{\Delta P_f}{L}\right)_i = 66.89\rho \left(\frac{v_i}{C}\right)^{1.852} \left(\frac{1}{D_i}\right)^{1.167} \quad (10.8)$$

$$P_{ri} = \left(\frac{\Delta P_f}{L}\right)_i L_i \quad (10.9)$$

$$P_{si} = \frac{\rho}{2} v^2 \sum \xi \quad (10.10)$$

$$P_{Ti} = P_{ri} + P_{si} \quad (10.11)$$

10.4.2.1. Tipos de intercambiadores geotérmicos

Los intercambiadores de calor geotérmicos se clasifican según los siguientes tipos:

- Según el tipo de instalación: horizontal, *slinky* (tubería enrollada en forma de espiral) y vertical.
- Según la trayectoria del fluido: en serie o paralelo.

Las geometrías más comunes son las de intercambiadores o captadores horizontales y verticales conformando uno o varios circuitos en serie o paralelo, y mixtos, que son combinaciones de ambos modelos. Las variables que más influyen en la elección del intercambiador geotérmico son, entre otras, la sencillez de instalación sobre el terreno y la posibilidad de aprovechar otras obras para instalar la red de captadores, así como el precio del sistema elegido de tubos captadores. A continuación se describen las características de los intercambiadores geotérmicos horizontal y vertical.

Un captador horizontal es en esencia un serpentín, como se aprecia en la Fig. 10.10a, por el que circula el fluido frigorífico, que se coloca bajo tierra como mínimo a 60 cm. Debe cubrir una superficie equivalente o superior (de 100 a 120 %) a la que hay que calentar (Linares, 2010). Utilizan el calor acumulado en las capas más superficiales de la tierra. Hasta 15 m de profundidad, dicho calor está suministrado esencialmente por el sol y las lluvias. Por este motivo, las sondas horizontales son más sensibles a las fluctuaciones de la temperatura superficial y deben instalarse en áreas amplias y libres de construcciones, pavimentación o vegetación que pueda disminuir la aportación de calor al suelo. Los tubos de polietileno (normal o reticulado, según el tipo de terreno) se tienden en posición horizontal en una excavación de 1 m a 3 m de profundidad. Una vez terminada la colocación, se rellena la excavación y se compacta la tierra (Caleffi, 2011). La instalación de bombas de calor geotérmicas con sondas horizontales requiere: disponer de una superficie de terreno para extender los captadores horizontales, la existencia de un suelo sobre el macizo rocoso, restricción en el empleo de dicha superficie (pues no admitirá, una vez enterrada la red de captadores, ninguna planta de raíces profundas o con ramificaciones en profundidad, y supondrá una dificultad para cualquier servicio añadido posterior que deba atravesar el subsuelo (redes telefónicas, TV por cable, desagües, etc.)).

Dentro de las ventajas, se tienen: es una instalación limpia y ecológica, requiere poca profundidad para colocar la red de tubos captadores y el sistema de tendido es sencillo, su coste es bajo, no precisa instalaciones exteriores al entorno de la finca, y no requiere permisos ni autorizaciones especiales (aparte del permiso de obra), en el movimiento de tierras el volumen excavado se repone como relleno del hueco originado, y el mantenimiento de la red de captadores es prácticamente nulo.

Los captadores enterrados *slinky* pertenecen a la configuración horizontal, pero en este caso la tubería se dispone en forma de espiral o enrollada, lo cual permite intercambiar más energía en menos espacio, como se observa en la Fig.10.10b.

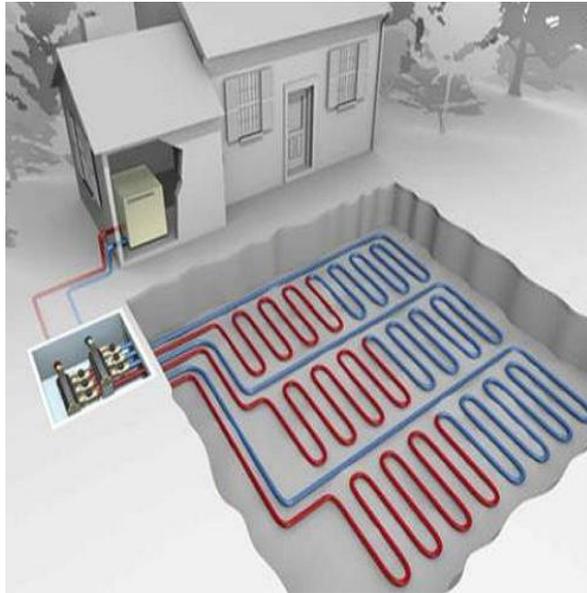
El captador vertical es una sonda hundida verticalmente en la tierra a la profundidad que se precise, hasta alcanzar a veces los 100 metros, como se muestra en la Fig. 10.11. Se basan en el hecho de que, a más de 20 m de profundidad, la temperatura del subsuelo es constante y no se ve afectada por las variaciones atmosféricas a lo largo del día o del año, A partir de los

20 m, la temperatura del subsuelo aumenta aproximadamente 3 °C cada 100 m de profundidad.

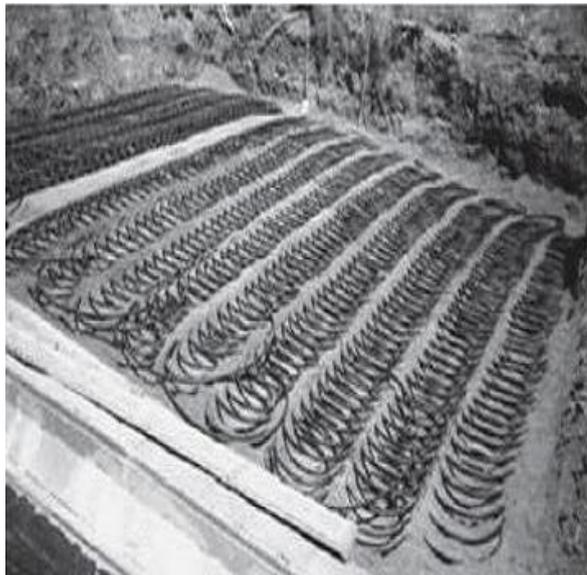
Para instalar las sondas verticales, cuya longitud varía entre 20 y 150 m, se hacen perforaciones en el terreno donde se introducen uno o dos circuitos. (Caleffi, 2011). Respecto de los tubos captadores, estos pueden ocupar el interior del sondeo, formando pares de tubos en U como se aprecia en la Fig. 10.12, cuyas salidas se conectan al circuito primario de las bombas de calor geotérmicas (Llopis y Rodrigo, 2008).

El sistema de perforación es el utilizado habitualmente para hacer pozos. El rendimiento del captador aumenta si se encuentra un nivel freático, pues el agua facilita el intercambio de calor. Si no se encontrara agua se necesita más superficie de contacto o, lo que es lo mismo, más profundidad. De existir agua en el subsuelo las sondas pueden ser abiertas o cerradas: las abiertas aprovechan el agua como líquido portador de las calorías a la bomba y, una vez utilizada, se devuelve al acuífero con el fin de no agotarlo. Las sondas cerradas disponen de un líquido refrigerante en su interior, de tal forma que siempre es el mismo líquido el que está en movimiento dentro del circuito (Linares, 2010).

El captador vertical requiere menos terreno que el sistema horizontal pero los costes de inversión son mayores. Como ventajas del captador vertical se resaltan que no es necesaria la existencia de un suelo sobre el macizo rocoso y que presenta mejores niveles de conductividad térmica, por lo que la longitud del tubo captador es menor que en los captadores horizontales para las mismas necesidades energéticas. Por otro lado, los rendimientos para refrigeración son muy superiores en los captadores verticales, también llamados sondas geotérmicas.



(a) Captadores horizontales.



(b) Captadores horizontales Slinky.

Figura 10.10: Instalación de bomba de calor geotérmica. Fuente: (Caleffi, 2011).

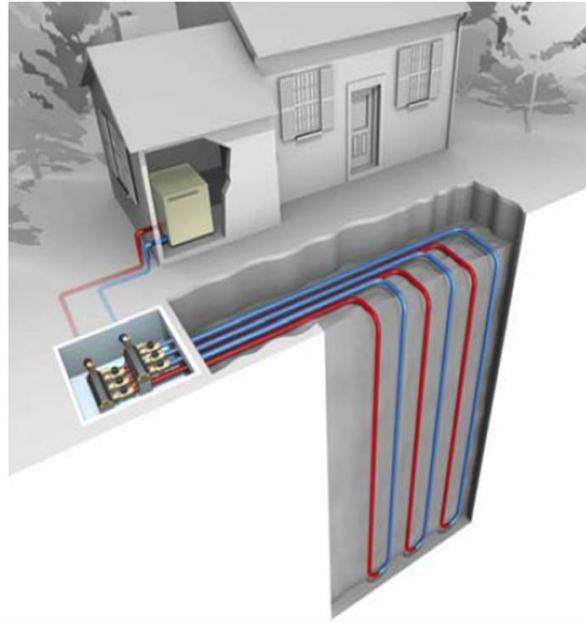


Figura 10.11: Bomba de calor geotérmica con captadores verticales. Fuente: (Caleffi, 2011).

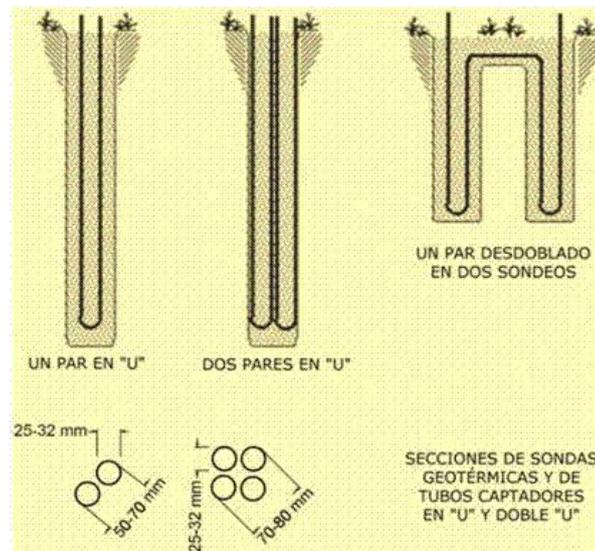


Figura 10.12: Tipos de tubos captadores verticales. Fuente: (ClimateMaster, 2006).

10.4.3. Herramientas informáticas para el diseño del intercambiador geotérmico

El diseño de los intercambiadores geotérmicos sigue la metodología de diseño de la International Ground Source Heat Pump Association (IGSHPA). El método IGSHPA está basado en la teoría de la fuente de calor en forma de una línea infinita (Kelvin Line Source Theory) desarrollado por Ingersoll y Plass. “Según esta teoría, un intercambiador de calor que cede calor al suelo se comporta como una fuente de calor con un espesor pequeño y una longitud infinita, y por tanto sólo cede calor en el sentido radial” (Atecyr, 2008).

Existen en el mercado varios programas comerciales de diseño de intercambiadores geotérmicos. En este trabajo se analizó el caso de estudio usando el software EED (Earth Energy Designer). A continuación se describen las principales características del *software* Earth Energy Designer y del programa GeoCIATESA.

El *software* EED permitir diseños de grandes instalaciones, dispone de una base de datos amplia sobre propiedades de diversos tipos de suelos, materiales, fluidos calo-portadores y configuraciones de intercambiadores geotérmicos, por lo que dicho *software* se ha constituido en una herramienta útil para el diseño de sistemas con bomba de calor geotérmica (GSHP) y de pozos de almacenamiento térmico. Su facilidad de uso, corta curva de aprendizaje y rápidos tiempos de cálculo son otras de sus ventajas. Por las ventajas comparativas que presenta el *software* EED, se elige dicho *software* para analizar el caso de estudio. En la siguiente sección se presenta la plataforma del *software*, las ventanas de entrada de datos y las ventanas con los resultados obtenidos. En base a los resultados obtenidos con el *software* EED, se elige la configuración que cumple con requerimientos energéticos del sistema y posteriormente se calculan las pérdidas de carga del intercambiador geotérmico usando el programa GeoCiatesa, debido a que el *software* EED no las calcula.

El programa Geo-CIATESA (Ciatesa, 2008) cuenta con la base de datos de las condiciones climatológicas y tipos de suelos de las poblaciones de España. El *software* es propiedad de la Compañía Industrial de Aplicaciones Térmicas, S.A. CIATESA fue desarrollado por el Grupo de Investigación y Modelado de Sistemas Térmicos, adscrito al Instituto de Ingeniería Energética de la Universidad Politécnica de Valencia, en el año 2004, para intercambiadores de calor enterrados acoplados a bombas de calor agua-agua Ciatesa. El programa se distribuye de manera gratuita por la firma comercial CIATESA. Para el presente trabajo se adquirió a través del Laboratorio de Calor y Frío Industrial de la Universidad de Valladolid, durante el curso de Experto en Ingeniería de Climatización. El programa incorpora una base de datos de equipos agua-agua, datos climáticos, suelos, datos de tuberías, fluidos, etc., que permite diseñar el intercambiador enterrado. La plataforma del programa está formada por cuatro pantallas de entrada de datos y una de resultados. Como entrada de datos se tienen: la geometría del intercambiador geotérmico, las características del material de las tuberías, las características del emplazamiento y los accesorios de la configuración.

El programa GeoCiatesa es adecuado para el análisis de pequeñas instalaciones, que no sobrepasen los 40 kW. Por otra parte, el programa tiene poca sensibilidad en el cálculo de la profundidad total con la variación de la distancia entre pozos y no permite introducir unas temperaturas máximas y mínimas límites para que el fluido calo-portador nunca sobrepase

una temperatura determinada o nunca descienda por debajo de una temperatura mínima (Pomar, 2012).

10.4.4. Software Earth Energy Designer

La plataforma del *software* Earth Energy Designer (EED) consta de siete menús: archivo, entrar, datos de coste, hallar, salida, configuración y ayuda. A continuación se explican cada uno de estos menús.

Menú archivo: la Fig. 10.13 muestra el menú archivo con cada una de las pestañas identificativas. La versión DEMO no permite el uso de ninguna de las pestañas de la ventana archivo.

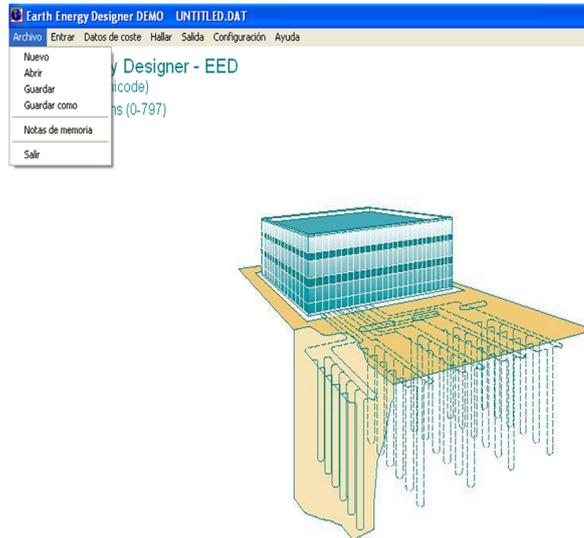


Figura 10.13: Menú archivo del *software* Earth Energy Designer. Fuente:(Blomberg et al., 2008)

Menú entrar: en el menú entrar se escriben los datos sobre las propiedades del suelo, propiedades del pozo e intercambiador de calor, resistencia térmica del pozo, fluido calo-portador, carga base, carga pico y periodo de simulación, como se muestra en la Fig. 10.14. A continuación se calculan o eligen cada uno de estos datos para el caso de estudio.

Propiedades del suelo: se requiere conocer la conductividad térmica del suelo, capacidad calorífica volumétrica, temperatura de la superficie de la tierra y calor geotérmico del fluido, como se aprecia en la Fig. 10.15. Si no hay datos de medición de las propiedades del terreno donde se va a ubicar el intercambiador geotérmico, se elige el tipo de roca o suelo y sus propiedades de la amplia base de datos que ofrece el *software* EED. A continuación se describe el procedimiento de elección del suelo y sus propiedades para los terrenos del Paseo del Cauce donde se encuentra ubicado el edificio Aulario.

La Universidad de Valladolid no cuenta con estudios de las propiedades del terreno del Campus del Esgueva, por tanto se consultan las propiedades de los terrenos de Valladolid proporcionados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 2014). En la Hoja de Valladolid están presentes los tres tramos típicos del Mioceno castellano: fangos y canales arenosos (Tierra de Campos); arcillas, margas, yesos y calizas (Cuestas); y calizas con gasterópodos (Páramos).

Se analizan diferentes tipos de terrenos encontrando que el conglomerado se define como una roca sedimentaria, que puede formarse a las orillas de los ríos. Por su composición pueden clasificarse en terrígenas (arcilla o limo, conglomerado, arenisca, etc.) y en carbonatadas (creta, caliza, dolomita, etc.), entre otras. Por las características expuestas anteriormente, se elige de la base de datos del EED el conglomerado que tiene las siguientes propiedades:

- Conductividad térmica 2.8 W/mK
- Capacidad calorífica volumétrica 2.1 MJ/m³K

La temperatura de la superficie de la tierra se toma la misma que la temperatura media anual de Valladolid, esto es, 12 °C.

El calor geotérmico del fluido para Valladolid, es de 0.09 W/m² (tomado de la base de datos del *software* EED).

Pozo e intercambiador de calor: el programa EED proporciona una base de datos de 798 configuraciones básicas en serie o en paralelo, tanto para el tipo horizontal como vertical. Las características de cada configuración dependen del tipo de configuración, horizontal o vertical, como se describe a continuación.

Bucles: es el número de circuitos en paralelo en que se divide el flujo principal. Esta característica se aplica para ambas configuraciones, horizontal y vertical.

La configuración horizontal se define a través de las variables mostradas en la Fig. 10.16. D representa la distancia entre dos secciones de tubo adyacentes, N el número de secciones

del intercambiador en perfil paralelo y P la profundidad de los tubos.

La configuración vertical se describe definiendo las variables que se muestran en la Fig.10.17, donde pozo es la perforación en el terreno; M , el número de filas de pozos, representa en número de pozos en dirección y ; N , el número de columnas de pozos, representa el número de pozos en dirección x ; D , la distancia entre dos pozos adyacentes en la misma dirección, sea x o y .

A continuación se analiza la influencia de la configuración sobre el rendimiento del sistema. El estudio realizado por Ciatesa (Ciatesa, 1998) compara tres disposiciones y su influencia en el rendimiento de refrigeración COP_r . Dicho estudio concluye que el COP_r es mayor para configuraciones que se extienden en forma lineal y disminuye en disposiciones cuadrada, como se observa en la Fig. 10.18. Respecto de la distancia entre pozos, estudios realizados en la ciudad de Madrid concluyen que para $D=4$ m, el COP_r alcanza su máximo y es constante (Ciatesa, 1998).

A continuación se describen las características de los pozos y de las tuberías usadas para el caso de estudio.

- Configuración: para comenzar el análisis se elige la configuración vertical formada por 6 pozos en dirección x y 4 pozos en dirección y , para un total de 24 pozos, que corresponde a la configuración número 332 de la base de datos del programa EED.
- Tipo de intercambiador geotérmico: se elige el tipo de tuberías doble en forma de U, que es el más frecuente en el centro de Europa (Blomberg et al., 2008).
- Profundidad de pozo: el programa requiere que se sugiera una profundidad de pozo para comenzar la simulación. Se toman 110 m de profundidad de pozo y 4 m de separación entre pozos.
- Diámetro: se refiere al diámetro de la perforación, que depende de la separación entre los tubos con el fluido caliente y frío, es decir, para el caso de calefacción, será el fluido que entra al pozo y cede el calor proveniente del recinto a calentar y el fluido que sale del pozo hacia el recinto a calentar. El *software* sugiere diámetros de perforación habituales, incluyendo estándares API, y realiza una comprobación si el diámetro es suficiente para alojar los tubos grandes. Se eligen 130 mm de diámetro de perforación, que cumple con la comprobación del *software* EED.
- Resistencia de contacto tubería/relleno: la resistencia térmica de contacto entre la tubería y el relleno del pozo depende de la calidad de la operación de inyección. Al bombear en la perforación de abajo hacia arriba, es posible alcanzar un valor de $0.0 \text{ m}^2\text{K/W}$ de lo contrario $0.01 \text{ m}^2\text{K/W}$ o, con un relleno pobre, $0.02\text{-}0.03 \text{ m}^2\text{K/W}$ (Blomberg et al., 2008). Se supone un llenado de manera que la resistencia de contacto sea de $0.01 \text{ m}^2\text{K/W}$.
- Conductividad térmica de llenado: conductividad térmica del pozo de sondeo de relleno. Se utiliza un relleno con el lodo de perforación y un valor de 0.6 W/mK . El lodo bentonítico o lodo de perforación es una mezcla de agua con bentonita, un tipo de arcilla muy densa. Es utilizado para perforar pozos de sondeo y, muy frecuentemente,

mientras se perforan pozos de petróleo y gas natural. Además se usa para trabajos más sencillos como los pozos de agua.

- Tasa de flujo volumétrico o caudal volumétrico: la tasa de flujo volumétrico o caudal volumétrico se necesita para calcular el número de Reynolds. Se toma como base el caudal sugerido por la bomba de calor elegida, en este caso Immosolar serie IS-WW de 164 kW de potencia, que recomienda un caudal de 7.81 l/s.
- Diámetro exterior de la tubería: para la elección del diámetro de las tuberías se debe llegar a un compromiso entre la caída de presión y el funcionamiento térmico, ya que éste debe ser lo suficientemente grande para producir una pérdida de carga pequeña (y así necesitar menor potencia de bombeo), y lo suficientemente pequeño para asegurar altas velocidades y poder garantizar turbulencia del fluido dentro del tubo (de manera que se favorezca el traspaso térmico entre el fluido que circula y la pared interior). Cuanto mayor sea la turbulencia, mayor será el intercambio térmico. La condición que asegura la turbulencia está dada por la ecuación de Reynolds 10.12, siendo Re es el número de Reynolds que caracteriza si un flujo es turbulento o laminar, Q el caudal (m^3/s), D el diámetro del tubo (m) y ν la viscosidad cinemática (m^2/s).

El intercambiador geotérmico tendrá como objetivo transferir calor desde el recinto hacia el subsuelo, por esta razón la conductividad térmica es otra característica importante en la elección del material. Otras propiedades a tener en cuenta que favorezcan la aplicación del intercambiador de calor geotérmico son: la resistencia al desgaste y a la rotura, estanqueidad, peso y coste (Flament, 2010; IDAE, 2010). Las tuberías de materiales poliméricos reúnen las características de alta flexibilidad y resistencia a la corrosión. Se opta por un tubo de polietileno DN32 PN10 por ser los más frecuentes para los intercambiadores de calor en perforaciones en el centro de Europa.

- Espesor de la pared (o grosor): el programa EED carga de la base de datos el espesor de la pared del tubo elegido. En el caso de la tubería DN32 PN10, el espesor es de 3 mm.
- Conductividad térmica de la tubería: el programa EED carga la base de datos la conductividad térmica del material de la tubería. En el caso del polietileno DN32 PN10, 0.42 W/mK de conductividad térmica.
- Espaciamiento entre tubos: se refiere a la distancia de centro a centro, y de arriba abajo de los tubos en cada U. Para tubos con 32 mm de diámetro, una distancia entre tubos de 0.085 m es suficiente.

Las características de los pozos y la configuración del intercambiador geotérmico descritos anteriormente se muestran en la Fig.10.19.

Resistencia térmica del pozo: el programa EED presenta dos opciones: permitir que el programa calcule los valores de la resistencia térmica del pozo o usar valores constantes, si se conoce la resistencia térmica fluido/pozo e interna. En nuestro caso se elige la primera opción porque no se conocen los valores de las resistencias térmicas, como se muestra en la Fig. 10.20.

Fluido calo-portador: como fluido circulante por el intercambiador de calor enterrado, se usa etilenglicol debido a que las condiciones climáticas donde opera el fluido alcanzan

temperaturas de congelación. Las propiedades físicas de los fluidos más usados se muestran en la Fig. 10.22. Generalmente se usa agua, agua con anticongelantes o sustancias que mejoren su conductividad térmica, pero con la suficiente garantía para evitar deposiciones o incrustaciones de materiales disueltos o en suspensión, con la finalidad de alargar la vida útil de los tubos, reducir el mantenimiento y minimizar las resistencias térmicas al intercambio de calor. Se usa etilenglicol al 25 % para garantizar la no congelación del agua en los tubos enterrados. El menú del programa EED con las propiedades del etilenglicol se muestra en la Fig. 10.21.

Carga base: la pestaña de carga base consta de tres partes: primero, la carga base de calefacción y de refrigeración anual y el perfil mensual promedio. Estos valores se calcularon usando el programa de simulación energética Energy Plus, cuyos resultados se muestran en las Tablas 9.30 y 9.31 del Capítulo 9. Segundo, la energía requerida para agua caliente sanitaria. El edificio Aulario de la UVA no tiene carga de agua caliente sanitaria. Tercero, el factor de rendimiento estacional promedio anual (SPF).

Se sigue el procedimiento de cálculo del SPF planteado por la Decisión de la Comisión de 1 de marzo de 2013 (2013/114/UE) (IDAE, 2013), donde se establece que la determinación del SPF debe efectuarse de acuerdo con la norma EN14825:2012. El SPF se refiere al coeficiente de rendimiento estacional neto en modo activo (SCOPnet), en el caso de las bombas de calor accionadas eléctricamente. Las prestaciones medias estacionales de un equipo o sistema (SPF) se calcularán multiplicando sus prestaciones nominales (COP) por un factor denominado factor de ponderación representativo (FP) y por un factor de corrección (FC) para las distintas tecnologías y aplicaciones de las bombas de calor, como muestra la ecuación 10.13. Se obtiene el SPF de 3.16, que resulta de usar el COP nominal de 5.2 de la bomba de calor elegida; el factor de ponderación de 1.008 para Valladolid (zona climática D) para bombas de calor geotérmicas con intercambiadores verticales, como se muestra en la Fig. 10.23; y el factor de corrección de 0.606 para bombas de calor con temperatura de distribución para calefacción de 55 °C, como se observa en la Tabla 10.2. La Fig. 10.24 muestra los datos de carga base del edificio Aulario.

Se confirma que el sistema geotérmico es renovable porque cumple la condición de que el SPF sea mayor de 2.5. El hecho de que la temperatura de salida de impulsión del condensador de la bomba de calor sea de 55°C, 10 °C más alto que las que suelen trabajar en calefacción, explica que el COP estacional obtenido (3.16) sea un poco más bajo que el que se obtendría en una bomba geotérmica.

Carga pico: las cargas extras de los picos de calor/frío al final de cada mes se toman con base en la potencia máxima de la bomba de calor elegida. Para el caso de estudio, 97.1 kW. Para la duración (en horas), se toma como base el horario de uso del edificio: de 8:00 horas a 21:00 horas, lo que supone un total de 13 horas diarias; como se muestra en la Fig. 10.25.

$$Re = \frac{4Q}{\pi \vartheta D} \quad (10.12)$$

$$SPF = COP_{nominal} \cdot FP \cdot FC = 3.16 \quad (10.13)$$



Figura 10.14: Menú entrar. Fuente: *software EED* (Blomberg et al., 2008).

Tabla 10.2: Factores de corrección. Fuente: *software EED* (Blomberg et al., 2008).

| T ^a de distribución calefacción | Factor de corrección 35 |
|--|-------------------------|
| 1 | |
| 40 | 0.868 |
| 45 | 0.765 |
| 50 | 0.677 |
| 55 | 0.606 |



Figura 10.15: Menú propiedades del suelo. Fuente: *software EED* (Blomberg et al., 2008).

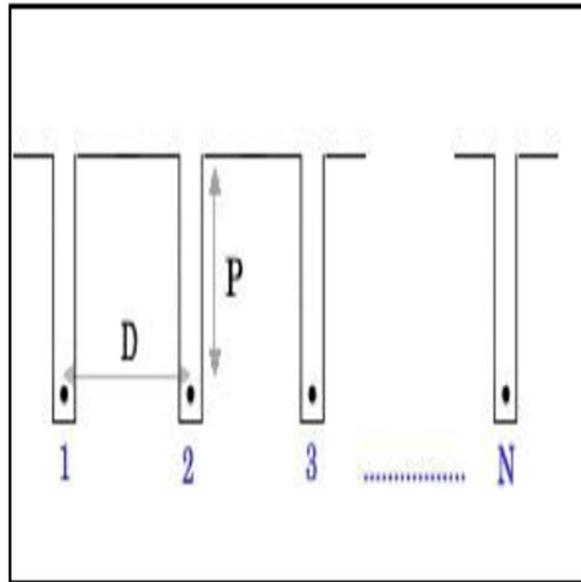


Figura 10.16: Variables de la configuración horizontal. Fuente: (Ciatesa, 1998).

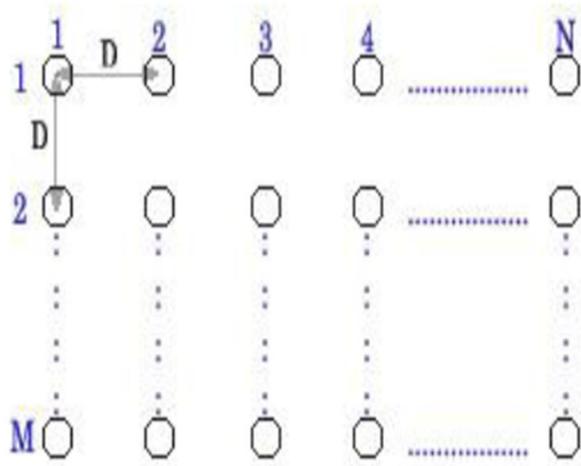


Figura 10.17: Variables de la configuración vertical. Fuente: (Ciatesa, 1998).

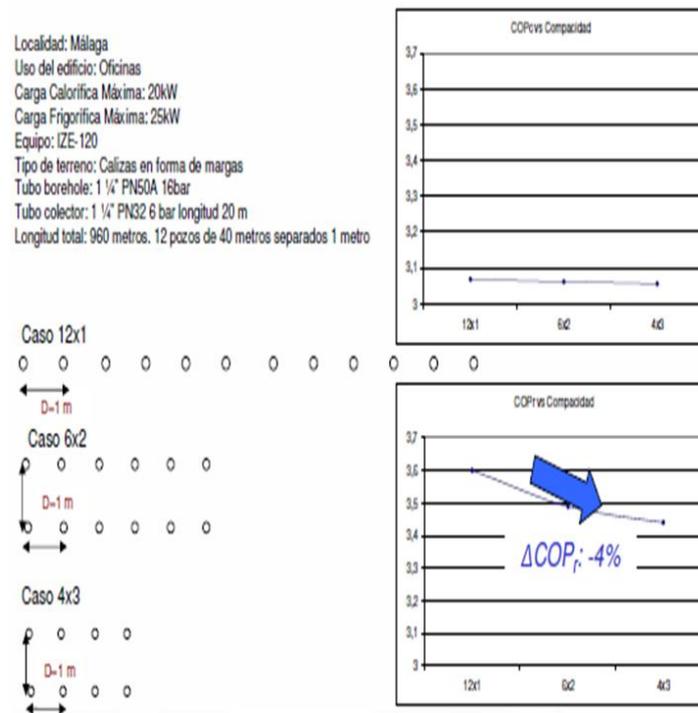


Figura 10.18: Influencia de la configuración. Fuente: (Ciatesa, 1998).

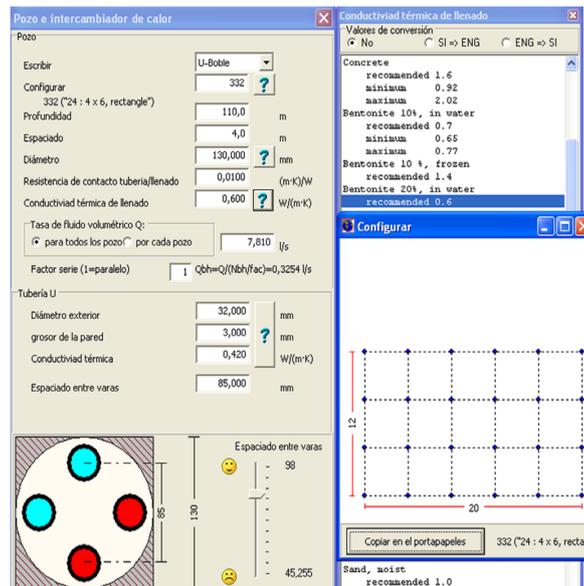


Figura 10.19: Pestaña con las características de los pozos. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).

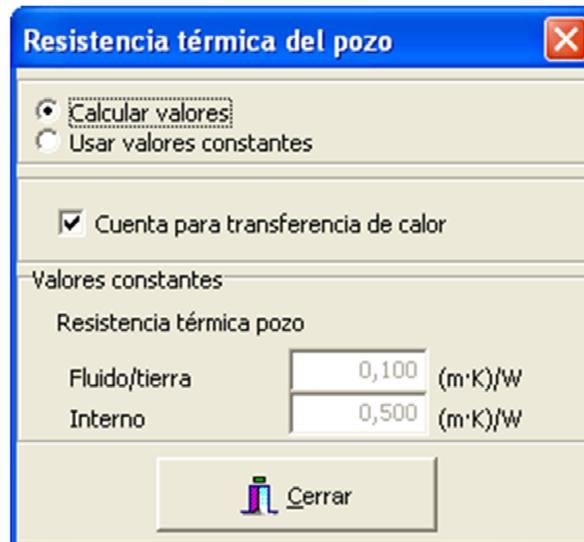


Figura 10.20: Pestaña con la resistencia térmica. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).

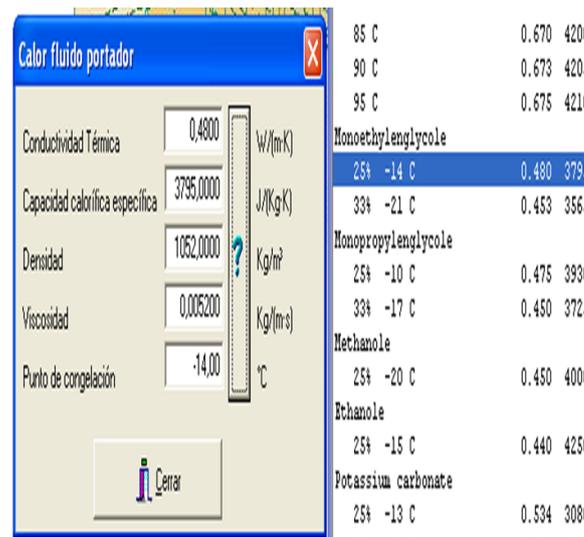


Figura 10.21: Propiedades del fluido caloportador. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).

| | Agua | Etilenglicol | Propilenglicol | Metanol |
|--|-------|--------------|----------------|---------|
| Densidad a 20 °C (g/cm ³) | 1 | 0,9259 | 0,8630 | 0,6585 |
| Punto congelación °C (30% volumen) | 0 | -13 | -12 | -26 |
| Punto ebullición °C | 100 | 197 | 187 | 64 |
| Calor Específico a 15 °C (kJ/Kg.K) | 4,187 | 2,185 | 2,50371 | 2,47021 |
| Viscosidad a 0 °C (Pa.s) · 10 ⁻³ | 1,79 | 57,4 | 243 | 0,87 |
| Viscosidad a 20 °C (Pa.s) · 10 ⁻³ | 1,01 | 20,9 | 60,5 | 0,60 |
| Viscosidad a 40 °C (Pa.s) · 10 ⁻³ | 0,655 | 9,5 | 18,0 | 0,45 |
| Conductividad térmica a 20 °C (kW/m.K) · 10 ³ | 0,60 | 0,26 | 0,20 | 0,21 |

Figura 10.22: Propiedades físicas de los fluidos. Fuente: (Atecyr, 2008).

| | Zona Climática | | | | |
|--|----------------|-------|-------|-------|-------|
| | A | B | C | D | E |
| Equipos centralizados (viviendas unifamiliares) | 0.79 | 0.71 | | 0.68 | |
| Equipos centralizados (viviendas en bloque) | 0.79 | 0.75 | | 0.68 | |
| Equipos individuales tipo split (viviendas individuales y viviendas en bloque) | 0.60 | 0.62 | | 0.58 | |
| Bombas de calor geotérmicas con intercambiadores verticales (viviendas unifamiliares) | 1.127 | 1.125 | 1.073 | 1.012 | 0.951 |
| Bombas de calor geotérmicas con intercambiadores verticales (viviendas en bloque) | 1.131 | 1.116 | 1.072 | 1.008 | 0.937 |
| Bombas de calor geotérmicas con intercambiadores horizontales (viviendas unifamiliares) | 0.949 | 0.920 | 0.876 | 0.824 | 0.766 |

Figura 10.23: Factores de ponderación. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).

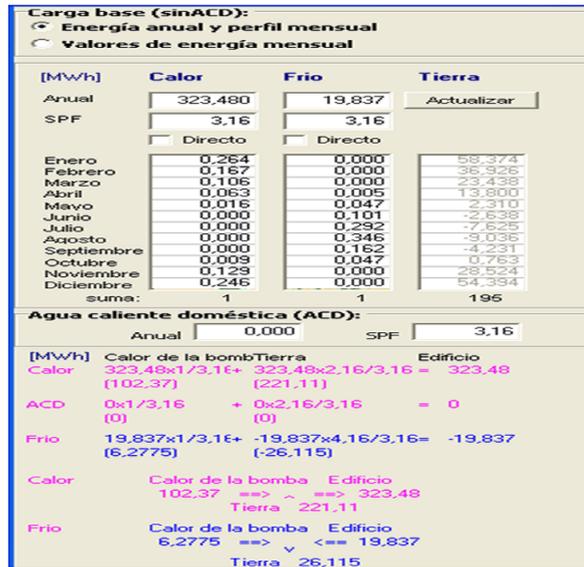


Figura 10.24: Pestaña con carga base del edificio Aulario. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).



Figura 10.25: Pestaña con la carga pico del edificio Aulario. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).

Menú datos de coste: si se dispone de datos de coste, el *software* EED presenta la opción de analizar los costes de la configuración que cumple los requisitos. La Fig. 10.26 muestra la ventana para la entrada de dichos datos.

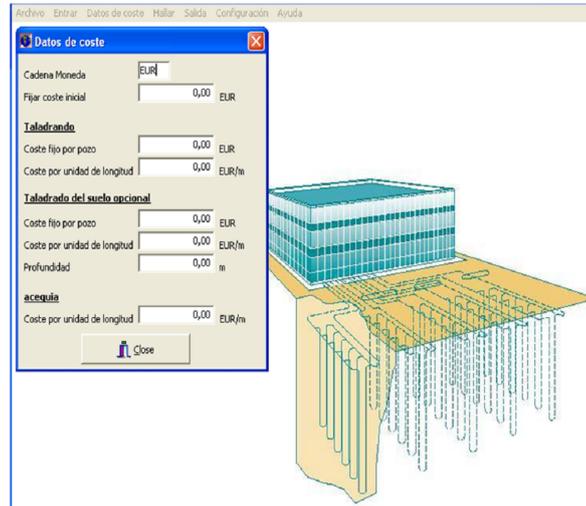


Figura 10.26: Ventana datos de coste. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).

Menú hallar: el menú hallar mostrado en la Fig. 10.27, permite calcular la temperatura media del fluido, la longitud requerida del pozo y la longitud requerida para el pozo mediante optimización. Permite también establecer restricciones respecto a la temperatura del fluido, fijando las temperaturas máximas y mínimas del fluido caloportador. Para el caso de estudio, se fijan las temperaturas del fluido como se muestra en la Fig. 10.28.

El menú permite cambiar las temperaturas y realizar nuevamente la simulación. Una vez introducidos los datos de entrada, el *software* EED calcula el Reynolds, si el valor es menor a 2300, sale un mensaje indicando que el fluido no es turbulento. El usuario puede seguir la simulación o cambiar los datos de entrada a fin de que se cumpla la condición de turbulencia.

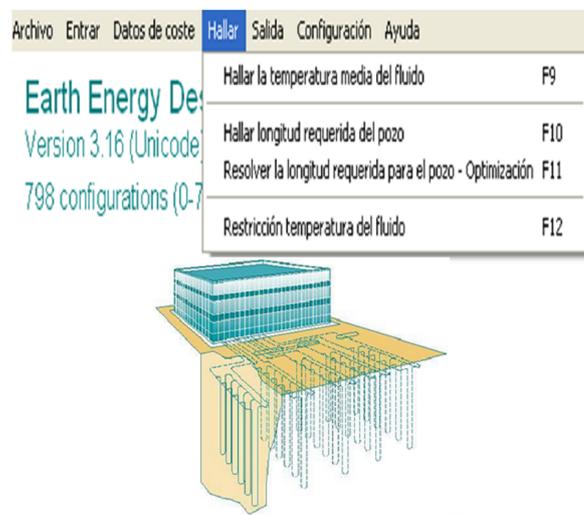


Figura 10.27: Ventana hallar. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).



Figura 10.28: Pestaña con las temperaturas fijas medias mínima y máxima del fluido. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).

Menú salida: la longitud de la sonda geotérmica necesaria se calcula usando la ecuación Q_{sondeo} , en función del factor de eficiencia anual o estacional de una bomba de calor, $\overline{COP}_{\text{estacional}}$, usando la ecuación 10.16 (Benítez, 2011).

Respecto al gradiente geotérmico del suelo, a profundidades superiores a 15 m, la temperatura de las rocas, que reciben el calor terrestre que proviene de las profundidades, no depende de las variaciones estacionales de temperatura, ni del clima, sólo de las condiciones geológicas y geotérmicas. Por debajo de 20 m de profundidad, la temperatura aumenta 3 °C cada 100 m como consecuencia del gradiente geotérmico (Llopis y Rodrigo, 2008). Por debajo de 100 m se suele establecer un gradiente geotérmico claro.

El programa EED proporciona un informe de datos de salida y gráficas. En la Fig. 10.29 se muestra el número de pozos, la profundidad de cada pozo y la longitud total del pozo. Posteriormente se resumen los datos de diseño que se introdujeron en las diferentes pantallas de entrada, con las propiedades del suelo; las propiedades del pozo y del fluido caloportador; la carga base y carga pico en las Figs. 10.30, 10.31 y 10.32, respectivamente. La longitud del pozo, el número de Reynolds y la resistencia térmica del pozo, la resistencia térmica fluido/tubería, la resistencia térmica tubería/llenado, calculadas con base en la geometría y propiedades del pozo, el material de las uniones y el material de la tubería se muestran en la Fig. 10.33. El programa EED calcula la longitud total de las sondas en función de la potencia de sondeo Q_{sondeo} y de la potencia disipada por el intercambiador geotérmico, aplicando la ecuación 10.14. Para el caso de estudio, se obtiene un valor de 176 m para cada pozo L_u , con una longitud total de las sondas de 4223.91 m para un total de 24 pozos.

Posteriormente se presentan los resultados de la tasa de extracción de calor del pozo, que muestra la carga base y la carga pico de calor de enero a diciembre, como se aprecia en la Fig. 10.34. Las temperaturas medias del fluido desde el año 1 al año 25, desde el mes de enero a diciembre, se presenta, en las Figs. 10.35, 10.36 y 10.37.

Finalmente, el programa presenta la opción de optimización de la longitud total mínima del pozo para un conjunto dado de parámetros y realiza el cálculo de la longitud del pozo requerida para varias configuraciones que cumplen con los requerimientos del sistema estudiado, como se observa en la Fig. 10.38. De dicha optimización se obtiene que se requieren 24 pozos de 176 m de profundidad, con un total de 4223.91 m de longitud total del intercambiador geotérmico.

En los resultados de la optimización, mostrados en la Fig. 10.38, se observa que existen 25 configuraciones que cumplen con los requerimientos energéticos del edificio. Se elige la configuración rectangular número 330 porque requiere menos profundidad de pozo, variable que tiene un peso importante debido a los altos costes de perforación. La configuración 330, mostrada en la Fig. 10.39, está formada por 16 pozos (4 en dirección x y 4 pozos en dirección y) con 7 m de espaciado y 207 m de profundidad, con un total de 3318 m de longitud. Las características del terreno requerido son de 21 m de longitud por 21 m de anchura, es decir, una superficie de 441 m².

$$L_{\text{sondeo}} = Q_{\text{sondeo}}/Q_{\text{disipada}} \quad (10.14)$$

$$L_u = \frac{L_{\text{Total}}}{2.N.M} \quad (10.15)$$

$$Q_{sondeo} = Q_{refrigeración} \frac{\overline{COP}_{estacional} - 1}{\overline{COP}_{estacional}} \quad (10.16)$$

$$No.Sondas = L_{sondeo}/profundidad \quad (10.17)$$

```

EED Version 3,16 DEMO www,buildingphysics,com
Archivo de entrada:UNTITLED,DAT
Este archivo de salida:UNTITLED,OUT Fecha: 27/06/2014 Tiempo: 10:41:31

Notas de memoria para el proyecto
[]

DATOS RÁPIDOS
Coste -
Número de pozos 24
Profundidad del pozo 176,00 m
Longitud total del pozo 4223,91 m

Datos de diseño
=====

Suelo

Conductividad térmica del suelo 3,500 W/(m·K)
Capacidad calórica del suelo 2,160 MJ/(m³·K)
Temperatura de la superficie del suelo 8,00 °C
Flujo de calor geotérmico 0,0600 W/m²

```

Figura 10.29: Menú salida de resultados. Características del suelo. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).

```

EED Version 3,16 DEMO www.buildingphysics.com
POZO

Configuración: 332 ("24 : 4 x 6 rectangle") 0:41:3
Profundidad del pozo 176,00 m
Espaciado entre pozos 6,00 m
Instalación pozo U-Boble
Diámetro pozo 130,00 mm
Diámetro Tubería-U 32,000 mm
Grosor Tubería-U 3,000 mm
Conductividad térmica tubería-U 0,420 W/(m·K)
Espaciado entre las varas de tubería-U 85,000 mm
Conductividad térmica de llenado 0,600 W/(m·K)
Resistencia de contacto tubería/llenado 0,0000 (m·K)/W

RESISTENCIAS TÉRMICAS

Resistencias térmicas de los pozos son calculadas
Número de multipolos 10
La Transferencia de calor interna entre los canales superior e inferior es considerada

Fluido portador de calor

Conductividad térmica 0,4800 W/(m·K)
Capacidad calorífica específica 3795,000 J/(Kg·K)
Densidad 1052,000 Kg/m³
Viscosidad 0,005200 Kg/(m·s)
Punto de congelación -14,0 °C
Tasa de flujo por pozo 0,325 l/s

```

Figura 10.30: Menú salida de resultados. Características del pozo. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008)

```

CARGA BASE

Carga anual de ACD 0,00 MWh
Carga de calentamiento anual 323,48 MWh
Carga de enfriamiento anual 19,84 MWh

ACD 3,16
Factor de rendimiento por estación (calentamiento)3,16
Factor de rendimiento por estación (enfriamiento)3,16

Perfil de energia mensual [MWh]
Mes Factor Carga de calor Carga de frio Carga de suelo
ENE 0,264 85,40 0,000 0,00 58,374
FEB 0,167 54,02 0,000 0,00 36,926
MAR 0,106 34,29 0,000 0,00 23,438
ABR 0,063 20,38 0,005 0,10 13,800
MAY 0,016 5,18 0,047 0,93 2,310
JUN 0,000 0,00 0,101 2,00 -2,638
JUL 0,000 0,00 0,292 5,79 -7,625
AGO 0,000 0,00 0,346 6,86 -9,036
SEP 0,000 0,00 0,162 3,21 -4,231
OCT 0,009 2,91 0,047 0,93 0,763
NOV 0,129 41,73 0,000 0,00 28,524
DIC 0,246 79,58 0,000 0,00 54,394
-----
Total 1,000 323,48 1,000 19,84 194,998

```

Figura 10.31: Menú salida de resultados. Carga base. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).

```

CARGA PICO

Picos de potencia mensual [kW]
Mes  Pico de calor  Duración  Pico de frío  Duración [h]
ENE   164,00      15,0     0,00         0,0
FEB   164,00      15,0     0,00         0,0
MAR   164,00       8,0     0,00         0,0
ABR   164,00       0,0     0,00         0,0
MAY   164,00       0,0     0,00         0,0
JUN    0,00       0,0    131,80       24,0
JUL    0,00       0,0    131,80       24,0
AGO    0,00       0,0    131,80       0,0
SEP    0,00       0,0    131,80       8,0
OCT   164,00       8,0     0,00         0,0
NOV   164,00      15,0     0,00         0,0
DIC   164,00      15,0     0,00         0,0

Numero de años de simulación      25
Primer mes de operación           ENE

```

Figura 10.32: Menú salida de resultados. Carga pico. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).

```

VALORE CALCOLADOS
=====

Longitud total del pozo           4223,91 m

RESISTENCIAS TÉRMICAS

Resistencia térmica interior del pozo  0,5160 (m·K)/W

Número de Reynolds                1612
Resistencia térmica fluido/tubería    0,1658 (m·K)/W
Resistencia Térmica tubería/llenado    0,0787 (m·K)/W
Resistencia de contacto tubería/llenado 0,0000 (m·K)/W

Resistencia térmica fluido/suelo del pozo 0,1441 (m·K)/W

Resistencia térmica efectiva del pozo   0,1560 (m·K)/W

```

Figura 10.33: Menú salida de resultados. Longitud del pozo. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).

TASA DE EXTRACCIÓN DE CALOR ESPECÍFICO [W/m]

| Mes | Carga base | Pico de calor | |
|-----|------------|---------------|--------|
| ENE | 18,93 | 26,54 | -0,00 |
| FEB | 11,98 | 26,54 | -0,00 |
| MAR | 7,60 | 26,54 | -0,00 |
| ABR | 4,48 | 26,54 | -0,00 |
| MAY | 0,75 | 26,54 | -0,00 |
| JUN | -0,86 | 0,00 | -41,08 |
| JUL | -2,47 | 0,00 | -41,08 |
| AGO | -2,93 | 0,00 | -41,08 |
| SEP | -1,37 | 0,00 | -41,08 |
| OCT | 0,25 | 26,54 | -0,00 |
| NOV | 9,25 | 26,54 | -0,00 |
| DIC | 17,64 | 26,54 | -0,00 |

Figura 10.34: Menú salida de resultados. Tasa de extracción. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).

CARGA BASE: TEMPERATURAS MEDIAS DEL FLUIDO (a final de mes) [°C]

| Año | 1 | 2 | 5 | 10 | 25 |
|-----|------|------|-------|-------|-------|
| ENE | 3,09 | 1,66 | -0,12 | -1,50 | -3,15 |
| FEB | 4,83 | 3,52 | 1,79 | 0,42 | -1,22 |
| MAR | 5,95 | 4,79 | 3,06 | 1,71 | 0,08 |
| ABR | 6,90 | 5,72 | 4,04 | 2,70 | 1,09 |
| MAY | 8,10 | 6,94 | 5,31 | 3,99 | 2,39 |
| JUN | 8,67 | 7,60 | 6,01 | 4,71 | 3,12 |
| JUL | 9,34 | 8,35 | 6,79 | 5,50 | 3,92 |
| AGO | 9,68 | 8,71 | 7,16 | 5,89 | 4,33 |
| SEP | 9,34 | 8,34 | 6,83 | 5,56 | 4,01 |
| OCT | 8,81 | 7,89 | 6,39 | 5,15 | 3,60 |
| NOV | 5,75 | 4,90 | 3,43 | 2,20 | 0,67 |
| DIC | 2,63 | 1,83 | 0,40 | -0,82 | -2,34 |

CARGA BASE: AÑO 25

Temperatura de fluido mínima media -3,15 °C al final de ENE
 Temperatura de fluido máxima media 4,33 °C al final de AGO

Figura 10.35: Ventana salida de resultados. Temperatura media. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).

CARGA PICO DE CALOR: TEMPERATURA MEDIA DE FLUIDO (a final de mes) [°C]₃

| Año | 1 | 2 | 5 | 10 | 25 |
|-----|------|-------|-------|-------|-------|
| ENE | 1,24 | -0,19 | -1,97 | -3,35 | -5,00 |
| FEB | 1,29 | -0,02 | -1,75 | -3,13 | -4,76 |
| MAR | 1,61 | 0,45 | -1,27 | -2,63 | -4,25 |
| ABR | 6,90 | 5,72 | 4,04 | 2,70 | 1,09 |
| MAY | 8,10 | 6,94 | 5,31 | 3,99 | 2,39 |
| JUN | 8,67 | 7,60 | 6,01 | 4,71 | 3,12 |
| JUL | 9,34 | 8,35 | 6,79 | 5,50 | 3,92 |
| AGO | 9,68 | 8,71 | 7,16 | 5,89 | 4,33 |
| SEP | 9,34 | 8,34 | 6,83 | 5,56 | 4,01 |
| OCT | 2,79 | 1,87 | 0,37 | -0,87 | -2,42 |
| NOV | 1,54 | 0,69 | -0,77 | -2,00 | -3,54 |
| DIC | 0,46 | -0,33 | -1,76 | -2,98 | -4,51 |

CARGA PICO DE CALOR: AÑO 25
 Temperatura de fluido mínima media -5,00 °C al final de ENE
 Temperatura de fluido máxima media 4,33 °C al final de AGO

Figura 10.36: Ventana salida de resultados. Temperatura media (continuación). Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).

CARGA PICO DE FRIO: TEMPERATURA MEDIA DE FLUIDO (a final de mes) [°C] e:

| Año | 1 | 2 | 5 | 10 | 25 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| ENE | 3,09 | 1,66 | -0,12 | -1,50 | -3,15 |
| FEB | 4,83 | 3,52 | 1,79 | 0,42 | -1,22 |
| MAR | 5,95 | 4,79 | 3,06 | 1,71 | 0,08 |
| ABR | 6,90 | 5,72 | 4,04 | 2,70 | 1,09 |
| MAY | 8,10 | 6,94 | 5,31 | 3,99 | 2,39 |
| JUN | 18,88 | 17,82 | 16,23 | 14,92 | 13,34 |
| JUL | 19,15 | 18,16 | 16,59 | 15,30 | 13,73 |
| AGO | 9,68 | 8,71 | 7,16 | 5,89 | 4,33 |
| SEP | 18,43 | 17,43 | 15,92 | 14,66 | 13,10 |
| OCT | 8,81 | 7,89 | 6,39 | 5,15 | 3,60 |
| NOV | 5,75 | 4,90 | 3,43 | 2,20 | 0,67 |
| DIC | 2,63 | 1,83 | 0,40 | -0,82 | -2,34 |

CARGA PICO DE FRIO: AÑO 25
 Temperatura de fluido mínima media -3,15 °C al final de ENE
 Temperatura de fluido máxima media 13,73 °C al final de JUL

Figura 10.37: Ventana salida de resultados. Temperatura media (continuación). Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).

Optimización UNTITLE.DAT

Archivo

Configurar 0 - 797 Optimizar Paso de grilla automático Paso de grilla 7 m Longitud total Coste

Área mínima de terreno 30 x 20 m Configurar 70/70 "3 x 7, L2-configuración" Espaciado 5m

Espacio entre pozos 5 - 100 m Redondear valores Mejores configuraciones: 107 330 238 76 201 190 177 1

Profundidad pozo 50 - 300 m 888 Casos intentados: 25 Soluciones encontradas: 25 Listar también casos con advertencias

Máximo número de pozos 2000 Análisis iniciado 10:48:36, parado 10:48:55 tiempo: 15s. Doble click en la columna para detalles DEMO

| Conf. | No. po. | Tipo | Espaciado [m] | Profundid. | Longitud total | Área del terreno | Longitud [m] | Anchura [m] | Comentari. | Coste [E.] |
|-------|---------|--------------------|---------------|------------|----------------|------------------|--------------|-------------|-------------|------------|
| 107 | 16 | 3 x 7 U-configur. | 5 | 219 | 3282 | 300 | 30 | 10 | Elegido p. | 0 |
| 107 | 16 | 3 x 7 U-configur. | 5 | 219 | 3282 | 300 | 30 | 10 | Análisis d. | 0 |
| 330 | 16 | 4 x 4 rectángulo | 7 | 207 | 3318 | 441 | 21 | 21 | Elegido p. | 0 |
| 330 | 16 | 4 x 4 rectángulo | 7 | 207 | 3318 | 441 | 21 | 21 | Análisis d. | 0 |
| 238 | 14 | 2 x 7 rectángulo | 5 | 237 | 3320 | 150 | 30 | 5 | Elegido p. | 0 |
| 238 | 14 | 2 x 7 rectángulo | 5 | 237 | 3320 | 150 | 30 | 5 | Análisis d. | 0 |
| 76 | 16 | 4 x 6 L2-configur. | 6 | 208 | 3334 | 540 | 30 | 18 | Elegido p. | 0 |
| 76 | 16 | 4 x 6 L2-configur. | 6 | 208 | 3334 | 540 | 30 | 18 | Análisis d. | 0 |
| 201 | 16 | 5 x 5 open recta. | 5 | 210 | 3360 | 400 | 20 | 20 | Elegido p. | 0 |
| 201 | 16 | 5 x 5 open recta. | 5 | 210 | 3360 | 400 | 20 | 20 | Análisis d. | 0 |
| 190 | 16 | 4 x 6 open recta. | 5 | 210 | 3367 | 375 | 25 | 15 | Elegido p. | 0 |
| 177 | 14 | 3 x 6 open recta. | 5 | 241 | 3377 | 250 | 25 | 10 | Elegido p. | 0 |
| 116 | 16 | 4 x 7 U-configur. | 5 | 211 | 3381 | 450 | 30 | 15 | Elegido p. | 0 |
| 116 | 16 | 4 x 7 U-configur. | 5 | 211 | 3381 | 450 | 30 | 15 | Análisis d. | 0 |
| 178 | 16 | 3 x 7 open recta. | 5 | 212 | 3387 | 300 | 30 | 10 | Elegido p. | 0 |
| 178 | 16 | 3 x 7 open recta. | 5 | 212 | 3387 | 300 | 30 | 10 | Análisis d. | 0 |
| 330 | 16 | 4 x 4 rectángulo | 6 | 216 | 3453 | 324 | 18 | 18 | Análisis d. | 0 |
| 70 | 16 | 3 x 7 L2-configur. | 5 | 218 | 3490 | 300 | 30 | 10 | Elegido p. | 0 |
| 70 | 16 | 3 x 7 L2-configur. | 5 | 218 | 3490 | 300 | 30 | 10 | Análisis d. | 0 |
| 76 | 16 | 4 x 6 L2-configur. | 5 | 219 | 3512 | 375 | 25 | 15 | 0 | 0 |
| 81 | 16 | 5 x 5 L2-configur. | 5 | 220 | 3520 | 400 | 20 | 20 | 0 | 0 |
| 330 | 16 | 4 x 4 rectángulo | 5 | 227 | 3626 | 225 | 15 | 15 | 0 | 0 |
| 190 | 16 | 4 x 6 open recta. | 6 | 229 | 3672 | 540 | 30 | 18 | 0 | 0 |
| 190 | 16 | 4 x 6 open recta. | 6 | 229 | 3672 | 540 | 30 | 18 | Análisis d. | 0 |
| 69 | 14 | 3 x 6 L2-configur. | 6 | 268 | 3754 | 360 | 30 | 12 | 0 | 0 |

Figura 10.38: Ventana salida de resultados. Configuración elegida. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).

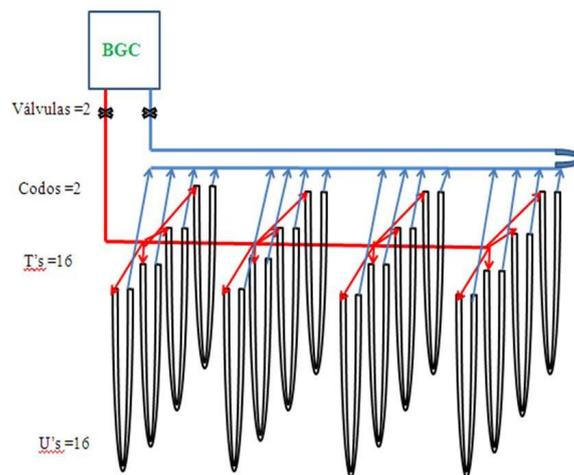


Figura 10.39: Arreglo del intercambiador geotérmico. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008).

Menú configuración: el menú configuración del programa EED permite elegir el sistema de unidades. Para el caso de estudio, se elige el Sistema Internacional de Unidades, SI, como se aprecia en la Fig. 10.40.

Menú Ayuda: el menú ayuda del programa EED permite conocer os autores del *software* y enlaces para mayor información, como se observa en la Fig. 10.41.

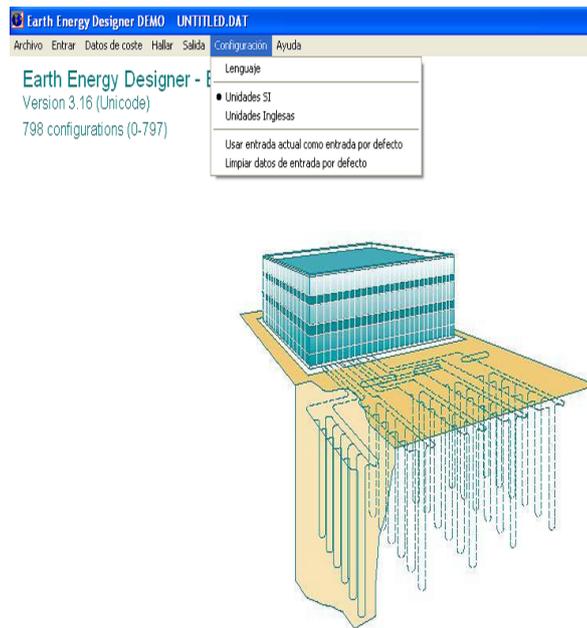


Figura 10.40: Menú configuración. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008)



Figura 10.41: Menú ayuda. Fuente: *software* EED (Blomberg et al., 2008)

Características del intercambiador geotérmico.

Las características del intercambiador geotérmico se obtienen una vez elegida la configuración de las múltiples configuraciones calculadas por el *software* Earth Energy Designer. El peso se calcula en base a la longitud total de tubería requerida, es decir, 3318 m de polietileno de alta densidad y el peso de los accesorios. El peso de la tubería se calcula teniendo en cuenta que el polietileno 100, DN32 PN10, tiene un peso promedio de 0,19 kg/m según la Norma ISO 4427 (ISO4427, 2007), con lo que se obtiene 630 kg de polietileno 100. El peso de los accesorios del intercambiador geotérmico se calcula teniendo en cuenta el número de válvulas, codos, T's y U's necesarios para la configuración que se mostró en la Fig. 10.39 de la sección del presente Capítulo. El peso total de los accesorios es de 12 kg. El peso total del intercambiador geotérmico es de 642 kg. Las características del intercambiador geotérmico se resumen en la Tabla 10.3.

Tabla 10.3: Características del intercambiador geotérmico.

| Dispositivo | Características | |
|----------------------------|-----------------|------------|
| Tubería de polietileno 100 | Longitud (m) | Peso (kg) |
| | 3318 | 630 |
| Accesorios | Unidades | Peso (kg) |
| U's | 16 | 2 |
| T's | 16 | 7 |
| Codos 90° | 2 | 1 |
| Válvulas | 2 | 2 |
| Peso Total | | 642 |

10.4.5. Radiadores. Elementos adicionales

Los radiadores que actualmente se usan en el edificio Aulario operan con temperatura de entrada del agua de 85 °C proveniente de las calderas de gasóleo. En el supuesto de usar el agua procedente del sistema geotérmico, que entraría a los radiadores con una temperatura de 55 °C habría que añadir elementos a los radiadores para compensar esta diferencia de temperatura.

Los elementos adicionales necesarios se calculan realizando una corrección del valor de la potencia obtenida con el salto térmico estándar (Miranda y Jutglar, 2009). En primer lugar, se calcula la temperatura media logarítmica o salto térmico del radiador para ambas situaciones: la situación actual, trabajando en condiciones estándar, y la nueva situación asociada al sistema trabajando con una menor temperatura del agua. Esto se recoge en las ecuaciones 10.18 y 10.19, donde t_e es la temperatura de entrada del agua a los radiadores a 85 °C y 55 °C, respectivamente; t_s es la temperatura de salida del agua de los radiadores a 70 °C y 40 °C, respectivamente; con un salto térmico del agua en el radiador de 15 °C para las dos situaciones. t_a es la temperatura del aire ambiente de 20 °C. Cuando el cociente $(t_e - t_a)/(t_s - t_a)$ es ≤ 1.4 la temperatura media logarítmica se calcula como $((t_e + t_s)/2) - t_a$, con lo que se obtiene 58 °C y 30 °C de temperatura media entre la superficie del radiador y el aire ambiente, respectivamente, como se muestra en las ecuaciones 10.20 y 10.21.

Posteriormente, se calcula la potencia del radiador para la situación del agua proveniente del sistema geotérmico usando la ecuación 10.22. A continuación, se calcula el número de elementos equivalentes sabiendo que los radiadores marca Ferrolli modelo Europa 600c, de 152.30 W de potencia tienen 11 elementos. Se encuentra que la potencia de 64.58 W equivalen a 5 elementos del radiador marca Ferrolli modelo Europa 600c como se muestra en la ecuación 10.23. Finalmente se calculan los elementos requeridos totales por radiador usando la ecuación 10.24, encontrándose que se requieren 26 elementos si la temperatura del agua de entrada es de 55 °C.

Los elementos a añadir se calculan de la diferencia entre los elementos requeridos totales y los elementos usados actualmente, como se muestra en la ecuación 10.25, encontrándose que se requieren 15 elementos adicionales para compensarla diferencia de temperatura del agua proveniente del sistema geotérmico. El peso de los 15 elementos adicionales por radiador es de 2.52 kg, para un peso total de 4.37 kg por radiador. Para los 140 radiadores totales que se encuentran instalados en el edificio Aulario, el peso de los elementos adicionales es de 353.18 kg.

$$\Delta T_m^\circ = \frac{t_e - t_a - (t_s - t_a)}{\ln \frac{t_e - t_a}{t_s - t_a}} \quad (10.18)$$

$$\Delta T_m = \frac{t_e - t_a - (t_s - t_a)}{\ln \frac{t_e - t_a}{t_s - t_a}} \quad (10.19)$$

$$\Delta T_m^\circ = \frac{(t_e - t_s)}{2} - t_a = 58^\circ C \quad (10.20)$$

$$\Delta T_m = \frac{(t_e - t_s)}{2} - t_a = 30^\circ C \quad (10.21)$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}^{\circ} \left(\frac{\Delta T_m}{\Delta T_m^{\circ}} \right)^n = 152.30 \left(\frac{30}{58} \right)^{1.31869} = 64.58 \quad (10.22)$$

$$N_{\text{elementos}} = 11 \frac{64.57}{152.30} = 5 \quad (10.23)$$

$$\text{Elementos}_{\text{requeridos}} = N_{\text{elementos}} \frac{\text{Potencia}_{\text{radiador}}^{\circ}}{\text{Potencia}_{\text{radiador}}} = 5 \frac{1.68}{0.30} = 26 \quad (10.24)$$

$$\text{Elementos}_{\text{adicionales}} = \text{Elementos}_{\text{requeridos}} - \text{Elementos}_{\text{actuales}} = 26 - 11 = 15 \quad (10.25)$$

10.4.6. Elección de la bomba de circulación

La bomba de circulación se encarga de mover el agua desde el intercambiador geotérmico hasta la bomba de calor. En base al caudal de agua que debe circular por la bomba de calor, 7.81 l/s, y las pérdidas de carga de 21.32 m.c.a. ocasionada por los accesorios del intercambiador geotérmico (calculadas usando el *software* GeoCiatesa). Se buscan en el mercado los fabricantes de bombas de circulación de agua que cumplan con estos requerimientos, (la altura de la bomba es equivalente a las pérdidas de carga). Se elige la bomba de circulación marca Saci mostrada en la Fig. 10.42, modelo CP40/2300, con peso de 36 kg fabricada en hierro fundido, con las características descritas en la Fig. 10.43.

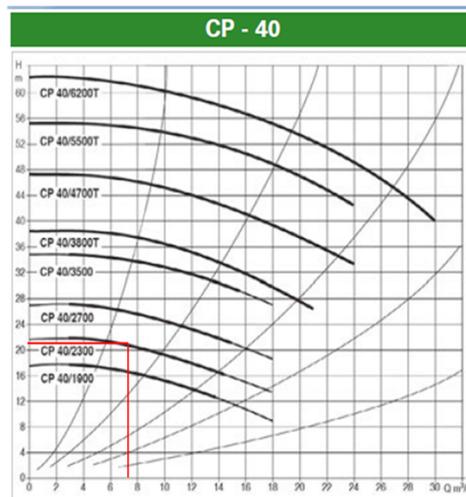


Figura 10.42: Curva característica de la bomba de circulación. Fuente: (Saci, 2013).

Centrifugas Circuladoras In-Line

Serie "CP"

Aplicaciones:
Bomba de circulación para instalaciones de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria de tipo cerrado o a vaso abierto.

Características Constructivas:
Cuerpo bomba, soporte motor, tapa ventilador en fundición, turbina en fundición o trocoplástico según modelos.
Sello mecánico en carbón técnico.
Eje Rotor en acero inoxidable.

Motor de tipo asincrónico, cerrado y refrigerado a ventilación externa a 2 polos. CONSTRUCCIÓN SEGUN NORMATIVAS CEI.
Campo de Prestaciones: 6 a 420 m³/h hasta 102 mts.
Líquido Bombado: Límpido, sin sustancias sólidas, no viscoso, no cristalizables.
Campo de temperatura del líquido de -10° C a + 120° C.
Máxima Temperatura ambiente + 40° C.
Máxima Presión de Trabajo: 16 bar (1.630 Kpa).
Gasto de Protección: IP44 caja bornes IP55. Grado de Aislamiento: F.

| Tipo | Alimentación 50 HZ | BRIDAS | Datos Eléctricos | | | | Entre Ejes | Peso | |
|-------------|--------------------|--------|------------------|--------|------------|-------|------------|------|------|
| Type | | | r.p.m. | P1 máx | P2 NOMINAL | Cons. | Ejes | Kg. | |
| | | | 1/min. | W | HP | A | mm. | | |
| CP 40/1900T | 3 x 220/400V | DN 40 | 2970 | 1,1 | 1 | 0,8 | 4,5-2,6 | 360 | 35,3 |
| CP 40/2300T | 3 x 220/400V | DN 40 | 2970 | 1,5 | 1,5 | 1,1 | 6,2-3,5 | 390 | 38,8 |
| CP 40/2700T | 3 x 220/400V | DN 40 | 2950 | 1,9 | 2 | 1,5 | 8,4-3,7 | 390 | 38,1 |
| CP 40/3500T | 3 x 220/400V | DN 40 | 2880 | 2,6 | 3 | 2,2 | 9-5,2 | 390 | 36,9 |
| CP 40/3800T | 3 x 220/400V | DN 40 | 2900 | 3,6 | 4 | 3 | 11-6,4 | 380 | 30 |
| CP 40/4700T | 3 x 220/400V | DN 40 | 2900 | 4,9 | 5,5 | 4 | 15,2-8,8 | 390 | 30 |
| CP 40/5500T | 3 x 400V | DN 40 | 2900 | 6,6 | 7,5 | 5,5 | 11,3 | 425 | 39 |
| CP 40/6200T | 3 x 400V | DN 40 | 2900 | 9,2 | 10 | 7,5 | 15,8 | 425 | 39 |
| CP 50/2200T | 3 x 220/400V | DN 50 | 2970 | 1,5 | 1,5 | 1,1 | 5-2,9 | 425 | 38,6 |
| CP 50/2900T | 3 x 220/400V | DN 50 | 2950 | 1,9 | 2 | 1,5 | 6,2-3,5 | 425 | 38,5 |
| CP 50/3500T | 3 x 220/400V | DN 50 | 2970 | 2,6 | 3 | 2,2 | 9-5,2 | 400 | 36 |
| CP 50/4700T | 3 x 400V | DN 50 | 2970 | 3,8 | 5,5 | 4 | 14 | 400 | 36 |
| CP 50/4600T | 3 x 400V | DN 50 | 2900 | 6,6 | 7,5 | 5,5 | 11,3 | 390 | 48 |
| CP 50/5300T | 3 x 400V | DN 50 | 2900 | 9,2 | 10 | 7,5 | 15,8 | 390 | 46,1 |
| CP 50/5650T | 3 x 400V | DN 50 | 2900 | 9,2 | 10 | 7,5 | 15,8 | 390 | 519 |
| CP 65/1420T | 3 x 220/400V | TN 65 | 3600 | ? | ? | 1,5 | 6,7-3,6 | 960 | 59,1 |

Figura 10.43: Especificaciones técnicas de la bomba de circulación. Fuente: (Saci, 2013).

10.4.7. Depósito de acumulación

El depósito de acumulación o acumulador de inercia, sirve para almacenar el agua para calefacción/refrigeración. Son llamados también vasos de expansión y permiten absorber los aumentos de volumen producidos por la elevación de la temperatura del fluido del circuito interior de climatización (Benítez, 2011).

El volumen del acumulador se calcula teniendo en cuenta que el volumen de agua que circula por el sistema geotérmico es de 7.81 l/s y suponiendo una presión máxima de arranque de 5 bares (Saci, 2013). Usando la Fig. 10.44, se obtiene el volumen del depósito de acumulación de 2500 litros. Existen en el mercado numerosos proveedores de depósitos de acumulación. Se elige el depósito de la empresa Ibaiondo mostrado en la Fig. 10.45, cuyo peso es de 790 kg de acero.

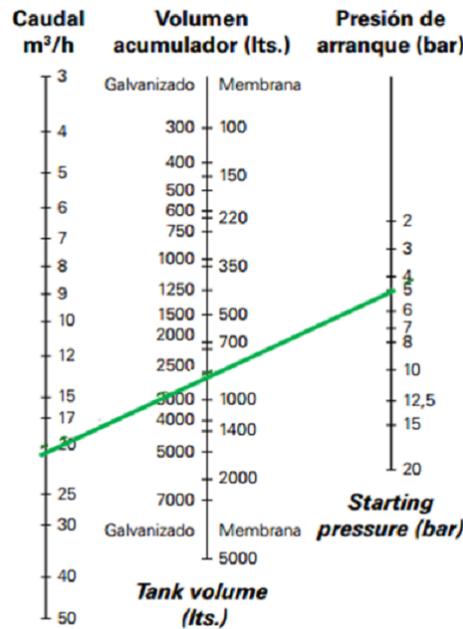


Figura 10.44: Volumen del vaso de expansión. Fuente: (Saci, 2013).

| Peso (Kg.) | Código | Modelo | Capacidad (l.) | Presión Max. Bar | Dimensiones | | Conexión de Agua | Euros (€) |
|---------------|----------|--------------|-------------------|---------------------|-------------|------|---------------------|--------------|
| | | | | | Ø D | H | | |
| 70 | 04022421 | 220 AMR-C-A | 200 | 10 | 485 | 1465 | 1" | |
| 80 | 04035421 | 350 AMR-C-A | 300 | 10 | 485 | 2020 | 1" | |
| 108 | 04050421 | 500 AMR-C-A | 500 | 10 | 600 | 2160 | 1" | |
| 215 | 04075421 | 700 AMR-C-A | 700 | 10 | 700 | 2310 | 1" | |
| 324 | 04100421 | 1000 AMR-C-A | 1000 | 10 | 850 | 2310 | 1" | |
| 417 | 04140421 | 1400 AMR-C-A | 1400 | 10 | 1000 | 2270 | 1" | |
| 593 | 04200421 | 2000 AMR-C-A | 2000 | 10 | 1200 | 2695 | DN65 | |
| 790 | 04300421 | 3000 AMR-C-A | 3000 | 10 | 1200 | 3695 | DN65 | |
| 1.282 | 04500421 | 5000 AMR-C-A | 5000 | 10 | 1500 | 3910 | DN65 | |



Figura 10.45: Características del vaso de expansión. Fuente: (Ibaiondo, 2012).

10.5. Fase de montaje del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica

Para el montaje del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica se tienen en cuenta el tipo y cantidad de materiales usados en la fabricación del sistema. Para el caso de estudio se tienen en cuenta las instalaciones y los equipos definidos en la siguiente sección. No se tienen en cuenta las etapas de fabricación de las partes y ensamblaje de los equipos.

10.5.1. Características del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica

En base al análisis y los cálculos anteriores, se definen las características del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica, teniendo en cuenta las instalaciones mostradas en la Fig. 10.46. Se encuentra que el sistema tiene un peso total de 2207.98 kg. Los detalles de los equipos, materiales y peso se describen en la Tabla 10.4.

La instalación de calefacción está formada por los siguientes equipos: bomba de calor geotérmica, refrigerante R407c, intercambiador geotérmico, bomba de circulación y vaso de expansión. Para la instalación de distribución y consumo se toma la usada actualmente, en la que se modificó la longitud de los radiadores para incluir los elementos adicionales necesarios para suplir el salto térmico del agua que circula por los radiadores de 85 °C a 55 °C, como se describió en la sección 10.4.5.

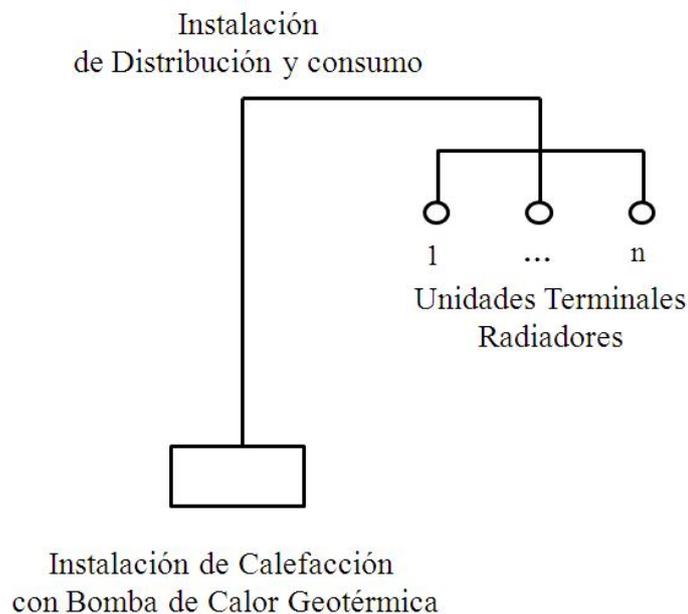


Figura 10.46: Esquema de la instalación de calefacción con bomba de calor geotérmica

Tabla 10.4: Características del sistema de calefacción geotérmico.

| Ubicación | Equipo | No. Unidades | Material | Peso/Unidad | Peso Total |
|--|---------------------------------|--------------|------------------|--------------------|----------------|
| | | | | kg | kg |
| Instalación de calefacción con bomba de calor geotérmica | Bomba de calor geotérmica | 1 | Hierro | 380 | 380 |
| | Refrigerante R407c | 1 | R-407c | 7 | 7 |
| | Intercambiador geotérmico | 1 | Polietileno | 642 | 642 |
| | Bomba de circulación | 1 | Hierro | 36 | 36 |
| | Acumulador | 1 | Acero | 790 | 790 |
| Instalación de distribución y consumo | Radiadores alargados | 140 | Aluminio | 2.52 | 353.18 |
| | Bomba de circulación UPS-40-120 | 2 | Acero inoxidable | Instalación actual | |
| | Bomba de circulación UPS-32-120 | 2 | Acero inoxidable | Instalación actual | |
| | Válvula de tres vías | 6 | Latón | Instalación actual | |
| | Servomotor | 1 | Aleación ligera | Instalación actual | |
| | Centralita de regulación | 2 | Plástico | Instalación actual | |
| | Tubería | 871.4 | Hierro soldado | Instalación actual | |
| | Cuadro eléctrico | 1 | Plástico y cobre | Instalación actual | |
| | Llaves de corte | 2 | Latón (hierro) | Instalación actual | |
| Total | | | | | 2654.33 |

10.6. Fase de uso del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica

En la fase de uso del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica se considera el consumo de energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del sistema, es decir, la bomba de calor geotérmica y la bomba de circulación, como se describe en las secciones siguientes. Se desprecian otros aspectos o elementos de la fase de uso como, por ejemplo, el mantenimiento, limpieza, lubricación, entre otros.

10.6.1. Bomba de calor geotérmica. Energía consumida.

La energía eléctrica consumida por la bomba de calor se calcula conociendo la potencia eléctrica y el tiempo de funcionamiento, como se muestra en la ecuación 10.26. Considerando 30 años de vida útil del sistema, se encuentra un consumo de energía final de 807528 kWh, equivalentes a 1987326 kWh de energía primaria (IDAE, 2014).

$$Consumo = \frac{Demanda_{edificio}}{SPF} \quad (10.26)$$

10.6.2. Bomba de circulación. Energía consumida.

La energía eléctrica consumida por la bomba de circulación se calcula multiplicando la potencia eléctrica por el número de horas anuales de funcionamiento del equipo. Para 2070 h/año de funcionamiento del sistema, se obtiene un consumo de 2277 kWh/año. Considerando 30 años de vida útil del equipo, se encuentra un consumo de energía final de 68310 kWh, equivalentes a 168111 kWh de energía primaria (IDAE, 2014).

10.6.3. Sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica. Energía consumida durante la fase de uso

El sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica consume 29195 kWh/año de energía final para el funcionamiento de sus equipos. En 30 años de vida útil consume un total de 875838 kWh de energía final, equivalentes a 2155437 kWh de energía primaria (IDAE, 2014) (ver Tabla 10.5).

Tabla 10.5: Energía final consumida por el sistema geotérmico. Vida útil 30 años.

| Equipo | Energía final consumida | Energía final consumida | Energía primaria consumida |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| | (kWh/año) | (kWh) | (kWh) |
| Bomba de calor geotérmica | 36266 | 1087992 | 2677548 |
| Bomba de circulación | 2277 | 68310 | 168111 |
| Consumo Total | 38543 | 1156302 | 2845659 |

10.6.4. Sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica. Energía generada

El sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica se ha diseñado para calentar el edificio Aulario con un consumo energético de 323446.01 kWh/año (Blázquez, 2011). Considerando que el sistema geotérmico genera la energía requerida para calentar el edificio, se encuentra que el sistema produce en 30 años de vida útil 9703380.30 kWh de energía final, equivalentes a 3163301.98 kWh de energía primaria (IDAE, 2014).

10.7. Fase de disposición final del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica

Una vez finalizada la vida útil, el sistema se retira del lugar donde ha operado y se traslada a la planta de reciclaje BIOTRAN, ubicada en Tudela de Duero. Se elige esta planta recuperadora por encontrarse dentro de la provincia de Valladolid y por ser una de las compañías líderes a nivel regional en gestión integral de residuos peligrosos y no peligrosos, especializada en la gestión de residuos industriales, capacitada para la realización de los procesos de recogida, transporte, almacenamiento y tratamiento de residuos (Biotran, 1998).

La relación toneladas kilómetro (tkm) se calcula considerando el peso total del sistema geotérmico, aproximadamente 2.48 toneladas y la distancia entre el Paseo del Cauce s/n, Valladolid (lugar donde se encuentra el sistema geotérmico) y la planta de reciclaje (22.3 km de distancia aproximada), lo que resulta en un total de 55.28 tkm.

Para analizar el escenario de fin de vida en España del sistema geotérmico se crea el escenario de disposición final en España de los materiales que conforman el sistema, como se describe en las secciones siguientes.

10.7.1. Disposición final de los materiales

Según la Unión de Industrias Siderúrgicas española, en 2011 las acerías españolas reciclaron un total de 12.5 millones de toneladas de acero (chatarra férrea), de las cuales 7.7 millones de toneladas eran de procedencia nacional y los restantes 4.8 millones de toneladas procedían de la importación (Unesid, 2013).

Se asume que el acero, el hierro y el polietileno pertenecen a la familia LER 12: moldeado y tratamiento físico mecánico de superficies metálicas y plásticos. Se concluye que en Castilla y León en 2010, se procesó el 75 % de los productos LER 12 y el resto salió de la Comunidad (CYL, 2010). No se especifica qué tratamiento tienen estos productos catalogados como salida.

Sobre el escenario de reciclaje en España del polietileno, según la Asociación Nacional de Reciclaje de Plástico ANARPLA, en 2011 los residuos plásticos generados en España alcanzaron la cifra de 2.1 millones de toneladas. Se considera que se recicló aproximadamente el 24 % del polietileno de alta densidad generado (Anarpla, 2011).

Los refrigerantes pertenecen a la familia LER 14: disolventes, refrigerantes y propelentes orgánicos (CYL, 2010). La bomba de calor geotérmica elegida usa como refrigerante el

R407c. El refrigerante R407c es una mezcla terciaria no azeotrópica compuesta de R-32, R-125 y R-134a. Químicamente es estable, tiene buenas propiedades termodinámicas, un bajo impacto ambiental y baja toxicidad. A pesar de que uno de sus componentes, el R-32, es inflamable, la composición global de la mezcla no es inflamable, por tanto el R407c está clasificado como un refrigerante de alta seguridad (Gas-Servei, 2011). Respecto del impacto ambiental del R407c, este posee un índice ODP (potencial de destrucción de la capa de ozono) de cero y un índice QWP (potencial de calentamiento global) de 20 años, que está relacionado con el tiempo de vida en la atmósfera, como se aprecia en la Fig. 10.47 (Contreras, 2013).

Respecto de la normativa sobre refrigerantes, el 30 de octubre de 2013 se publicó en el BOE la Ley 16/13 que establece un impuesto sobre los gases fluorados de efecto invernadero (refrigerantes HFCs entre ellos), que empezó a regir a partir del 1 de enero de 2014 (BOE, 2013). Este impuesto grava, en fase única, el consumo de gases fluorados de efecto invernadero atendiendo a su potencial de calentamiento atmosférico. Los gases con un PCA inferior a 150 no están sujetos a este impuesto. Por tanto, el R407c no está sujeto a este impuesto por tener un PCA de 20 años (Iparfrio, 2014).

En cuanto a la recuperación y reciclaje de refrigerantes, “la recuperación consiste en el proceso de retirar la carga de refrigerante de un sistema de refrigeración y depositarlo en un contenedor con el fin de almacenarlo, regenerarlo o transportarlo, mientras que el reciclaje consiste en reducir los contaminantes que se encuentran en el refrigerante usado, mediante el proceso de separación de aceite, eliminación de no condensables, remoción de partículas contaminantes sólidas y volverlo a utilizar en el mismo sistema refrigerante” (González, 2012).

En España, la compañía E-Waste Canarias, constituida por empresas del reciclaje, inauguró en abril de 2014 en Tenerife, España, la primera planta del mundo de tratamiento y descontaminación de gases y refrigerantes (Ewaste, 2014).

A nivel regional, en Castilla y León en 2010 se procesó el 68.6 % de los productos LER 14 y el resto salió de la Comunidad (CYL, 2010). No se especifica que tratamiento tienen estos productos catalogados como salida. Los valores detallados se especifican en las Tablas 10.6 y 10.7

En base a la cantidad de materiales usados para el montaje del sistema de climatización geotérmica y a los porcentajes de materiales reciclados en España, se obtiene el escenario de disposición final del sistema geotérmico en España. Se obtiene que en España se recicla 54.03 % del sistema geotérmico y el resto del material, 45.97 %, se incinera y va a vertedero.

Tabla 10.6: Entrada total de residuos LER 14 en Castilla y León. Modificado de (CYL, 2010).

| Producción regional | Importados | Entrada Total |
|----------------------------|-------------------|----------------------|
| (t) | (t) | (t) |
| 707.55 | 978.58 | 1686.13 |

| Name | Formula and proportion of every constituent for mixtures | GWP (100 years) | ODP |
|---------------------|--|-----------------|-------|
| CFC | | | |
| R11 | CFCl ₃ | 4000 | 1 |
| R12 | CF ₂ Cl ₂ | 8500 | 1 |
| HCFC | | | |
| R22 | CF ₂ HCl | 1700 | 0,055 |
| R408A | R125/143a/22 (7/46/47) | (2650) | |
| R401A | R22/152a/124 (53/13/34) | (970) | |
| HFC | | | |
| R32 | CH ₂ F ₂ | 580 | 0 |
| R125 | CF ₃ CHF ₂ | 3200 | 0 |
| R134a | CF ₃ CH ₂ F | 1300 | 0 |
| R143a | CF ₃ CH ₃ | 4400 | 0 |
| Mixtures HFC | | | |
| R404A | R125/143a/134a (44/52/4) | 3260 | 0 |
| R407C | R32/125/134a (23/25/52) | 1525 | - |
| R410A | R32/125 (50/50) | 1730 | - |
| R422A | R125/134a/600a (85,1/11,5/3,4) | 2535 | - |
| R422D | R125/134a/600a (65,1/31,5/3,4) | 2235 | - |
| R427A | R32/125/143a/134a (15/25/10/50) | 1830 | - |
| R507A | R125/143a (50/50) | 3300 | - |

Figura 10.47: Duración en vida de algunos refrigerantes. Fuente: (Contreras, 2013).

Tabla 10.7: Disposición final de residuos LER 14 en Castilla y León. Modificado de (CYL, 2010).

| Entrada total | | Exportados | | Procesados | |
|---------------|-------|------------|--------|------------|--------|
| (t) | (%) | (t) | (%) | (t) | (%) |
| 1686.13 | 100 % | 530.02 | 31.4 % | 1156.11 | 68.6 % |

10.8. Análisis de ciclo de vida del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica

La evaluación del ciclo de vida del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica encuentra los mayores impactos ambientales en la fase de uso y en la debida a los materiales usados por los equipos que forman del sistema, como se muestra en Fig. 10.48.

Se encuentra que el acero usado causa los mayores daños principalmente sobre las reservas de recursos abióticos y sobre la salud humana, como se aprecia en la Fig. 10.49.

El uso del sistema consume energía para el funcionamiento de los equipos eléctricos, que ocasiona impactos ambientales. Los mayores daños son sobre los recursos abióticos y la salud humana (ver Fig. 10.50).

La disposición final del sistema ocasiona impactos ambientales principalmente debido al proceso de reciclaje de los materiales y al transporte del sistema hasta la planta de tratamiento, una vez finalizado su ciclo de vida, como se aprecia en la Fig. 10.51. Los principales daños se producen sobre la salud humana.

La evaluación de los impactos ambientales durante el ciclo de vida del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica encuentra los mayores daños sobre el agotamiento de reservas, la esperanza de vida y la morbilidad severa, debiendo pagar para restaurar los daños causados, 144616.96 ELUs, 92080.61 ELUs y 36656.46 ELUs, respectivamente. El consumo de energía para el funcionamiento de la bomba de calor causa los mayores impactos (ver Tabla 10.8).

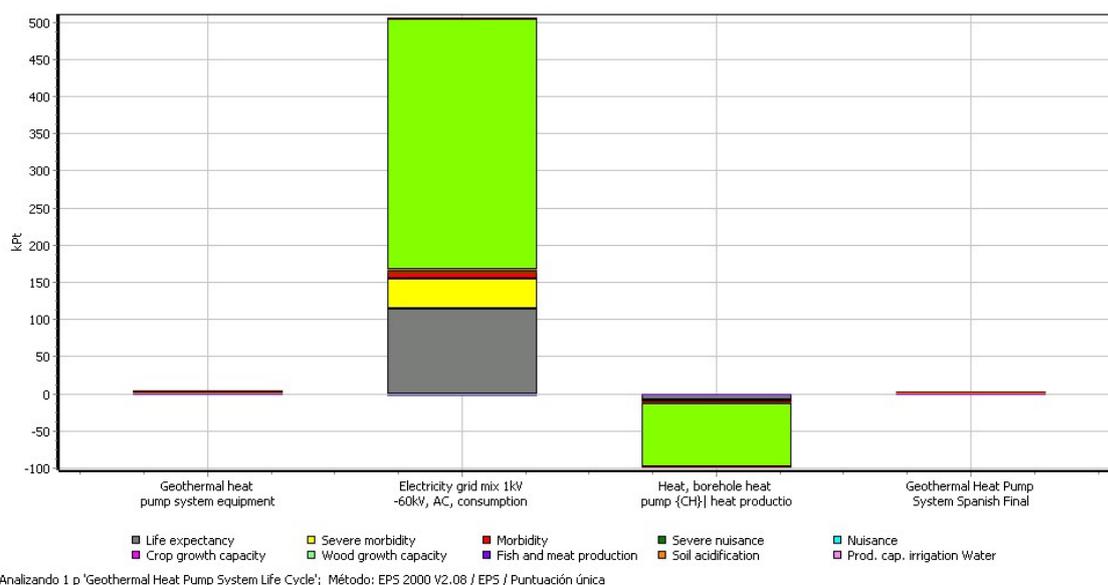


Figura 10.48: Impactos ambientales del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica. Ciclo de vida. Puntuación única. Diagrama usando el *software* SimaPro8.

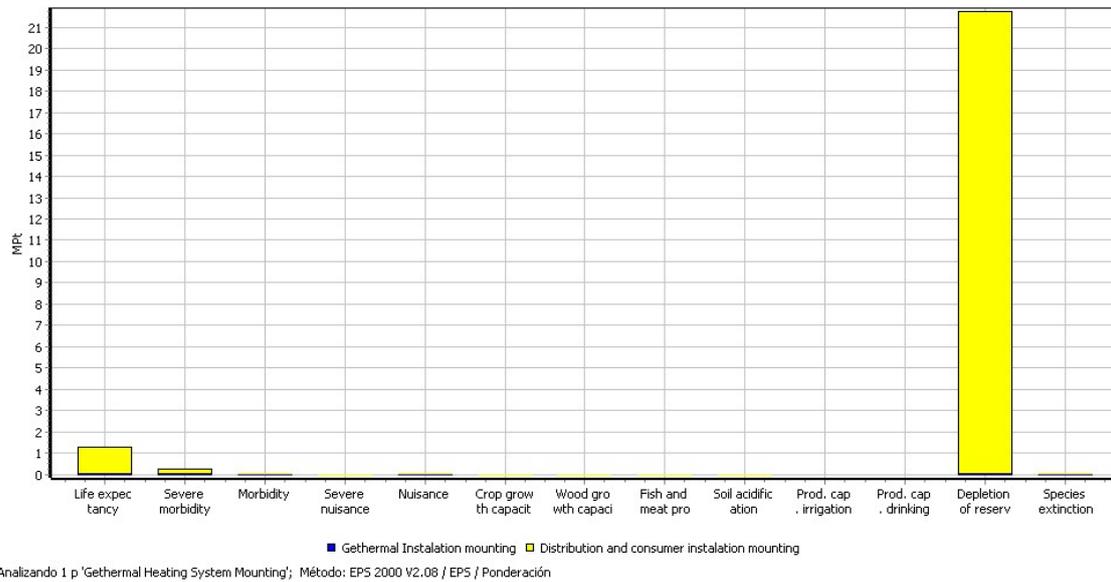


Figura 10.49: Impactos ambientales debido a los materiales usados por los equipos del sistema de calefacción geotérmico. Ponderación. Diagrama usando el *software* SimaPro8.

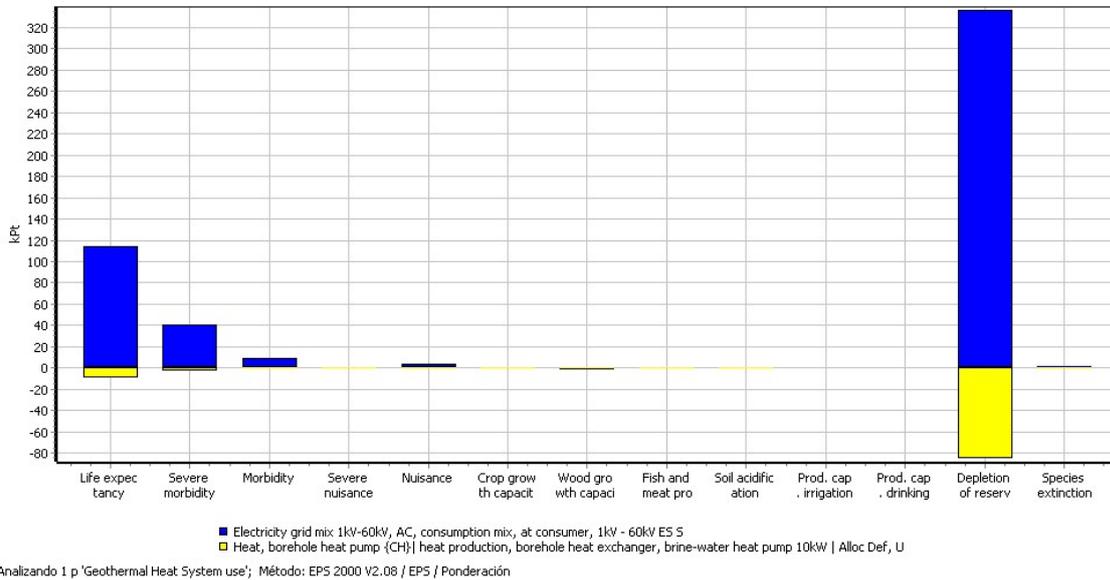


Figura 10.50: Impactos ambientales del sistema de calefacción geotérmico. Fase de uso. Ponderación. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

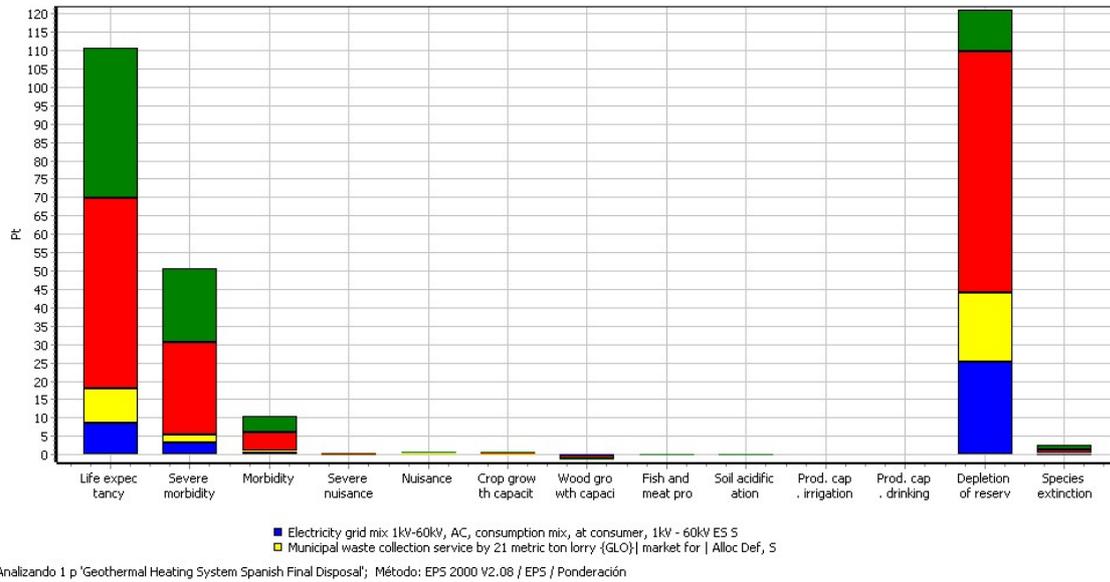


Figura 10.51: Impactos ambientales del sistema de calefacción geotérmico. Fase de disposición final. Ponderación. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

Tabla 10.8: Impactos ambientales del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica. Ciclo de vida. Evaluación del daño. Datos calculados usando el *software* SimaPro8.

| Categoría de daño | Unidad | Total | Materiales | Uso | | Disposición final |
|---|--------|-----------|------------|-----------------|--------------------|-------------------|
| | | | | Consumo energía | Producción energía | |
| Esperanza de vida | ELU | 106580.54 | 385.00 | 114493.15 | -8889.10 | 591.49 |
| Morbilidad severa | ELU | 37981.33 | 121.04 | 40550.33 | -2829.18 | 139.14 |
| Morbilidad | ELU | 8092.76 | 23.53 | 8571.20 | -539.98 | 38.01 |
| Molestia severa | ELU | -198.56 | 9.74 | 382.17 | -588.21 | -2.26 |
| Molestia | ELU | 3182.59 | 7.42 | 3302.39 | -149.09 | 21.86 |
| Capacidad de crecimiento de maíz | ELU | 492.09 | 1.14 | 505.26 | -23.87 | 9.56 |
| Capacidad de crecimiento de madera | ELU | -2049.31 | -5.62 | -2125.45 | 98.57 | -1.81 |
| Producción de pescado y carne | ELU | -75.52 | -0.21 | -77.19 | 4.53 | -2.64 |
| Acidificación del suelo | ELU | 87.41 | 0.20 | 90.22 | -3.91 | 0.90 |
| Capacidad de producción de agua para irrigación | ELU | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Capacidad de producción de agua potable | ELU | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Agotamiento de reservas | ELU | 256090.44 | 3346.78 | 336265.32 | -85274.25 | 1752.59 |
| Extinción de especies | ELU | 1481.24 | 4.84 | 1597.27 | -128.68 | 7.80 |
| Total | ELU | 411665.01 | 3893.87 | 503554.66 | -98323.16 | 2539.64 |

10.9. Nomenclatura y abreviaturas

| | |
|------------------------|---|
| ktep | kilo toneladas equivalentes de petróleo |
| $T(z,t)$ | es la temperatura del suelo, en °C |
| z | profundidad |
| T_m | temperatura media anual del suelo, en °C |
| A_s | oscilación de la temperatura superficial, en °C |
| t | tiempo en días |
| t_0 | desfase en días |
| α | difusividad térmica del suelo, en $m^2/\text{día}$. |
| COP | coeficiente de rendimiento |
| Q | capacidad térmica |
| W | potencia eléctrica consumida |
| $\frac{\Delta P_f}{L}$ | caída de presión, en Pa/m |
| v_i | velocidad del fluido, en m/s |
| D_i | diámetro del conducto, en m |
| C | coeficiente adimensional que depende de la rugosidad del tubo |
| ρ | densidad del fluido, en kg/m^3 |
| P_{ri} | pérdidas de presión en tramos rectos, en Pa |
| P_{si} | pérdidas de presión en las singularidades, en Pa |
| P_{Ti} | pérdidas de presión totales, en Pa |
| D | distancia entre dos secciones de tubo adyacentes, en m |
| P | profundidad de los tubos, en m |
| M | número de pozos en dirección y |
| N | número de pozos en dirección x |
| SPF | prestación media estacional de un equipo o sistema |
| FP | factor de ponderación representativo |
| FC | factor de corrección para las distintas tecnologías |
| Q_{sondeo} | potencia de sondeo |
| Q_{disipada} | potencia disipada |
| L_u | longitud total de las sondas, en m |
| t_e | temperatura de entrada del agua a los radiadores, en °C |
| t_s | temperatura de salida del agua de los radiadores |
| t_a | temperatura del aire ambiente, en °C |
| R407c | refrigerante 407c |
| ODP | potencial de destrucción de la capa de ozono |
| QWP | potencial de calentamiento global |
| EED | Earth Energy Designer |

Parte III

IMPACTOS AMBIENTALES COMPARATIVOS DEL EDIFICIO BASE Y EL EDIFICIO MEJORADO CON APORTE DE ENERGÍAS RENOVABLES

En la tercera parte del manual se comparan los impactos ambientales del edificio base y del edificio mejorado. Para ello, en el Capítulo 11 se realiza un recapitulatorio de la Tesis y se analizan los impactos ambientales del edificio con los sistemas usados actualmente y del edificio mejorado con aporte de energías renovables en los sistemas de iluminación, ventilación y calefacción.

Posteriormente para cada caso, se realiza el análisis de sensibilidad de la metodología usada comparando los resultados de la metodología EPS2000 y Ecoindicador99. Finalmente se exponen las contribuciones científicas, las perspectivas de estudios futuros y nuevas líneas de investigación que han surgido a partir de esta Tesis.

CAPÍTULO 11

Consideraciones finales. Impactos Ambientales Comparativos: Edificios Base y Mejorados

RESUMEN: En el presente Capítulo se realiza un recapitulatorio de la Tesis: se describen los objetivos generales y específicos alcanzados y se analizan los impactos ambientales comparativos en la fase de uso del edificio base y del edificio mejorado en los tres escenarios analizados: iluminación, ventilación y calefacción. Adicionalmente se exponen las contribuciones científicas, las perspectivas de estudios futuros y nuevas líneas de investigación que han surgido a partir de esta Tesis.

11.1. Resumen de la Tesis

El documento está estructurado de la siguiente manera: en el Capítulo 1 se ha presentado la Introducción donde se ha establecido el objetivo del estudio, los alcances y la metodología a seguir.

El Análisis de Ciclo de Vida se ha desarrollado en el Capítulo 2. Se presentan los conceptos sobre Análisis de Ciclo de Vida, ACV.

En el Capítulo 3 se desarrollan los conceptos sobre edificios de energía próxima a cero, NZEB.

El objetivo del estudio se ha abordado desde tres escenarios:

El primer escenario es el sistema de iluminación. Se estudia el suministro de electricidad usando la red eléctrica, desarrollado en el Capítulo 4, y las mejoras ambientales asociadas al uso de energía solar fotovoltaica para iluminación expuestas en el Capítulo 5.

El segundo escenario, de ventilación, se estudia en los Capítulos 6, 7 y 8.

En el Capítulo 6 se describe la situación actual relacionada con la ventilación del edificio y se exponen los conceptos sobre calidad de aire en los edificios. Seguidamente se diseña el sistema de ventilación con ventilador mecánico convencional y se obtienen los impactos ambientales de dicho sistema. En el Apéndice 6.4 de este Capítulo se presenta el diseño de los conductos de aire del edificio Aulario y en el Apéndice 7.1 se dimensiona la unidad de tratamiento de aire y se han elegido los difusores y compuertas requeridas.

Posteriormente, se estudian mejoras al sistema de ventilación. En el Capítulo 7 se han abordado las mejoras usando energía solar: ventiladores solares fotovoltaicos y colectores solares de aire. En el Capítulo 8 se estudia la mejora con sistema bio-climático para ventilación usando muro Trombe.

El tercer escenario estudiado ha sido el de calefacción. En el Capítulo 9 se presenta el sistema de calefacción con caldera de gasóleo y en el Capítulo 10 se estudia la mejora con bomba de calor geotérmica.

Para los sistemas de ventilación y calefacción, se han obtenido los impactos ambientales comparativos en la fase de uso.

Adicionalmente, para todos los sistemas analizados se ha creado el escenario de reciclaje de los materiales en España y se han evaluado los impactos ambientales en la fase de disposición final.

Las conclusiones parciales de cada sistema analizado se han presentado al final de cada Capítulo.

En el presente Capítulo 11 se presenta la estructura de la Tesis y un resumen de la misma; las contribuciones científicas y las perspectivas para futuros estudios.

Finalmente, en el presente Capítulo 12 se presentan las conclusiones de la Tesis.

11.2. Objetivos generales alcanzados

El presente trabajo se ha centrado en estudiar, por medio del análisis de ciclo de vida, los impactos ambientales debidos al uso de los sistemas de iluminación, ventilación y calefacción del edificio Aulario y compararlos con sistemas de energías renovables. Para el estudio del sistema de iluminación se ha establecido una potencia eléctrica. El estudio de los sistemas ventilación y calefacción ha requerido diseñar y dimensionar los equipos y subsistemas. Posteriormente, se ha calculado la energía requerida para la producción de los materiales usados en la fabricación de los componentes de los sistemas. Esta etapa constituye un aporte a la fase de montaje de los sistemas.

El ciclo de vida de los sistemas se ha abordado en las fases de uso y disposición final de los materiales que forman los sistemas, como se ilustra en la Fig. 11.1. El recuadro rojo muestra las fases estudiadas. Los diagramas de bloques de color verde representan las etapas analizadas y los bloques de color gris representan las etapas no analizadas. Se han incorporado todas las etapas de la fase de montaje, uso y disposición final como aporte para dar a conocer hasta donde se ha llegado en el presente estudio.

En la fase de uso de los sistemas de ventilación y calefacción analizados, se ha calculado la energía consumida y la energía producida por los sistemas durante su vida útil.

En el escenario de disposición final, se ha creado el escenario de reciclaje de los materiales en España y se han evaluado los impactos ambientales. Para ello se ha asumido que la cantidad reciclada tiene igual tratamiento que los residuos en Francia. Esta suposición se debe al parecido del tratamiento de residuos de España y Francia y a que el *software* SimaPro no tiene en su base de datos el escenario de residuos español.

Se ha calculado la energía requerida para el reciclaje de los materiales y el transporte hasta la planta de tratamiento de los residuos. Se considera que la cantidad no reciclada va a vertedero sin ningún tratamiento previo. Para futuras investigaciones se sugiere calcular y analizar los materiales que requieren tratamiento previo antes de ser depositados en vertedero.

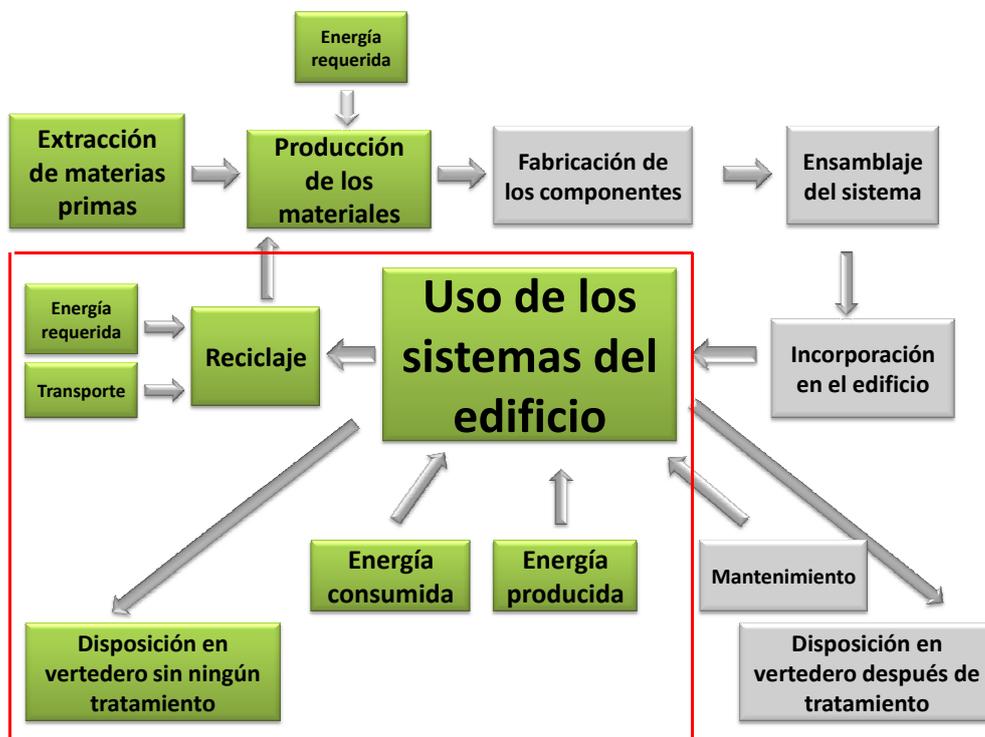


Figura 11.1: Alcance del estudio del análisis de ciclo de vida de edificios de consumo de energía casi cero, NZEB. Diagrama.

11.3. Objetivos específicos alcanzados

Se obtiene el ciclo de vida del uso de los sistemas donde se evalúan los impactos ambientales comparativos de los sistemas analizados en los escenarios de iluminación, ventilación y calefacción. Para ello se evalúa el desempeño energético de los sistemas para, posteriormente, evaluar el desempeño ambiental como se describe en las secciones siguientes.

En el sistema de iluminación se compara la electricidad proporcionada por la red eléctrica y la electricidad suministrada con paneles fotovoltaicos.

En el sistema de ventilación, se compara el suministro de ventilación con ventiladores mecánicos convencionales, ventiladores solares, colectores solares y muro Trombe.

En el sistema de calefacción, se compara el suministro de calor proveniente de calderas de gasóleo y el proporcionado con bomba de calor geotérmica.

El estudio de los sistemas de ventilación requirió diseñar los conductos del edificio y dimensionar los siguientes equipos: unidad de tratamiento de aire (UTA), difusores y compuertas. Dependiendo del sistema analizado, estos equipos serán o no necesarios.

El sistema con ventilador mecánico convencional analizado consta de: ventilador mecánico, unidad de tratamiento de aire (UTA), conductos de aire, difusores y compuertas. La UTA representa el 74.68 % del peso total del sistema como se muestra en el diagrama de bloques de la Fig. 11.2.

El sistema de ventilación con ventilador solar está formado por: ventiladores solares, unidad de tratamiento de aire, conductos de aire, difusores y compuertas. La UTA representa el 74.92 % del peso total del sistema (ver diagrama de bloques de la Fig. 11.3).

El sistema de ventilación con colector solar de aire, que no requiere unidad de tratamiento de aire, está formado por: colectores solares de aire, conductos, difusores y compuertas. Los colectores solares de aire requeridos representan el 71.60 % del peso total del sistema (ver diagrama de bloques de la Fig. 11.4).

El sistema de ventilación con muro Trombe está formado solamente por el muro Trombe y no requiere ningún equipo adicional, como se ilustra en el diagrama de bloques de la Fig. 11.5.

El estudio del ciclo de vida del uso del sistema de calefacción con caldera de gasóleo ha requerido buscar los datos de estudios previos que describieran las características de la instalación térmica y la instalación de distribución y consumo. Se encuentra que los equipos con más peso en el sistema de distribución y consumo son: la tubería, que representa el 49.10 % y el depósito de gasóleo, que representa el 29.47 % del peso total del sistema, como se muestra en el diagrama de bloques de la Fig. 11.6.

El estudio del ciclo de vida del uso del sistema de calefacción geotérmica ha requerido diseñar la instalación formada por: bomba de calor geotérmica, intercambiador geotérmico,

bomba de circulación y acumulador. Se ha usado la misma instalación de distribución y consumo para lo cual ha sido necesario calcular los elementos adicionales de los radiadores. La Fig. 11.7 muestra el sistema geotérmico en forma de diagrama de bloques con los equipos que forman el sistema. Se ha encontrado que el acumulador, el intercambiador geotérmico y la bomba de calor geotérmica representan el 29.76 %, 24.19 % y 20.34 % del peso total del sistema.

Para evaluar los impactos ambientales ocasionados por los materiales usados por los equipos de los sistemas y su reciclaje, se ha calculado la energía consumida en el proceso de reciclaje de estos materiales, en base a los datos reportados en la Tabla 11.1. Para futuras investigaciones se recomienda incluir en el análisis: la energía requerida para la producción y ensamblaje de los equipos, su integración en el edificio y el mantenimiento de los sistemas, a fin de completar el análisis de ciclo de vida como se muestra en la Fig. 11.1.

Se ha aportado la información sobre el escenario de reciclaje en España de los materiales usados, como se resume en la Tabla 11.2, donde se aprecia que España alcanza alrededor del 75 % de reciclaje de materiales. Esta información es útil para, en futuras investigaciones, crear el escenario de reciclaje en España. Se sugiere, en futuros trabajos, actualizar las referencias de esta Tabla, con la finalidad de ir reflejando la evolución del escenario español de reciclaje de materiales.

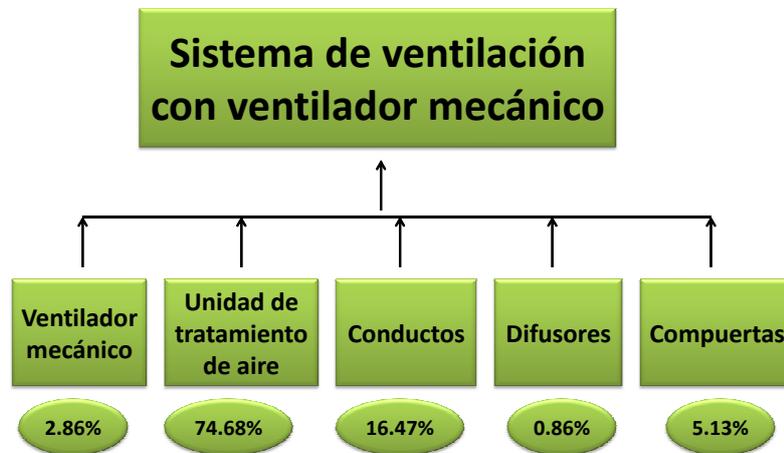


Figura 11.2: Diagrama de bloques del sistema de ventilación con ventilador mecánico convencional.

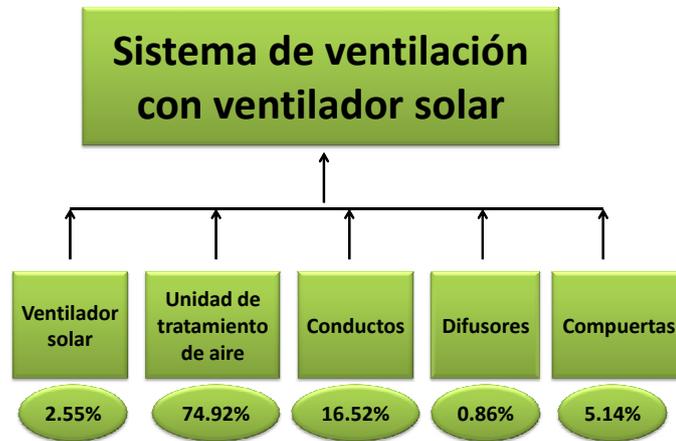


Figura 11.3: Diagrama de bloques del sistema de ventilación con ventilador solar.

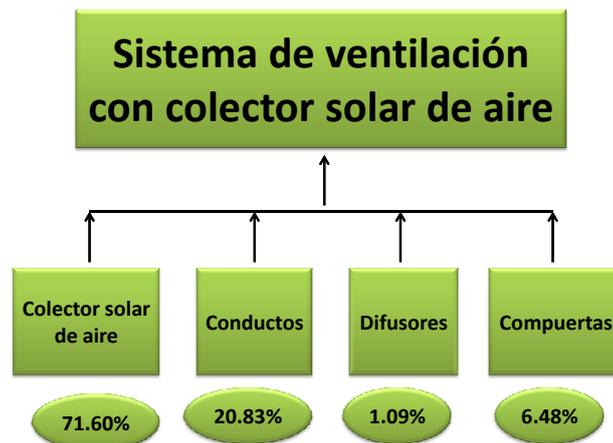


Figura 11.4: Diagrama de bloques del sistema de ventilación con colector solar de aire.



Figura 11.5: Diagrama de bloques del sistema de ventilación con muro Trombe.



Figura 11.6: Diagrama de bloques del sistema de calefacción con caldera de gasóleo.

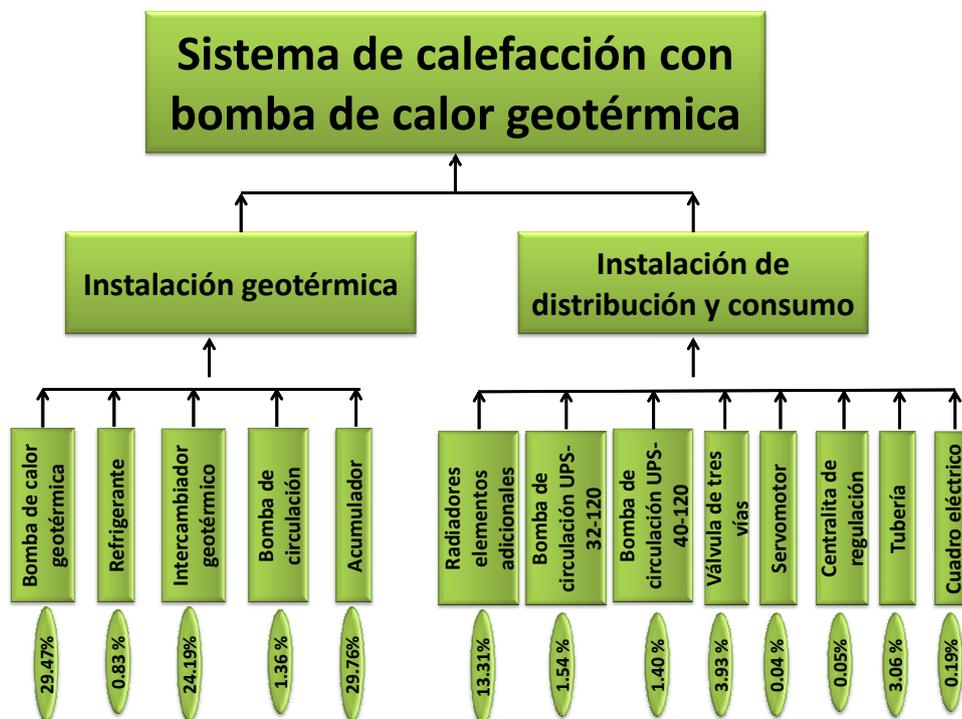


Figura 11.7: Diagrama de bloques del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica.

Tabla 11.1: Requerimiento energético para el reciclaje de los materiales que requieren los equipos de los sistemas analizados.

| Material | Energía requerida en el reciclaje | Referencia |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| | (MJ/kg) | |
| Acero, chapa | 4.30 | (Yellishetty M., 2011) |
| Alu-zinc | 0.44 | (Rabah y El-Sayed, 1995) |
| Aluminio | 0.075 | (Quinkertz et al., 2001) |
| Lana mineral | 15.3 | (López et al., 2012) |
| Hierro | 4.30 | (Yellishetty M., 2011) |
| Silicio policristalino | 46.08 | (N.C. y J.M., 2010) |
| Vidrio | 3.30 | (Vossberg et al., 2014) |
| Poliéster | 1.73 | (Wordpress, 2014) |
| Cobre | 10.6 | (BIR, 2016) |
| Hormigón | 1.73 | (Serres et al., 2016) |

Tabla 11.2: Escenario de reciclaje en España de los materiales que requieren los equipos de los sistemas analizados.

| Material | Reciclaje | Referencia |
|------------------------|-----------|--------------------|
| | (%) | |
| Acero, hierro y chapa | 75.0 | (Unesid, 2013) |
| Alu-zinc | 40.5 | (Arpal, 2012) |
| Aluminio | 40.5 | (Arpal, 2012) |
| Lana mineral | 67.0 | (MinFomento, 2009) |
| Silicio policristalino | 77.0 | (VSOrg, 2010) |
| Vidrio | 67.0 | (MinFomento, 2009) |
| Poliéster | 25.0 | (MinFomento, 2010) |
| Cobre | 39.0 | (ECI, 2012) |
| Hormigón | 40.5 | (Arpal, 2012) |

11.4. Desempeño energético y ambiental de los sistemas de ventilación

11.4.1. Desempeño energético de los sistemas de ventilación. Fase de uso

El desempeño energético de los sistemas de ventilación ha sido estudiado considerando que todos los equipos tienen el mismo tiempo de operación: 1392 h/año. A efectos de comparar el desempeño energético y ambiental de los sistemas se ha establecido un periodo de servicio de 25 años de vida útil para todos los sistemas de ventilación: con ventilador mecánico, con ventilador solar, con colector solar y con muro Trombe. Es preciso hacer constar que el sistema con muro Trombe tiene una vida útil de 50 años, por lo que este sistema puede usarse 25 años más.

El sistema con ventilador mecánico requiere 325853.28 kWh/año y en su vida útil tiene un consumo de 8146332 kWh de energía final, equivalentes a 20048123.05 kWh de energía primaria. Para el reciclaje, el sistema requiere 1753.21 kWh de energía final, equivalentes a 4314.66 kWh de energía primaria (ver detalles en el Capítulo 6).

El sistema de ventilación con ventilador solar requiere 320454.98 kWh/año, es decir, 8011374.48 kWh en su vida útil. El sistema produce, para la operación de los ventiladores, 4242.48 kWh de energía final equivalentes a 1383.05 kWh de energía primaria y consume 8007132 kWh de energía final para el tratamiento del aire (calentamiento y deshumidificación), equivalentes a 2610325.03 kWh de energía primaria. El reciclaje del sistema consume 2328.57 kWh de energía final, equivalentes a 5730.60 kWh de energía primaria (ver detalles en el Capítulo 7).

El sistema de ventilación con colector solar de aire requiere 214028.35 kWh/año, es decir, 5350708.8 kWh en su vida útil. El sistema no consume energía externa para su funcionamiento, por tanto, produce toda la energía que requiere, esto es, 5350708.8 kWh de energía final, de los cuales, 41968.80 kWh usa para la operación de los ventiladores 5308740 kWh usa para el calentamiento del aire. Las cantidades equivalentes en energía primaria producida son de 1744331.07 kWh totales, de las cuales 13681.83 kWh usa para el funcionamiento de los ventiladores y 1730649.24 kWh usa para el calentamiento del aire. El reciclaje consume 4177.78 kWh de energía final equivalentes a 10281.52 kWh de energía primaria. (Los detalles del cálculo se encuentran en el Capítulo 7).

El sistema de ventilación con muro Trombe requiere 212349.60 kWh/año para el calentamiento del aire. En su vida útil, el sistema produce en total 5308740.00 kWh de energía final, equivalentes a 1730649.24 kWh de energía primaria. El sistema no consume energía externa para su funcionamiento. El reciclaje consume 2213.54 kWh de energía final equivalentes a 5447.52 kWh de energía primaria (ver detalles en el Capítulo 8).

El desempeño energético de los sistemas de ventilación expresado en energía final y en energía primaria se muestra en las Tablas 11.3 y 11.4 y en las Figs. 11.8 y 11.9.

Tabla 11.3: Desempeño energético de los sistemas de ventilación, expresado en energía final.

| Sistema de ventilación | Requerimiento de energía final | Producción de energía final | Consumo de energía final |
|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| | (kWh/año) | (kWh) | (kWh) |
| Con ventilador mecánico | 325853.28 | 0 | 8146332 |
| Con ventilador solar | 320454.98 | 4242.48 | 8007132 |
| Con colector solar de aire | 214028.35 | 5350708.80 | 0 |
| Con muro Trombe | 212349.60 | 5308740.00 | 0 |

Tabla 11.4: Desempeño energético de los sistemas de ventilación, expresado en energía primaria.

| Sistema de ventilación | Requerimiento de energía final | Producción de energía primaria | Consumo de energía primaria |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| | (kWh/año) | (kWh) | (kWh) |
| Con ventilador mecánico | 325853.28 | 0 | 20048123.05 |
| Con ventilador solar | 320454.98 | 1383.05 | 2610325.03 |
| Con colector solar de aire | 214028.35 | 1744331.07 | 0 |
| Con muro Trombe | 212349.60 | 1730649.24 | 0 |

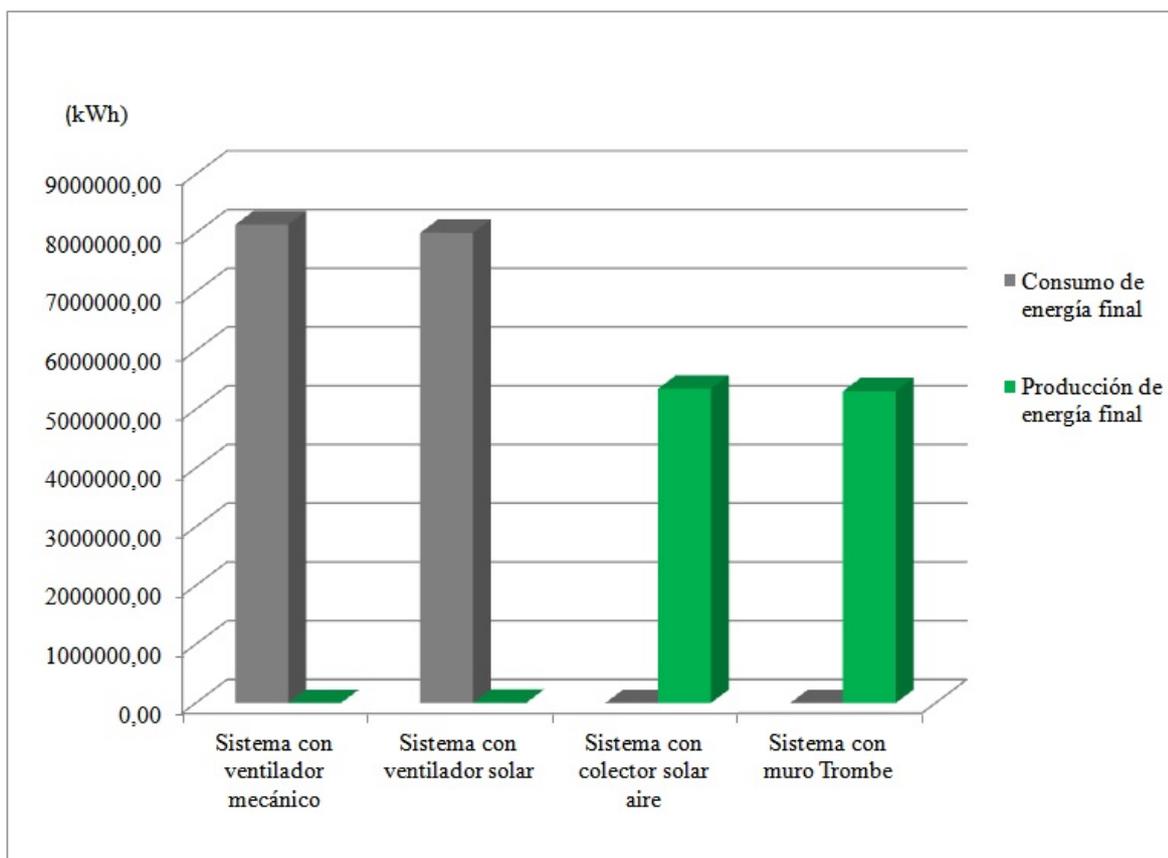


Figura 11.8: Desempeño energético de los sistemas de ventilación. Energía final.

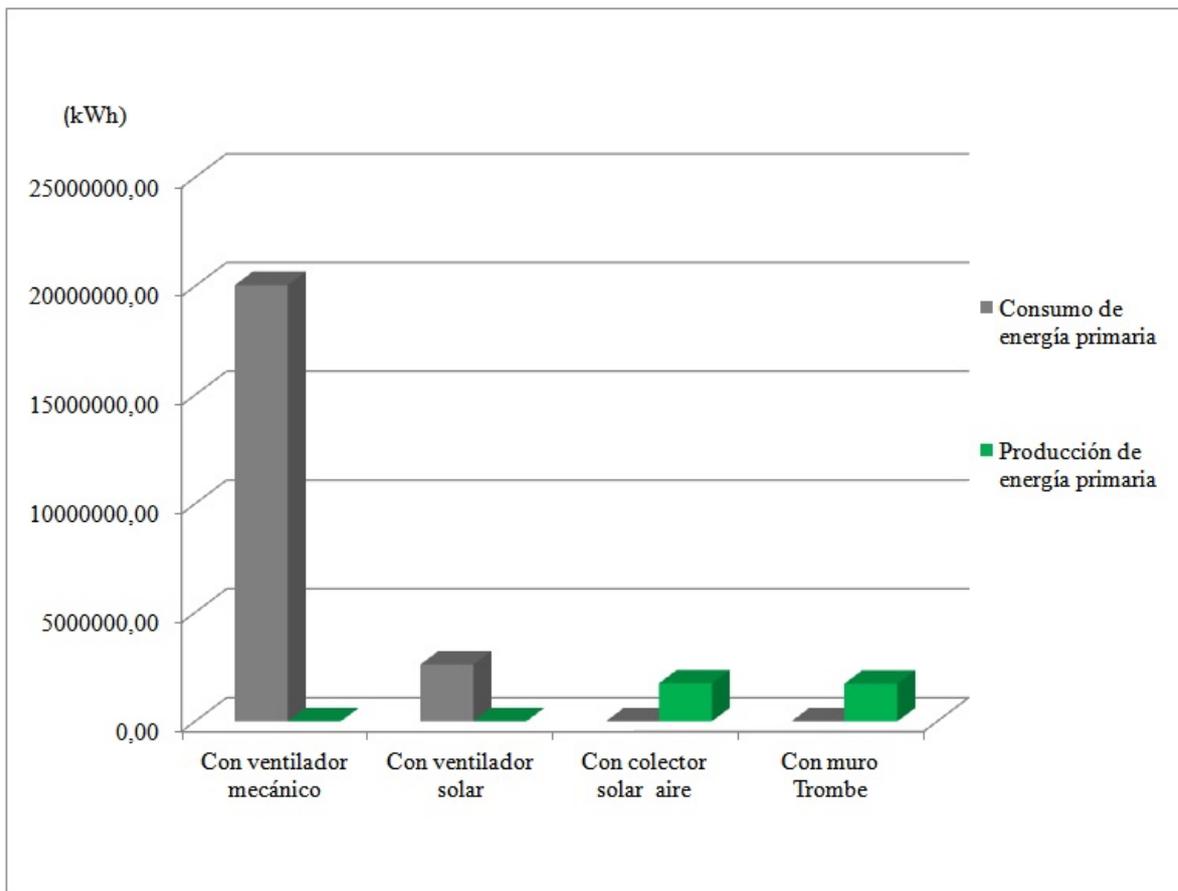


Figura 11.9: Desempeño energético de los sistemas de ventilación. Energía primaria.

11.4.2. Desempeño ambiental de los sistemas de ventilación. Fase de uso

Se ha comparado el desempeño ambiental del sistema de ventilación con ventilador mecánico convencional con tres sistemas de mejora: ventiladores solares, colectores solares de aire y muro Trombe.

En base a la metodología ESP2000, se ha encontrado que en su ciclo de vida, los sistemas con ventilador mecánico y con ventilador solar producen daño en casi todas las categorías, principalmente sobre el agotamiento de reservas, la esperanza de vida, la morbilidad severa y la morbilidad. Los daños ocasionados por estos sistemas son debidos al consumo de energía y a los equipos requeridos para suministrar el aire de ventilación al edificio, como la unidad de tratamiento de aire y los conductos.

El sistema con ventilador mecánico debe pagar para restaurar los daños causados, 1012866.41 ELUs, 339689.77 ELUs y 120427.45 ELUs, en cada una de las categorías descritas arriba. Los detalles del coste ambiental en cada una de las categorías se presentan en la Tabla 11.5.

El sistema de ventilación con ventilador debe pagar 994711.17 ELUs, 333958.92 ELUs y 118391.63 ELUs, en cada una de las categorías descritas arriba (ver Tabla 11.5).

Los sistemas de ventilación con muro Trombe y con colector solar de aire originan menos impactos ambientales que los sistemas de ventilación con ventilador mecánico y con ventilador solar. El desempeño ambiental comparativo de los sistemas de ventilación durante su ciclo de vida se muestra en la Fig. 11.10. Estos sistemas evitan daños principalmente sobre el agotamiento de reservas y sobre la molestia severa. Ello se debe a la producción de energía por estos sistemas y a que no requieren unidad de tratamiento de aire. El sistema con muro Trombe analizado es un sistema pasivo, por lo que no requiere ningún equipo adicional.

El sistema de ventilación con colector solar de aire evita daños, entre otros: sobre el agotamiento de reservas, equivalente a 591730.58 ELUs; sobre la salud humana, 14495.13 ELUs; sobre la molestia severa, 3498.37 ELUs; y sobre la morbilidad severa, 2404.39 ELUs. Los detalles del coste ambiental en cada una de las categorías se recogen en la Tabla 11.5.

El sistema de ventilación con muro Trombe evita daños, entre otros, sobre el agotamiento de reservas, equivalente a 542780.01 ELUs y sobre la molestia severa, 3023.06 ELUs (ver Tabla 11.5).

La fase de uso de los sistemas muestra que los sistemas que consumen energía dan lugar a mayores impactos ambientales, mientras que los sistemas que producen energía evitan impactos ambientales, como se muestra en la Fig. 11.12. Los datos se detallan en la Tabla 11.6.

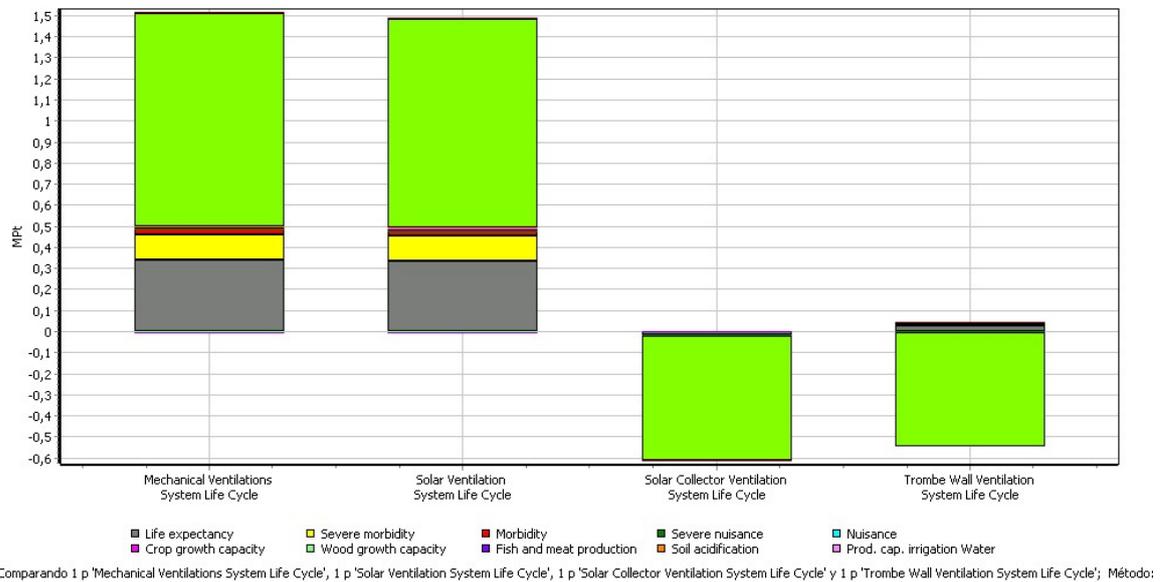


Figura 11.10: Impactos ambientales comparativos de los sistemas de ventilación. Ciclo de Vida. Metodología EPS2000. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

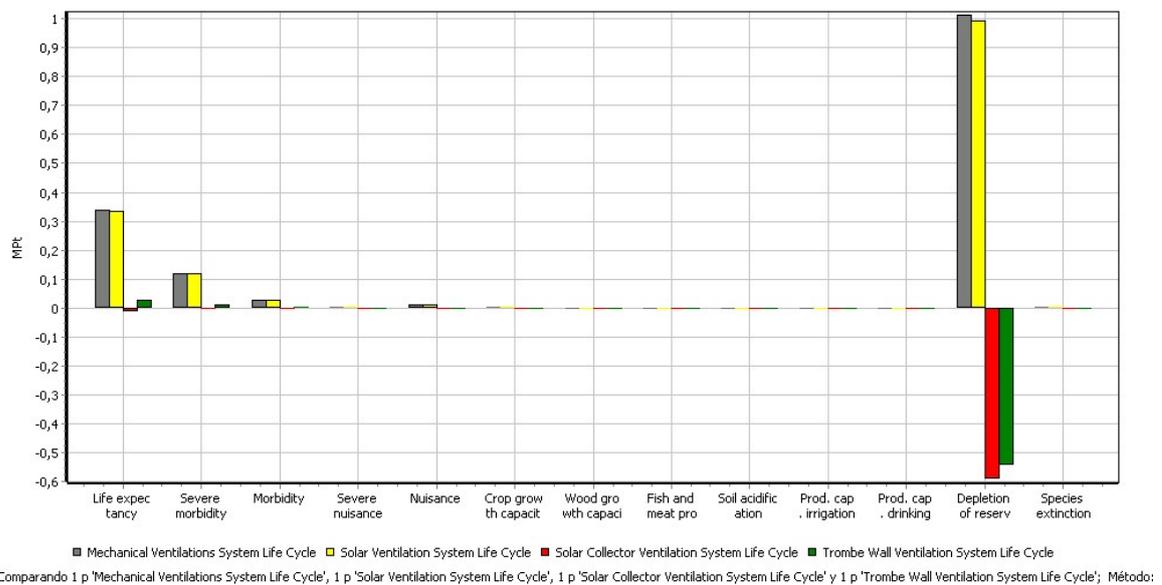
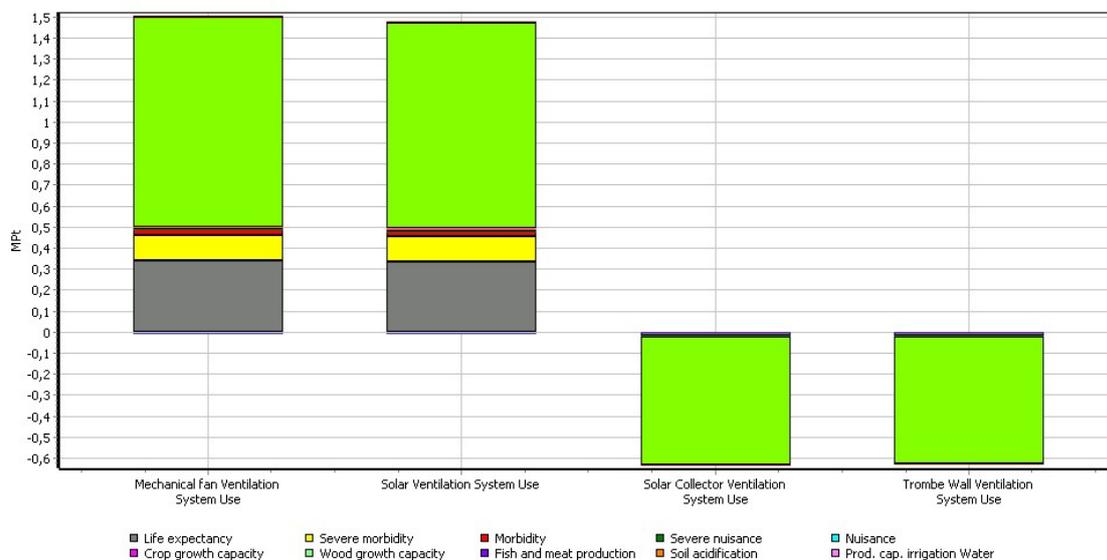


Figura 11.11: Impactos ambientales comparativos de los sistemas de ventilación. Ciclo de vida. Metodología EPS2000 Ponderación. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

Tabla 11.5: Impactos ambientales comparativos de los sistema de ventilación. Ciclo de Vida. Evaluación del daño. Metodología EPS2000. Datos calculados usando el *software* SimaPro8.

| Categoría de daño | Unidad | Sistema de ventilación | | | |
|---|--------|-------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------|
| | | Con ventilador mecánico | Con ventilador solar | Con colector solar de aire | Con muro Trombe |
| Esperanza de vida | ELU | 339689.77 | 333958.92 | -14495.13 | 27223.93 |
| Morbilidad severa | ELU | 120427.45 | 118391.63 | -2404.39 | 11893.31 |
| Morbilidad | ELU | 25489 | 25058.17 | -383.78 | 2616.00 |
| Molestia severa | ELU | 1147.05 | 1121.12 | -3498.37 | -3023.06 |
| Molestia | ELU | 9810.43 | 9644.06 | -431.85 | 342.47 |
| Capacidad de crecimiento de maíz | ELU | 1502.59 | 1477.18 | -23.31 | 136.55 |
| Capacidad de crecimiento de madera | ELU | -6321.11 | -6214.18 | 89.39 | -370.17 |
| Producción de pescado y carne | ELU | -229.46 | -225.58 | 5.71 | -16.16 |
| Acidificación del suelo | ELU | 268.06 | 263.52 | -10.49 | 10.10 |
| Capacidad de producción de agua para irrigación | ELU | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Capacidad de producción de agua ppotable | ELU | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Agotamiento de reservas | ELU | 1012866.41 | 994711.17 | -591730.58 | -542780.01 |
| Extinción de especies | ELU | 4750.33 | 4670.03 | -100.50 | 683.16 |
| Total | ELU | 1509400.67 | 1482856.04 | -612983.30 | -503283.87 |



Comparando 1 p 'Mechanical Fan Ventilation System Use', 1 p 'Solar Ventilation System Use', 1 p 'Solar Collector Ventilation System Use' y 1 p 'Trombe Wall Ventilation System Use'; Método: EPS 2000 V2.08 / EI

Figura 11.12: Impactos ambientales comparativos de los sistemas de ventilación. Fase de uso. Metodología EPS2000. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

Tabla 11.6: Impactos ambientales comparativos de los sistema de ventilación. Fase de uso. Evaluación del daño. Metodología EPS2000. Datos calculados usando el *software* SimaPro8.

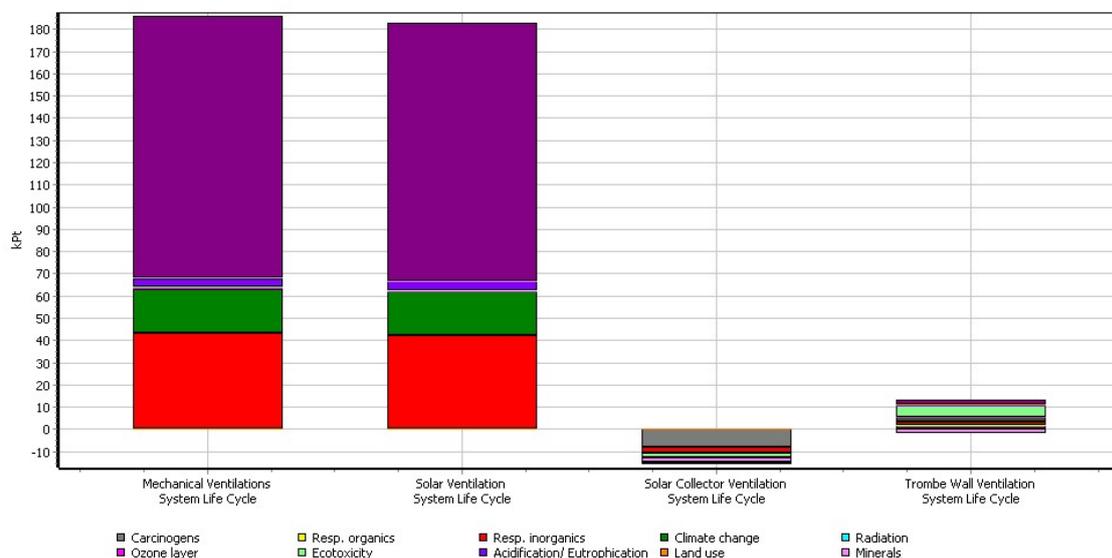
| Categoría de daño | Unidad | Sistema de ventilación | | | |
|---|--------|-------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------|
| | | Con ventilador mecánico | Con ventilador solar | Con colector solar de aire | Con muro Trombe |
| Esperanza de vida | ELU | 339689.77 | 333958.92 | -14495.13 | -27223.93 |
| Morbilidad severa | ELU | 120427.45 | 118391.63 | -2404.39 | 11893.31 |
| Morbilidad | ELU | 25489.15 | 25058.17 | -383.78 | 2616.00 |
| Molestia severa | ELU | 1147.05 | 1121.12 | -3498.37 | -3023.06 |
| Molestia | ELU | 9810.43 | 9644.06 | -431.85 | 342.47 |
| Capacidad de crecimiento de maíz | ELU | 1502.59 | 1477.18 | -23.31 | 136.55 |
| Capacidad de crecimiento de madera | ELU | -6321.11 | -6214.18 | 89.39 | -370.17 |
| Producción de pescado y carne | ELU | -229.46 | -225.58 | 5.71 | -16.16 |
| Acidificación del suelo | ELU | 268.06 | 263.52 | -10.49 | 10.10 |
| Capacidad de producción de agua para irrigación | ELU | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Capacidad de producción de agua potable | ELU | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Agotamiento de reservas | ELU | 1012866.41 | 994711.17 | -591730.58 | -542780.01 |
| Extinción de especies | ELU | 4750.33 | 4670.03 | -100.50 | 683.16 |
| Total | ELU | 1497514.30 | 1470734.56 | -632328.37 | -627368.64 |

11.4.3. Análisis de sensibilidad del método usado en los sistemas de ventilación

El análisis de sensibilidad de la metodología utilizada se ha llevado a cabo comparando los resultados obtenidos con la metodologías EPS2000 y con la metodología Ecoindicador 99. Ambos métodos evalúan los daños sobre la salud humana, la capacidad de producción de los ecosistemas y la fuente de los recursos abióticos. La metodología EPS2000 evalúa adicionalmente los daños sobre la biodiversidad. Los resultados obtenidos con el Ecoindicador 99 se detallan por categoría de daño en la Tabla 11.7. En las Figs 11.14 y 11.13 se observan los resultados ponderados y como puntuación unica, respectivamente.

En base a la metodología del Ecoindicador99, se han encontrado los resultados más relevantes, que se exponen a continuación.

Los sistemas con ventilador mecánico y con ventilador solar producen daños sobre todas las categorías especialmente por el uso de combustibles fósiles, por respiración de gases inorgánicos y sobre el cambio climático. Respecto de los daños evitados, el sistema con colector solar de aire evita daños en casi todas las categorías, especialmente sobre carcinógenos, respiración de inorgánicos, ecotoxicidad y minerales; el sistema de ventilación con muro Trombe evita daños en casi todas las categorías, especialmente sobre el uso de minerales; el sistema de ventilación con colector solar de aire evita daños en casi todas las categorías, especialmente sobre la producción de carcinógenos y sobre el uso de minerales.



Comparando 1 p 'Mechanical Ventilations System Life Cycle', 1 p 'Solar Ventilation System Life Cycle', 1 p 'Solar Collector Ventilation System Life Cycle' y 1 p 'Trombe Wall Ventilation System Life Cycle'; Método:

Figura 11.13: Impactos ambientales comparativos de los sistemas de ventilación. Ciclo de vida. Metodología Ecoindicador99. Puntuación única. Diagrama generado usando el software SimaPro8.

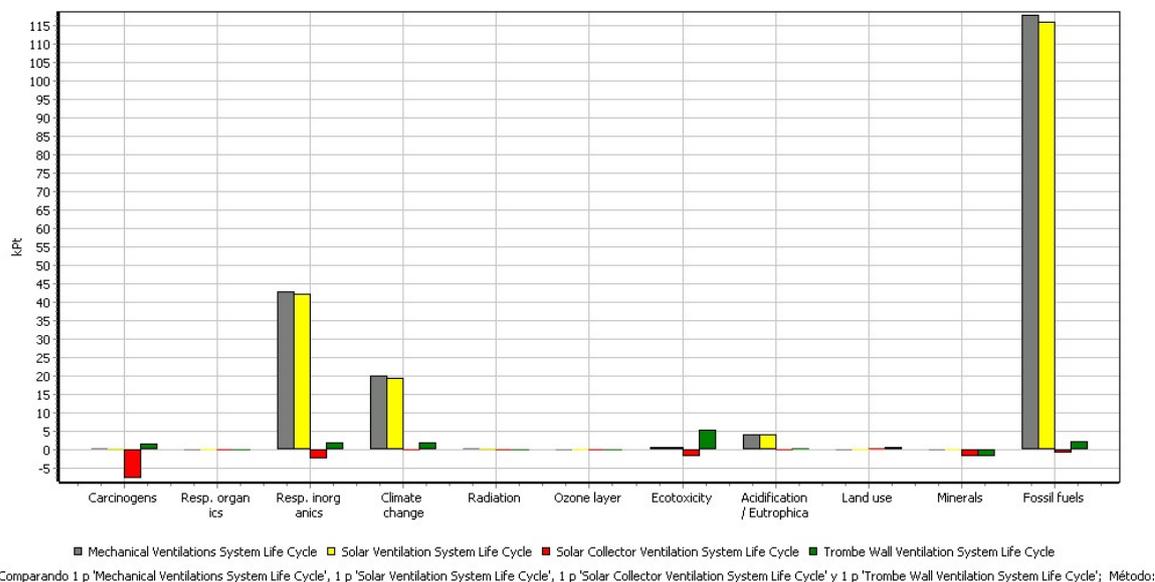


Figura 11.14: Impactos ambientales comparativos de los sistemas de ventilación. Ciclo de vida. Metodología Ecoindicador99. Ponderación. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

Tabla 11.7: Impactos ambientales comparativos de los sistema de ventilación. Ciclo de vida. Puntuación única. Metodología Ecoindicador99. Datos calculados usando el *software* SimaPro8.

| Categoría de daño | Unidad | Sistema de ventilación | | | |
|-----------------------------|--------|-------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------|
| | | Con ventilador mecánico | Con ventilador solar | Con colector solar de aire | Con muro Trombe |
| Carcinógenos | kPt | 10.38 | 0.36 | -7.78 | 1.57 |
| Respiración de orgánicos | kPt | 0.04 | 0.03 | -0.001 | -0.004 |
| Respiración de inorgánicos | kPt | 42.76 | 42.04 | -2.54 | 1.81 |
| Cambio del clima | kPt | 19.82 | 19.48 | -0.26 | 1.98 |
| Radiación | kPt | 0.29 | 0.28 | -0.01 | -0.01 |
| Capa de ozono | kPt | 0.00308 | 0.00302 | -0.00030 | 0.00001 |
| Ecotoxicidad | kPt | 0.49 | 0.47 | -1.96 | 5.25 |
| Acidificación/Eutrofización | kPt | 4.14 | 4.07 | -0.12 | 0.20 |
| Uso del suelo | kPt | 0 | 0 | 0.20 | 0.44 |
| Minerales | kPt | 0.08 | 0.08 | -1.97 | -1.87 |
| Combustibles fósiles | kPt | 117.88 | 115.89 | -1.08 | -2.14 |
| Total | kPt | 185.87 | 182.71 | -15.62 | 11.51 |

11.5. Desempeño energético y ambiental de los sistemas de calefacción

11.5.1. Desempeño energético de los sistemas de calefacción

El desempeño energético de los sistemas de calefacción se ha cuantificado considerando que todos los equipos tienen el mismo tiempo de operación: 1920 h/año. Se han considerado 30 años de vida útil para los sistemas de calefacción con caldera de gasóleo y con bomba de calor geotérmica.

El sistema de calefacción con caldera de gasóleo consume 459179.67 kWh/año de energía final, es decir 13775390.00 kWh de energía final en su vida útil, equivalentes a 16282511 kWh de energía primaria. El sistema requiere para el reciclaje 2464.15 kWh de energía final equivalentes a 6064.26 kWh de energía primaria (ver detalles en el Capítulo 9).

El sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica consume 38543.40 kWh de energía final/año para el funcionamiento de las bombas, es decir, 1156302.00 kWh de energía final en su vida útil, equivalentes a 2845659.22 kWh de energía primaria. No obstante, genera 323446.01 kWh de energía final/año en forma de calor para calentar el edificio, es decir, 9703380.30 kWh de energía final en su vida útil, equivalentes a 3163301.98 kWh de energía primaria, lo que supone un ahorro energético muy significativo. El sistema requiere para el reciclaje 1415.55 kWh de energía final equivalentes a 3483.67 kWh de energía primaria (ver detalles en el Capítulo 10).

Los datos expresados en energía final y en energía primaria que reflejan el desempeño energético de los sistemas de ventilación analizados se muestra en la Tabla 11.8 y en las Figs. 11.15 y 11.16 se representan dichos valores.

Tabla 11.8: Desempeño energético de los sistemas de calefacción. Fase de uso.

| Sistema de calefacción | Consumo | | | Producción | | |
|-------------------------------|---------------|---------------|------------------|---------------|---------------|------------------|
| | Energía final | Energía final | Energía primaria | Energía final | Energía final | Energía primaria |
| | (kWh/año) | (kWh) | (kWh) | (kWh/año) | (kWh) | (kWh) |
| Con caldera de gasóleo | 459179.67 | 13775390.00 | 16282510.98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Con bomba de calor geotérmica | 38543.40 | 1156302.00 | 2845659.22 | 323446.01 | 9703380.30 | 3163301.98 |

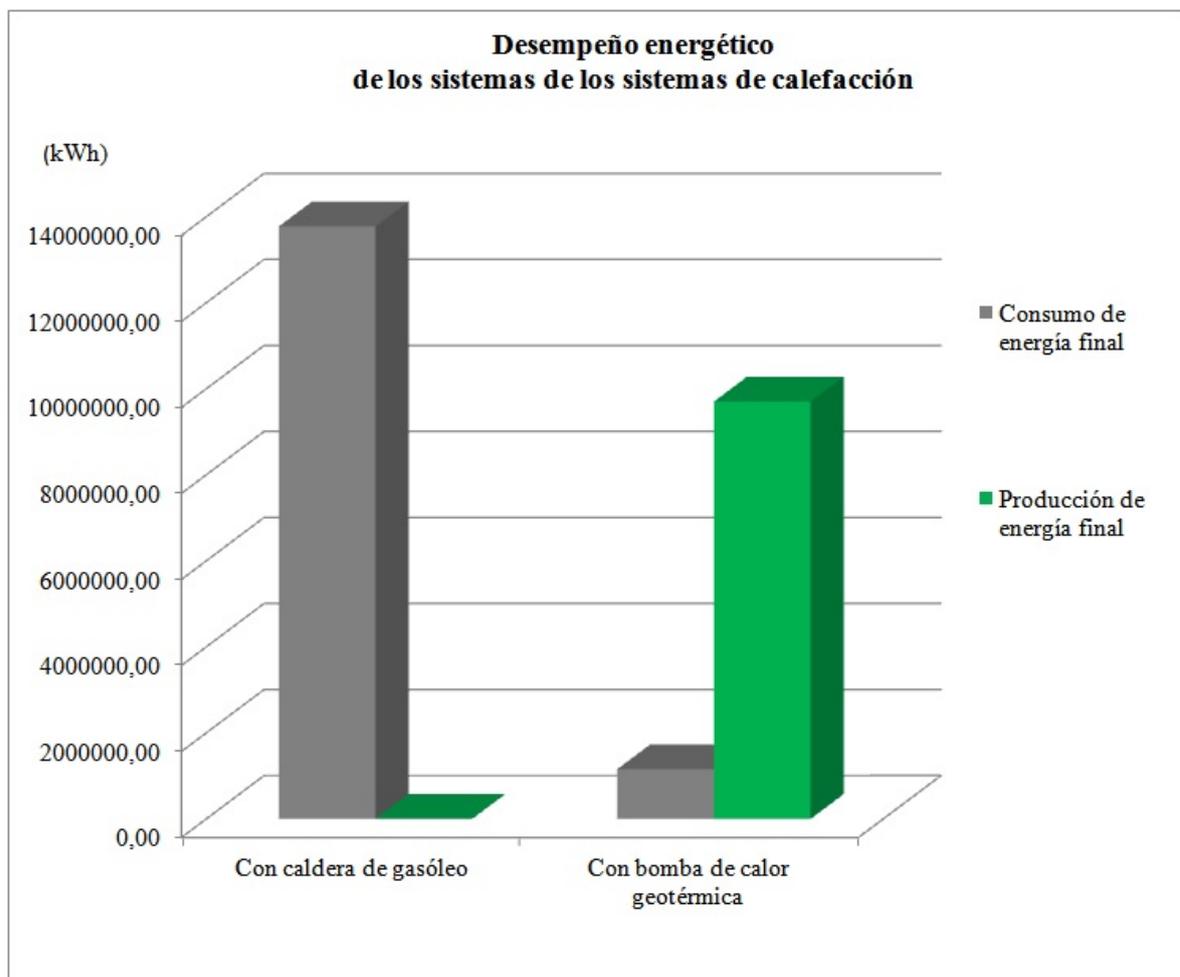


Figura 11.15: Desempeño energético de los sistemas de calefacción. Energía final.

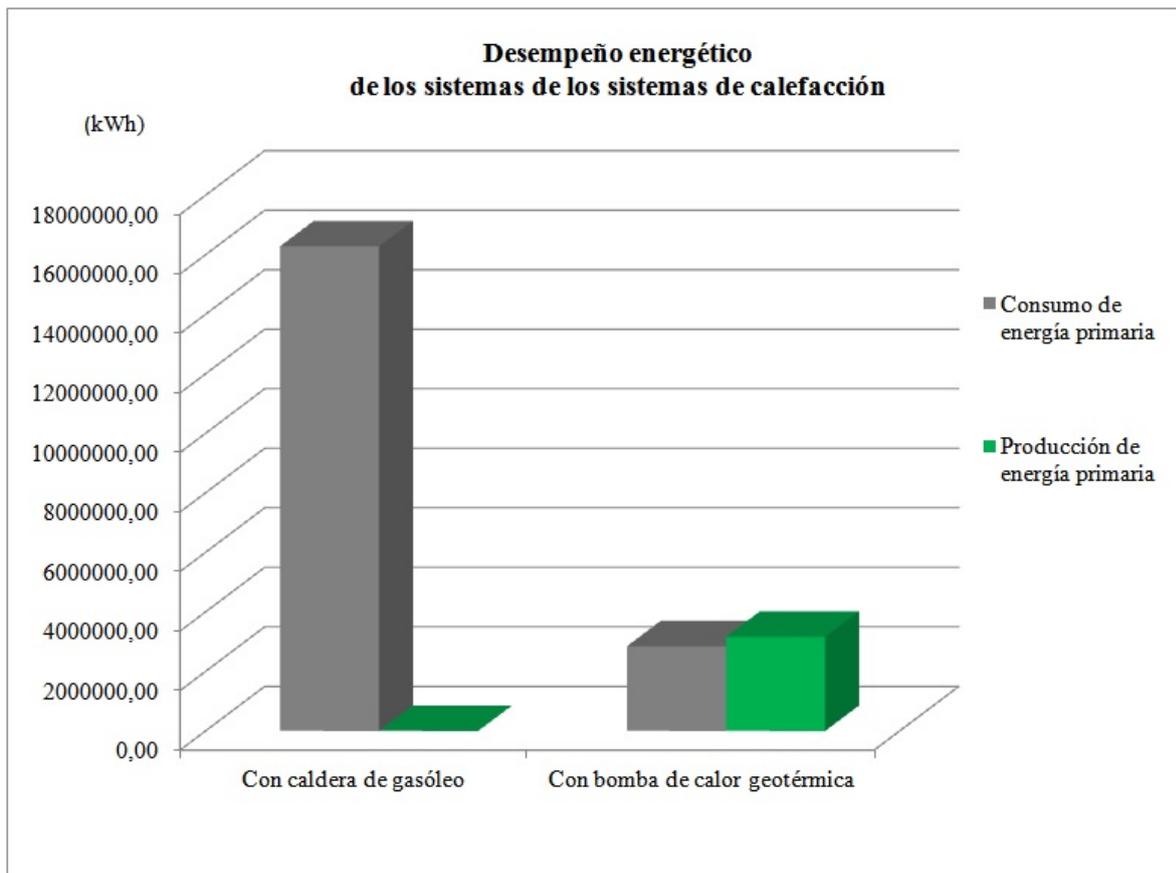


Figura 11.16: Desempeño energético de los sistemas de calefacción. Energía primaria.

11.6. Impactos ambientales comparativos de los sistemas de calefacción

Se han comparado los impactos ambientales del ciclo de vida de los sistemas de calefacción que utilizan caldera de gasoil y con los que utilizan un sistema geotérmico. Se ha encontrado que el sistema caldera de gasoil ocasiona 88.80 % más daños sobre el agotamiento de reservas que el sistema geotérmico. Respecto a los daños en la esperanza de vida, el sistema con caldera de gasoil produce 91.57% más daños que el sistema geotérmico. Los daños ocasionados sobre el agotamiento de reservas y sobre la esperanza de vida se deben al acero y el hierro usados para el montaje del sistema de calefacción con caldera de gasoil.

Los sistemas deben pagar para restaurar los cambios ocasionados sobre el agotamiento de reservas y sobre la esperanza de vida 1291305.63 y 1092073.82 ELUs, respectivamente, en el caso del sistema con caldera de gasoil; frente a 144616.96 y 92080.61 ELUs, respectivamente, en el caso del sistema con bomba de calor geotérmica (ver Tabla 11.9 y Fig. 11.17).

Tabla 11.9: Impactos ambientales comparativos de los sistema de calefacción. Ciclo de vida. Evaluación del daño. Metodología EPS2000. Datos calculados usando el *software* SimaPro8.

| Categoría de daño | Unidad | Sistema de calefacción | |
|---|--------|------------------------|-------------------------------|
| | | Con caldera de gasóleo | Con bomba de calor geotérmica |
| Esperanza de vida | ELU | 1092073.82 | 92080.61 |
| Morbilidad severa | ELU | 324141.09 | 36656.43 |
| Morbilidad | ELU | 74307.98 | 27831.77 |
| Molestia severa | ELU | 4405.08 | 90.77 |
| Molestia | ELU | 43285.60 | 2881.75 |
| Capacidad de crecimiento de maíz | ELU | 4020.84 | 413.63 |
| Capacidad de crecimiento de madera | ELU | -18455.99 | -1890.69 |
| Producción de pescado y carne | ELU | -734.88 | -52.25 |
| Acidificación del suelo | ELU | 1144.95 | 78.01 |
| Capacidad de producción de agua para irrigación | ELU | 0 | 0 |
| Capacidad de producción de agua potable | ELU | 0 | 0 |
| Agotamiento de reservas | ELU | 1291305.63 | 144616.96 |
| Extinción de especies | ELU | 12628.58 | 1393.16 |
| Total | ELU | 2828122.70 | 284100.15 |

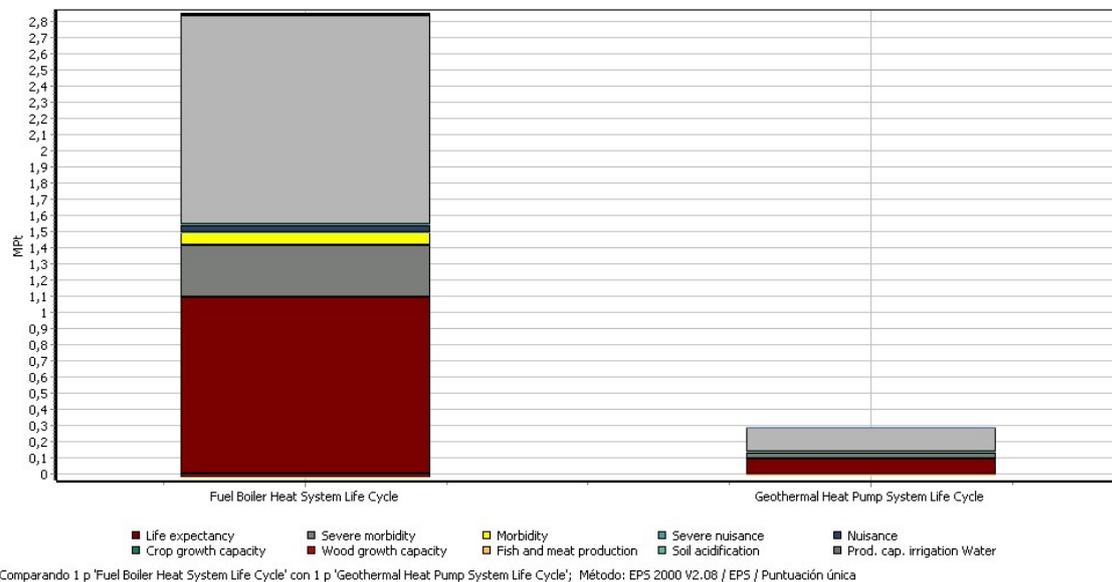


Figura 11.17: Comparación de los impactos ambientales de los sistemas de calefacción: con caldera de gasoil y geotérmico. Ciclo de vida. Puntuación única. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

11.6.1. Análisis de sensibilidad del método usado en los sistemas de calefacción

El análisis de sensibilidad se ha llevado a cabo comparando los resultados obtenidos con la metodología EPS2000 y con la metodología Ecoindicador 99. Ambos métodos evalúan los daños sobre la salud humana, la capacidad de producción de los ecosistemas y la fuente de los recursos abióticos. La metodología EPS2000 evalúa adicionalmente los daños sobre la biodiversidad.

Los resultados más relevantes, en base a la metodología del Ecoindicador99, se exponen a continuación.

El sistema con caldera de gasóleo causa daños sobre todas las categorías. Se producen los mayores daños por el uso de combustibles fósiles; por respiración de gases orgánicos e inorgánicos; y por el cambio climático. El sistema con bomba de calor geotérmica evita daños sobre la mayoría de las categorías, especialmente sobre el uso de combustibles fósiles; la respiración de gases orgánicos e inorgánicos; y el cambio del clima. Los detalles sobre todas las categorías de daño se presentan en la Fig. 11.18 y en la Tabla 11.10.

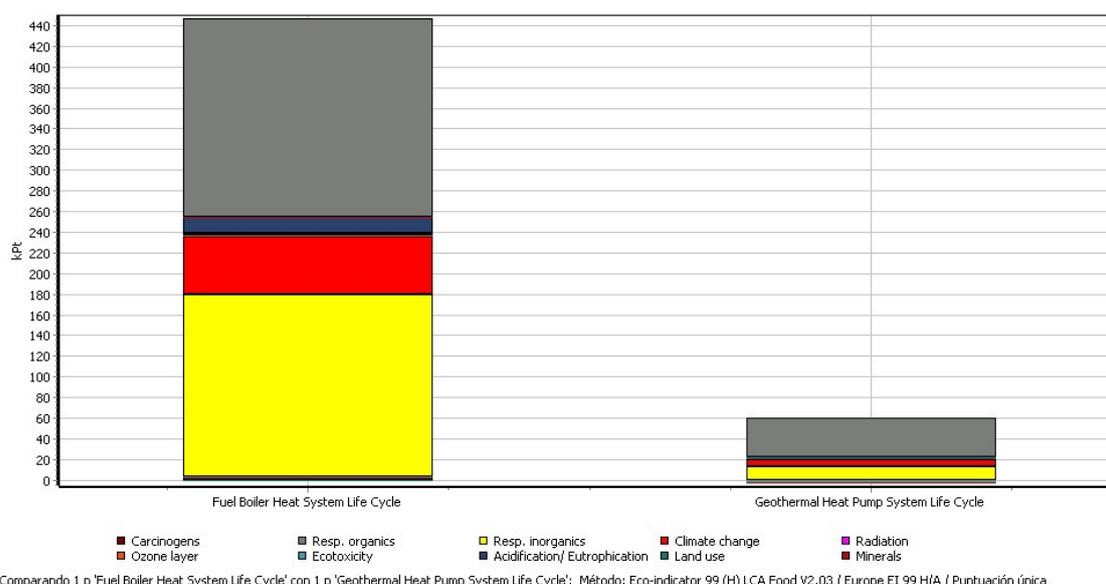


Figura 11.18: Impactos ambientales comparativos de los sistemas de calefacción. Fase de ciclo de vida. Metodología EPS2000. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

Tabla 11.10: Impactos ambientales comparativos de los sistemas de calefacción. Ciclo de vida. Metodología Ecoindicador 99. Puntuación única. Datos calculados usando el *software* Sima-Pro8.

| Categoría de daño | Unidad | Sistema de calefacción | |
|-----------------------------|--------|------------------------|-------------------------------|
| | | Con caldera de gasóleo | Con bomba de calor geotérmica |
| Carcinógenos | kPt | 2.82 | -1.52 |
| Respiración de orgánicos | kPt | 0.06 | 0.01 |
| Respiración de inorgánicos | kPt | 176.55 | 13.67 |
| Cambio del clima | kPt | 55.95 | 6.29 |
| Radiación | kPt | 1.17 | -0.04 |
| Capa de ozono | kPt | 0.05 | -0.01 |
| Ecotoxicidad | kPt | 2.60 | -0.77 |
| Acidificación/Eutrofización | kPt | 15.00 | 1.36 |
| Uso del suelo | kPt | -0.002 | 0.875 |
| Minerales | kPt | 0.04 | -0.17 |
| Combustibles fósiles | kPt | 192.44 | 38.31 |
| Total | kPt | 446.67 | 58.01 |

11.6.2. Impactos ambientales comparativos de los sistema de iluminación

Los resultados de los impactos ambientales comparativos de los sistemas se han presentado en forma de daños causados en las categorías de: salud humana, capacidad de producción de los ecosistemas, fuente de recursos abióticos y biodiversidad. En la categoría de salud humana, se encuentran los daños a la esperanza de vida, morbilidad severa, morbilidad, molestia severa y molestia. La categoría de capacidad de producción de los ecosistemas contiene los daños a la capacidad de crecimiento de maiz y capacidad de crecimiento de madera como los más representativos. En la categoría de fuente de recursos abióticos, se encuentran los daños a la producción de pescado y carne, a la acidificación del suelo, la capacidad de producción de agua para irrigación, la capacidad de producción de agua para beber y el agotamiento de reservas. La categoría de biodiversidad contiene los daños sobre la extinción de especies.

Para realizar análisis del ciclo de vida del uso del sistema de iluminación, se ha establecido una potencia de iluminación de 12895 kWh/año. Se han comparado los impactos ambientales de dicha potencia suministrada por electricidad de la red y la suministrada con paneles fotovoltaicos. Se encuentra que el uso del sistema fotovoltaico evita impactos ambientales principalmente sobre reservas y sobre la esperanza de vida, con -32793.17 y -1852.88 ELUs, respectivamente. El sistema de iluminación con red eléctrica causa daños en la mayoría de las categorías principalmente sobre las reservas, la esperanza de vida y la morbilidad severa, debiendo pagar para restaurar los daños ocasionados, 112500.23, 38304.59, 13566.43 y 2867.56 ELUs, respectivamente. Los detalles de cada una de las categorías de daño se presentan en la Fig.11.19 y en la Tabla 11.11.

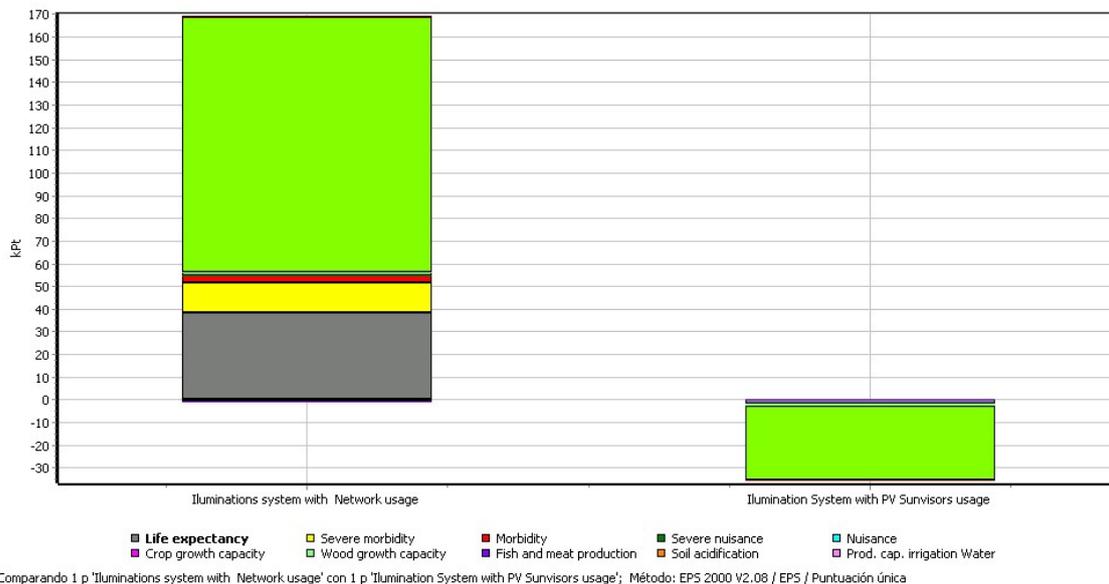


Figura 11.19: Impactos ambientales comparativos del uso de los sistemas de iluminación: Paneles fotovoltaicos y red eléctrica. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

Tabla 11.11: Impactos ambientales comparativos de los sistemas de iluminación: Paneles fotovoltaicos y red eléctrica. Fase de uso. Metodología EPS2000. Puntuación única. Datos calculados usando el *software* SimaPro8.

| Categoría de daño | Unidad | Sistema de iluminación | |
|---|--------|----------------------------|---|
| | | Con electricidad de la red | Con electricidad de paneles fotovoltaicos |
| Esperanza de vida | ELU | 338304.59 | -1852.88 |
| Morbilidad severa | ELU | 13566.43 | -407.75 |
| Morbilidad | ELU | 2867.56 | -72.94 |
| Molestia severa | ELU | 127.86 | -226.90 |
| Molestia | ELU | 1104.84 | -46.66 |
| Capacidad de crecimiento de maíz | ELU | 169.04 | -4.46 |
| Capacidad de crecimiento de madera | ELU | -711.09 | 17.58 |
| Producción de pescado y carne | ELU | -25.82 | 1.07 |
| Acidificación del suelo | ELU | 230.18 | -1.18 |
| Capacidad de producción de agua para irrigación | ELU | 0 | 0 |
| Capacidad de producción de agua potable | ELU | 0 | 0 |
| Agotamiento de reservas | ELU | 112500.23 | -32793.17 |
| Extinción de especies | ELU | 534.38 | -17.98 |
| Total | ELU | 168468.20 | -35405.26 |

11.6.3. Análisis de sensibilidad del método usado en los sistemas de iluminación

El análisis de sensibilidad se ha llevado a cabo comparando los resultados obtenidos con las metodologías: EPS2000 y Ecoindicador 99. Ambos métodos evalúan los daños sobre la salud humana, la capacidad de producción de los ecosistemas y la fuente de los recursos abióticos. La metodología EPS2000 evalúa adicionalmente los daños sobre la biodiversidad.

Los resultados más relevantes, en base a la metodología del Ecoindicador99, se exponen a continuación.

El sistema de iluminación con electricidad de red causa daños sobre todas las categorías. Se producen los mayores daños por el uso de combustibles fósiles, por respiración de gases inorgánicos y por el cambio climático. El sistema de iluminación con electricidad proveniente de paneles fotovoltaicos evita daños sobre la mayoría de las categorías excepto sobre el uso de la tierra. Los resultados por categoría de daño se muestran en la Tabla 11.12 y en la Fig. 11.20.

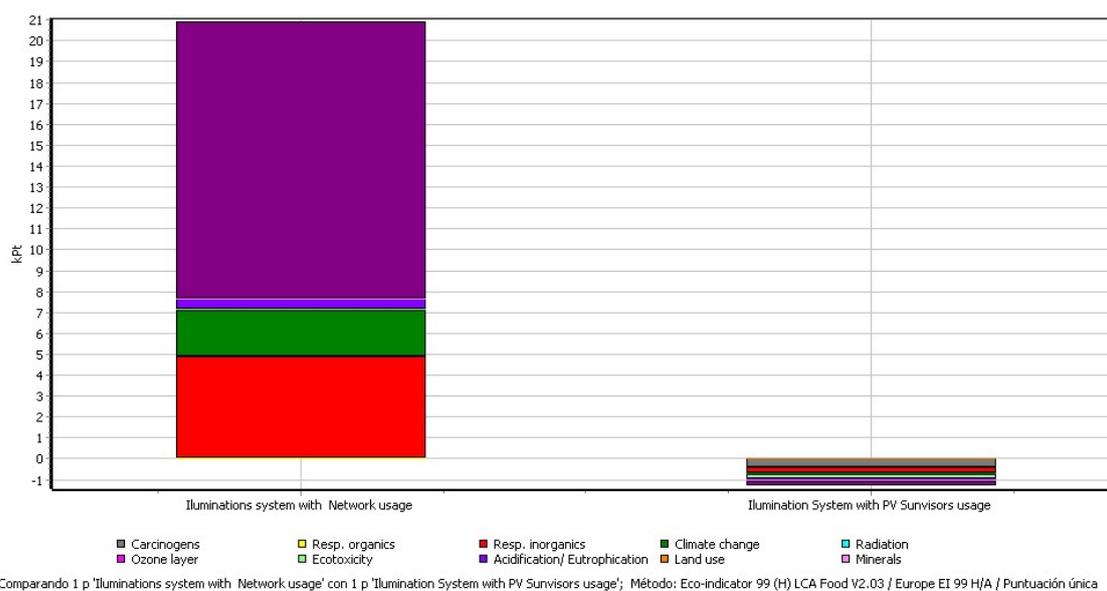


Figura 11.20: Impactos ambientales comparativos de los sistemas de iluminación. Fase de uso. Metodología Ecoindicador99. Diagrama generado usando el *software* SimaPro8.

Tabla 11.12: Impactos ambientales comparativos de los sistemas de iluminación. Fase de uso. Metodología Ecoindicador 99. Puntuación única. Datos calculados usando el *software* Sima-Pro8.

| Categoría de daño | Unidad | Sistema de iluminación | |
|-----------------------------|--------|----------------------------|---|
| | | Con electricidad de la red | Con electricidad de paneles fotovoltaicos |
| Carcinógenos | kPt | 0.0412 | -0.4242 |
| Respiración de orgánicos | kPt | 0.0040 | -0.0004 |
| Respiración de inorgánicos | kPt | 4.8190 | -0.2879 |
| Cambio del clima | kPt | 2.2293 | -0.0538 |
| Radiación | kPt | 0.0322 | -0.0009 |
| Capa de ozono | kPt | 0.0003 | -0.0001 |
| Ecotoxicidad | kPt | 0.0500 | -0.2205 |
| Acidificación/Eutrofización | kPt | 0.4656 | -0.0168 |
| Uso del suelo | kPt | 0.0000 | 0.0220 |
| Minerales | kPt | 0.0109 | -0.0619 |
| Combustibles fósiles | kPt | 13.2531 | -0.2341 |
| Total | kPt | 20.9056 | -1.2787 |

11.7. Contribuciones científicas de la Tesis

Los consumos energéticos en los edificios son cada vez mayores y existen, además, ciertas dificultades para que se desarrolle y aplique un saber acumulativo en este área de conocimiento. En esta Tesis se han estudiado diferentes escenarios de mejoras usando sistemas con energías renovables, lo que ha permitido demostrar que estos sistemas reducen los impactos ambientales en comparación con los sistemas convencionales.

Se han estudiado los materiales usados por los equipos, la energía requerida o producida durante el funcionamiento de los sistemas y la disposición final de los materiales una vez finalizada su vida útil.

Se ha construido el escenario de disposición final en España para los materiales pertenecientes a los sistemas analizados, en base al porcentaje de reciclaje recogido en la bibliografía y considerando como destino para los materiales no reciclados la incineración y el vertedero. Se recomienda incluir este escenario de disposición final en España en el *software* SimaPro y profundizar en la disposición final de los materiales en España, para actualizar y ampliar el escenario de residuos realizado en este estudio.

Se ha demostrado, a través de la curva reducción de emisiones, el enorme potencial de disminución de emisiones existente con los sistemas de energías renovables, llegando a alcanzar una reducción de hasta un 64 % en comparación con los sistemas convencionales.

Los sistemas de energías renovables propuestos logran un edificio de energía muy baja, debido a que la energía procedente de fuentes renovables es producida en el edificio y su entorno.

En el escenario de iluminación se estudió un sistema de integración con paneles fotovoltaicos y se comparó con la misma potencia suministrada por la red eléctrica. Se ha encontrado que el sistema de iluminación con paneles fotovoltaicos evita daños en casi todas las categorías de análisis, en comparación al suministro de electricidad con la red.

En el escenario de ventilación, se ha llevado a cabo el diseño del sistema de ventilación del edificio caso de estudio para un sistema de ventilación mecánica y se han analizado tres sistemas con energías renovables basados en ventiladores solares, colectores solares de aire y un muro Trombe. Se han incluido también el diseño de los conductos de aire, y el dimensionamiento de los equipos como contribución para la implementación de los sistemas de ventilación, de acuerdo a la normativa vigente.

Se ha encontrado que el sistema de ventilación con ventilador mecánico produce los mayores impactos ambientales, seguido del sistema con ventilador solar. Los sistemas con menores impactos ambientales son el muro Trombe y el sistema con colectores solares de aire.

En todos los sistemas de ventilación analizados, la fase de uso es la fase que origina los mayores impactos ambientales.

Se encuentra que el muro Trombe y el colector solar de aire tienen un desempeño

energético similar en la fase de uso, debido a que ambos sistemas generan la energía requerida para calentar y suministrar el aire de ventilación.

De la comparación de los sistemas de ventilación se encuentra que el sistema de ventilación con muro Trombe usa materiales menos contaminantes comparados con los demás sistemas de ventilación analizados.

La integración en la envolvente del edificio de sistemas solares pasivos puede contribuir a aumentar su eficiencia energética. Sin embargo, la falta de metodologías de cálculo para el rendimiento térmico de estos sistemas afecta a su uso en edificios. El muro Trombe es una de esas técnicas, cuyo uso es muy reducido, especialmente en España. La metodología de cálculo usada aquí se basó en los estudios de Briga-Sà, (2014) (BrigaSà et al., 2014), con la que se analizó el rendimiento térmico del muro Trombe ventilado durante la temporada de calefacción en Valladolid. Se ha concluido que la mayor contribución ha estado producida por la transferencia de calor por conducción, convección y radiación. Sin embargo, la existencia de un sistema de ventilación en la masa de pared tiene un papel significativo en el rendimiento térmico del muro Trombe, contribución que aumenta con el aumento del espesor de la masa de pared.

Se han calculado las características de la masa de pared requerida para proporcionar la ventilación de aire para el aula, cuya área corresponde a sólo 2.34 % del área del piso del edificio, revelando que se puede proporcionar el 100 % del aire de ventilación requerido por el edificio y las demandas de energía de calefacción pueden ser reducidas.

Por tanto, la inclusión de un sistema con muro Trombe en la envolvente del edificio mejora su eficiencia energética. No obstante, debe desarrollarse trabajo experimental para determinar las fluctuaciones de temperatura a lo largo de las diferentes capas, los flujos de calor y la demora en la devolución de calor.

La técnica de análisis de ciclo de vida ha permitido identificar los impactos ambientales y la metodología ESP2000 nos ha proporcionado el coste en ELUs o Euros, para restaurar los daños ocasionados al medio ambiente del sistema de iluminación con electricidad de la red en comparación con electricidad proveniente de paneles fotovoltaicos; del sistema de ventilación mecánica en comparación con otros sistemas de ventilación como el ventilador solar, el colector solar de aire y el muro Trombe; y del sistema de calefacción con caldera de gasóleo en comparación con la bomba de calor geotérmica. De este modo, constituye un valor añadido a los conocimientos científicos sobre el uso de estos sistemas y para conocer el coste más realista de los sistemas donde se incluye el impacto en todo su ciclo de vida.

Los resultados del enfoque de la metodología de Análisis Ciclo Vida ha permitido estimar los impactos ambientales encontrando mayores daños sobre la salud humana y sobre las fuentes de recursos abióticos y el coste a pagar para restaurar los daños causados por cada uno de los sistemas de ventilación.

Se han alcanzado reducciones de emisiones de CO₂ de 1.71 % con el sistema de ventilación basado en ventilador solar y 100 % de reducciones usando colector solar de aire y muro Trombe, respecto al sistema con ventilador mecánico.

El análisis de sensibilidad de los sistemas ha mostrado que el sistema con muro Trombe es sensible a la cantidad de materiales usados en la fase de construcción y por ello se ha reducido el espesor del muro Trombe de 40 cm a 20 cm. El transporte hasta la planta de reciclaje una vez finalizada su vida útil y su posterior tratamiento ocasiona mayores impactos debido a su mayor peso en comparación con los demás sistemas de ventilación analizados.

El uso de una matriz energética española más renovable podría reducir los impactos ambientales de los sistemas que consumen energía en la fase de uso.

El sistema con muro Trombe no se encuentra incluido en la base de datos del *software* SimaPro8, por lo que se ha incluido este sistema a partir de las características descritas en las referencias citadas.

En el escenario de calefacción, se ha llevado a cabo el diseño del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica habiéndose incluido el dimensionamiento de los equipos a efectos de implementar un sistema de calefacción con energías renovables.

Se ha efectuado la simulación del desempeño energético del sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica con el uso del *software* Earth Energy Design. Los resultados de la optimización muestran que existen 25 configuraciones que cumplen con los requerimientos energéticos del edificio. Se ha elegido la configuración rectangular número 330 porque requiere menos profundidad de pozo, variable que tiene un peso importante a la hora de elegir la configuración debido a los altos costos de la perforación. La configuración 330 está formada por 16 pozos 4 en dirección x y 4 pozos en dirección y con 7 m de espaciado y 207 m de profundidad, con un total de 3318 m de longitud. Las características del terreno requerido son de 21 m de longitud por 21 m de ancho, para un área de terreno de 441 m².

Se ha recomendado realizar un estudio más detallado de las características de los suelos alrededor del edificio con la finalidad de obtener datos más fiables. En el presente estudio se ha considerado el conglomerado como tipo de suelo.

Las emisiones generadas por el sistema geotérmico se deben principalmente a la energía requerida para el funcionamiento de los equipos, por lo que mejoras en el uso de la energía mejorarán el desempeño energético del sistema geotérmico. Se ha construido la curva de reducción de emisiones de CO₂ en la fase de uso del sistema geotérmico como se muestra en la Fig. 11.21, donde se observa que se alcanzan reducciones de emisiones del 71 % respecto al sistema con calderas de gasoil.

El sistema de calefacción con caldera de gasoil produce daños principalmente sobre la reservas de recursos abióticos y sobre la salud humana, ocasionando 89 % y 95 % de daño adicional comparado con el sistema geotérmico, como consecuencia del uso de acero y el hierro para el montaje del sistema.

Con la implementación de energías renovables en los tres escenarios estudiados, obtiene en la fase de uso una reducción de emisiones de dióxido de carbono al medioambiente de

aproximadas el 72 %, como se aprecia en la curva de reducciones de CO₂, Fig. 11.21.

El sistema de iluminación con paneles fotovoltaicos alcanza reducciones de CO₂ de aproximadamente un 87% en comparación con la alimentación con electricidad de la red; el sistema de ventilación con muro Trombe alcanza reducciones de CO₂ del 100 % en comparación con el sistema de calefacción con caldera de gasoil; y el sistema de calefacción geotérmico alcanza reducciones de CO₂ de aproximadamente un 71 % en comparación con el sistema de calefacción con caldera de gasoil.

El estudio realizado puede ser considerado una contribución significativa cara a la consecución de los objetivos de Europa 20-20-20, en la línea de alcanzar edificios de consumo de energía casi nulo.

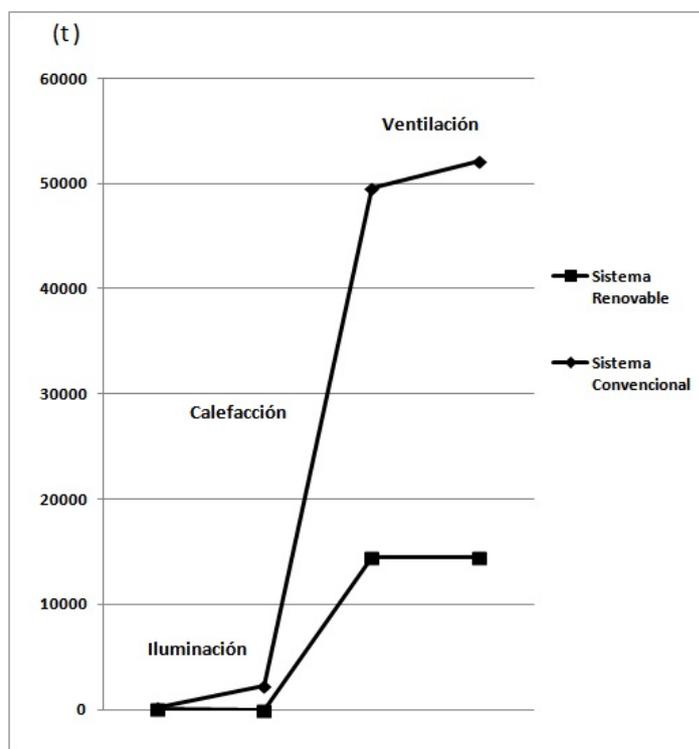


Figura 11.21: Reducción de emisiones de CO₂ en la fase de uso de los sistemas de energías renovables

11.8. Perspectivas y trabajos futuros

Esta Tesis ha abierto el camino para evaluar el impacto global real de sistemas de energías renovables aplicados a edificios de consumo de energía próxima a cero, estableciendo las directrices básicas de una estrategia nacional de sostenibilidad en la edificación.

A continuación se detallan las principales líneas de investigación que se abren con la finalización de esta Tesis.

(i) Estudio, mejoras y elección de tecnologías de energías renovables y sistemas pasivos a través de la metodología del Análisis de Ciclo de Vida.

(ii) Estudio del coste real de las tecnologías de la energía tanto convencionales como renovables, sumando el coste requerido para atender los daños ocasionados en su ciclo de vida.

(iii) Establecimiento de políticas de responsabilidad social y corporativas, siguiendo la filosofía de *el que contamina, paga*, por medio del Análisis de Ciclo de Vida de productos y tecnologías en general, para trasladar a cada ente generador de los impactos el coste de reparación de los daños ocasionados: el fabricante en el proceso de fabricación del equipo, el consumidor en el proceso de uso del equipo y el Municipio por su responsabilidad en el proceso de disposición final del equipo.

(iv) Políticas económicas dirigidas a conocer cuánto se debe invertir en cada categoría de daño, convirtiéndose en un valioso aporte para la gestión de las oficinas medioambientales y de salud pública, debido a que la finalidad de la identificación de los impactos es el establecimiento de medidas de mitigación que pueden corregirlo ambientalmente.

(v) I + D en el área de sistemas pasivos, específicamente el estudio del muro Trombe, que permitan su reconomiento científico como una fuente más de energía renovable, y fomente su inclusión en los *softwares* de evaluación de impactos ambientales, como el SimaPro, que actualmente no lo incluye.

(vi) Estudio de tecnologías de energía renovables y otras energías no convencionales a pequeña escala que permitan su implementación en viviendas y pequeñas y medianas empresas necesitadas hoy más que nunca, de soluciones concretas que posibiliten liberación del uso de combustibles fósiles con la carga económica, social y medioambiental que generan.

(vii) Estudios comparativos del desempeño energético y los impactos ambientales usando luminarias de bajo consumo, respecto de las luminarias usadas actualmente, descritas en el Capítulo 4.

(viii) Estudios de reducción de impactos ambientales proporcionando el 100 % de la electricidad con sistemas renovables, por ejemplo, al sistema estudiado con integración fotovoltaica añadir electricidad con paneles solares fotovoltaicos.

(ix) Estudios de impactos ambientales comparativos de los sistemas de ventilación y

calefacción analizados incluyendo la fase de montaje. Para ello se aportan las características de los sistemas actualmente usados y los sistemas mejorados usando energías renovables.

Existen otras bases para estudiar el desempeño energético y ambiental comparativo de los sistemas de ventilación:

- Tomar como referencia la vida útil del sistema con muro Trombe, esto es, 50 años.
- Establecer 8 horas/día como periodo de operación de todos los sistemas. Este escenario requiere incorporar apoyo eléctrico para los sistemas solares: con ventilador solar, con colector solar y con muro Trombe.

(x) Estudiar los impactos ambientales comparativos del sistema con caldera de gasóleo y el sistema usado actualmente de calefacción de distrito basado en biomasa, instalación que entró en operación en 2015.

Parte IV

CONCLUSIONES

En la cuarta parte del manual se presenta, en el Capítulo 12 las conclusiones de la Tesis.

CAPÍTULO 12

CONCLUSIONES

RESUMEN: En el presente Capítulo se presentan las conclusiones de la Tesis.

La presente Memoria constituye una aportación novedosa al estado de conocimiento sobre edificios de consumo de energía próxima a cero (NZEB), toda vez que aborda la problemática de la adaptación de un edificio ya construido a los objetivos de rendimiento energético de la Unión Europea para edificios de propiedad pública a partir de 2018.

Del estudio realizado, a partir del diseño y posterior análisis de las características y ventajas técnicas de diversos sistemas de energías renovables integrables en el edificio Aulario de la Universidad de Valladolid, se han alcanzado las siguientes conclusiones:

1. El sistema actual de iluminación conectado a la red eléctrica supone una emisión aproximada de CO_2eq de 154 t CO_2 y un impacto ambiental próximo a 168,468.20 ELUs para un tiempo de vida útil estimado en 30 años. El uso de energía solar fotovoltaica como alternativa propuesta al 5.77 % del consumo eléctrico actual, mediante integración de paneles en fachada, supondría la reducción del 100 % de las emisiones de CO_2eq en el mismo periodo de uso, con un balance de impacto ambiental favorable de 35,405.26 ELU. Este resultado aconseja cambiar el sistema actual al sistema renovable.
2. Dado que el edificio se construyó con normativa anterior al RITE, ha sido preciso diseñar un sistema de ventilación mecánica con el que comparar el resto de 'soluciones verdes'. Dicho sistema convencional, para un tiempo de vida de 25 años, consumiría 20 millones de kWh de energía primaria, con un daño repercutido al medio ambiente de aproximadamente un millón y medio de ELUs, que resultaría inadmisiblemente cara a los objetivos europeos.
3. La alternativa consistente en reemplazar el sistema de ventilación mecánica por uno basado en ventiladores solares (solar attic fans) no conllevaría una reducción significativa del consumo de energía primaria y los daños al medio ambiente serían prácticamente iguales al caso anterior, por lo que esta opción debería ser descartada.
4. La sustitución del sistema de ventilación mecánica por un sistema de ventilación alimentado con colectores solares de aire, diseñado al efecto, cumple per se los objetivos

- Europeos, al ser totalmente autosuficiente para la generación de la energía consumida. Adicionalmente, durante su fase de uso y disposición final, el balance de impacto ambiental es favorable, por valor de más de 612,000 ELUs. Este resultado lo convierte en una opción ecológicamente muy deseable frente a las dos anteriores.
5. El uso de un sistema bioclimático de tipo muro Trombe, con un diseño ad hoc, comporta frente a la opción de ventilación mecánica no sólo ahorro energético (por ser un también sistema autosuficiente), sino también un balance favorable en términos de impacto ambiental, de aproximadamente 503,000 ELUs para la opción de 'hormigón verde'. El hecho de que la vida útil real de este sistema pasivo sea de 50 años (frente a 25 años para el resto de sistemas), lo convierte en la opción preferente desde un punto de vista medioambiental.
 6. El sistema de calefacción del edificio basado en calderas de gasoil supone un consumo equivalente superior a 16 millones de kWh de energía primaria y la emisión de casi 3,800 tCO₂, con daños al medio ambiente por valor de 2,800,000 ELUs. Su sustitución por un sistema con bomba de calor geotérmica, diseñado para ser adaptado a la instalación actual, conlleva un consumo energético (para las bombas de calor) de 2,845,000 kWh (casi la sexta parte del original) y un ahorro de 1,420,000 kWh de energía primaria por el calor aportado de forma renovable. El daño producido al medio ambiente sería de 284,000 ELU (una décima parte de la del sistema de referencia).
 7. Con la implementación de las tres medidas correctivas sugeridas para el edificio Aulario (sistema fotovoltaico para iluminación, muro Trombe para ventilación y bomba de calor geotérmica para calefacción) resulta factible no sólo reducir el consumo de energía a un valor próximo a cero, sino que también se alcanzaría una reducción de emisiones de CO₂ del 72 %, satisfaciendo así los objetivos ambientales europeos.

CONCLUSIONS

This Ph.D. Thesis is an original contribution to the state-of-art on nearly zero-energy buildings (NZEB), provided that it addresses the problems posed by the adaptation of an existing building to the energy efficiency targets established by the European Union for public buildings by 2018.

From the conducted study, based on the design and subsequent analysis of the features and technical advantages of various renewable energy systems that could be integrated in the Lecture Hall building at the University of Valladolid, the following conclusions have been drawn:

1. The current illumination system connected to the electrical network involves CO₂eq emissions of ca. 154 tCO₂eq and an environmental impact close on 168,468 ELUs, for an estimated 30-year lifetime. The use of a photovoltaic (solar electric) alternative system to supply 5.77 % of the current electricity consumption, through the integration of panels on the façade, would imply a 100 % reduction of the CO₂eq emissions in the same period of use, with a favorable balance of in terms of environmental impact of 35,405 ELUs. This result makes it advisable to replace the current system with the renewable one.
2. Since the building was constructed according to pre-RITE regulations, it has been necessary to design a mechanical ventilation system to have reference against which to compare the rest of 'green solutions'. This conventional ventilation system would consume in its 25 -year lifetime 20 million kWh of primary energy, with an estimated damage to the environment of about 1.5 million ELUs, which would be unacceptable in terms of the EU objectives.
3. The alternative consisting in the replacement of the mechanical ventilation system with a solar attic fans-based one would not lead to a significant reduction of primary energy consumption and the environmental damage would be virtually identical to the previous case alternative, so this option should be ruled out.
4. The replacement of mechanical ventilation system with a ventilation system powered by solar air collectors, designed ad-hoc, would meet the UE 2020 goals, as it would be entirely self-sufficient for the generation of the energy consumed. In addition, during its use phase and its final disposal, the environmental impact balance would be favorable, with a surplus of over 612,000 ELUs. This result makes it an ecologically desirable alternative as compared to the two previous ones.
5. Using a Trombe wall-type bioclimatic system, also with an ad hoc design, would involve (vs. the mechanical ventilation option) not only a significant energy saving (as it is also

- an energy self-sufficient system), but also a favorable balance in terms of environmental impact, with a surplus about 503,000 ELUs for the 'green concrete' option. The fact that the real lifetime of this passive system would be 50 years (compared with 25 years for the other systems), makes it the preferred option from an environmental perspective.
6. The presently used building heating system, based on diesel boilers, has an equivalent consumption exceeding 16 million kWh of primary energy and implies the emission of about 3,800 tCO₂eq, with an environmental damage amounting to 2,800,000 ELUs. Its replacement with a geothermal heat pump system, designed to maintain compatibility with current installation, involves an energy consumption (for the heat pumps) of 2,845,000 kWh (almost one sixth of the original one) and the saving of 1,420,000 kWh of primary energy, as the heat is supplied in a renewable form. The damage to the environment is estimated in 284,000 ELU (one tenth of that of the reference system).
 7. With the implementation of the three suggested remedial actions for the Lecture Hall building (viz., photovoltaic systems for illumination, Trombe wall-based ventilation and a geothermal heat pump for heating) it would be feasible not only reduce energy consumption to a value close to zero, but to attain a 72 % reduction in CO₂ emissions, thus meeting European environmental objectives.

Bibliografía

- AENOR. Une-en-iso 14040, gestión ambiental, análisis de ciclo de vida, principios y marco de referencia. 2006. Madrid, España.
- AENOR. Une-cr 1752in, ventilación de edificios, criterios de diseño para el ambiente interior. 2008a.
- AENOR. Une13779. ventilación de los edificios no residenciales, requisitos de prestaciones de sistemas de ventilación y acondicionamiento de recintos. 2008b.
- ALSEMA, E. Energy pay-back time and co2 emissions of pv systems. *Practical Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications*, vol. 2, páginas 869–886, 2003.
- ANARPLA. Residuos plásticos en españa y reciclaje mecánico, asociación nacional de reciclaje de plástico. Disponible en <http://www.anarpla.com/#!articulo-2/c1s55>.
- ARPAL. Reciclado de productos de aluminio. asociación para el reciclado de productos de aluminio. Disponible en <http://aluminio.org/>.
- ASHRAE. Ventilation for acceptable indoor air quality. Disponible en www.ashrae.org.
- ATECYR. Asociación técnica española de climatización y refrigeración, energías renovables, manual de geotermia. 2008. España.
- BAXIROCA. Catálogo general sistemas de calefacción, salvador escoda s.a. 2011a. Disponible en www.salvadorescoda.com (último acceso, Abril, 2014).
- BAXIROCA. Combustibles líquidos. 2011b. Disponible en www.salvadorescoda.com (último acceso, Abril, 2014).
- BENÍTEZ, S. *Estudio de las Aplicaciones de la Energía Geotérmica en España, Caso práctico para climatización de una vivienda unifamiliar*. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2011.
- BIOTRAN. Gestión de residuos. Disponible en <http://www.biotran.com/>.
- BIR. Metales no ferrosos. bureau of international recycling. 2016. Disponible en <http://www.bir.org/industry-es-es/non-ferrous-metals-es-es/> (último acceso, 27 de abril de 2016).
- BJÖRN, B., MONIKA, H. y MARIA, W. Lce analysis of buildings. taking the step towards net zero energy buildings. *Energy and Buildings*, vol. 62, páginas 381–391, 2013.

- BLANCO, L. F. Proyecto reformado aulario campus del esgueva. 1992.
- BLÁZQUEZ, A. *Estudio energético del edificio Aulario del Campus de Valladolid mediante simulación dinámica con EnergyPlus*. Proyecto fin de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica, 2011.
- BLOMBERG, T., CLAESSON, J., ESKILSON, P., ÖM, G. H. y SANNER, G. Earth energy designer 3.0, software within building physics and ground heat storage. 2008.
- BOE. Ley 16/2013, de 29 de octubre, por la que se establecen determinadas medidas en materia de fiscalidad medioambiental y se adoptan otras medidas tributarias y financieras. 2013.
- BOURRELLE, J. S., INGER, A. y ARILD, G. Energy payback: An attributional and environmentally focused approach to energy balance in net zero energy buildings. *Energy and Buildings*, vol. 65, páginas 84–92, 2013.
- BRIGASÀ, A., MARTINS, A., BOAVENTURA, C., LANZINHA, J. y PAIVA, A. Energy performance of trombe walls: Adaptation of iso 13790:2008(e) to the portuguese reality. *Energy and Buildings*, vol. 74, páginas 111–119, 2014.
- CAÑADA, R. J. *Manual de Energía Solar Térmica. Diseño y Cálculo de Instalaciones*. Editorial Universidad Polit'cnica de Valencia, 2008.
- CABEZA, L. F., RINCÓN, L., NO, V. V., PÉREZ, G. y CASTELL, A. Life cycle assessment (lca) and life cycle energy analysis (lcea) of building and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable energy Reviews*, vol. 29, páginas 394–416, 2014.
- CALEFFI, S. Componentes para instalaciones con bomba de calor. 2011.
- CALPEDA. Catálogo técnico. 2007. Disponible en http://www.calpedaiberica.com/web/files/catalogo/2007/108_129_baja.pdf (último acceso, Abril, 2014).
- CARRIER, I. *Manual de Aire Acondicionado, Handbook of air conditioning system design*. Marcombo S.A, 2009.
- CHACÓN, J. Historia ampliada y comentada del análisis de ciclo de vida (acv) con una bibliografía selecta. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, vol. 72, páginas 37–70, 2008.
- CHUA, K., CHOU, S. y YANG, W. Advances in heat pump systems: A review. *Applied Energy*, vol. 87, páginas 3611–3624, 2010.
- CIATESA. Grupo de investigación y modelado de sistemas térmicos, adscrito al instituto de valencia. Manual Geo-Ciatesa, 1998.
- CIATESA. Ponencia presentada en el i congreso de energía geotérmica, diseño de intercambiadores de calor enterrados. modelo de cálculo y análisis de los parámetros de mayor sensibilidad. 2008.
- CLIMATEMASTER. Geothermal applications. 2006. Disponible en <http://www.climatemaster.com> (último acceso, 17 de Julio de 2013).

- CONTRERAS, R. R. *Refrigerantes y su impacto ambiental. Facultad de Ciencias. Departamento de Química. Universidad de los Andes*. Tesis Doctoral, 2013.
- COUNCIL, N. R. *Wood in Our Future: The Role of Life-Cycle Analysis: Proceedings of a symposium*. National Academies Press, 1997. ISBN 0-309-52093-2.
- CTE. Real decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el código técnico de la edificación. documento básico he ahorro de energía. 2006a.
- CTE. Real decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el código técnico de la edificación. documento básico hs salubridad. 2006b.
- CYL, J. D. C. Y. L. Plan intergral de residuos de castilla y león. 2010.
- DAUNIS, S. Tubería, racordaje y complementos. 2014. Disponible en <http://www.daunis.es/> (último acceso, Abril, 2014).
- DENG, S., R.Z., W. y Y.J., D. How to evaluate performance of net zero energy building - a literature research. *Energy*, vol. 71, páginas 1–16, 2014.
- DIMPLEX. Manual de dimensionamiento, calentar y refrigerar con bomba de calor, glen dimplex deutschland gmbh. 2008. Versión 11.
- DINAK, D. Catálogo técnico. 2014. Disponible en <http://www.dinakchimeneas.com/producto/chimeneas-doble-pared/dinak-dp.html> (último acceso, Abril, 2014).
- ECI. A copper mine at our fingertips, europe recycles its copper to meet society's needs. european copper institute. Disponible en <http://www.copperalliance.eu/>.
- EREN. Ente regional de la energía, inventario energético edificio del aulario. 2007.
- ESBE. Válvulas y actuadores, catálogo técnico. 2009-2010. Disponible en http://www.salvadorescoda.com/tecnico/CO/Tarifa_Catalogo_ESBE_09-10.pdf (último acceso, Abril, 2014).
- EWASTE, C. S. Ewaste, pionera en descontaminar los gases refrigerantes. Disponible en <http://www.canarias7.es/articulo.cfm?id=3322085>.
- FERROLI. Radiador de aluminio europa c. 2014. Disponible en www.ferroli.es (último acceso, Abril, 2014).
- FLAMENT, M. C. *Viabilidad técnica y económica de una instalación geotérmica para la climatización de una Ingeniería Agroforestal. Escuela Técnica Superior de ingeniería Agraria. Proyecto fin de carrera*. Tesis Doctoral, 2010.
- FULLANA, P. y PUIG, R. *Análisis de ciclo de vida*. Editorial Rubes, 1997.
- GAN, G. A parametric study of trombe wall for passive cooling of buildings. *Energy Build.*, vol. 27, páginas 37–43, 1998.
- GAS-SERVEI, S. Eurorefrigerants. 2011.
- GILES, R., EVETT, J. y LIU, C. *Mecánica de Fluidos e Hidráulica. (3a ed.)*. McGraw-Hill/Interamericana, 1996.

- GILLET, A. Heat pums and renewable energies, world renewable energy network, wrec. 1996. Belgium.
- GOEDKOOOP, M. y OELE, M. *Tutorial SimaPro 6*. PRé Consultants, 2004.
- GONZÁLEZ, J. D. *Estudio de Impacto Ambiental para el Centro de Regeneración de Rrefrigerantes de la Universidad Pontificia Bolivariana*. Tesis Doctoral, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 2012. Trabajo final de Grado.
- GONZÁLEZ, M. Energía geotermal. 2013a. Disponible en http://193.146.36.56/catedra/catedra/apuntes/PDFs/otras_energias/GEOTERMICA/GEOTERMICA.pdf (último acceso, 22 Mayo de 2013).
- GONZÁLEZ, S. L. Consumo eléctrico aulario campus del esgueva, universidad de valladolid. 2013b.
- GRAMMER, S. S. Twinsolar slk topsolar, manual técnico. Disponible en www.grammer-solar.es.
- GRUNDFOS. Catálogo grundfos, bombas circuladoras. 2011. Disponible en www.grundfos.com (último acceso, Abril, 2014).
- IBAIONDO, I. S. Catálogo técnico. 2012. Disponible en <http://www.ibaiondo.com> (último acceso, Abril, 2014).
- IDAE. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, manual de geotermia. 2008. Madrid, España.
- IDAE. Guía técnica, condiciones climáticas exteriores de proyecto. 2010.
- IDAE. área tecnológica geotermia, mapa tecnológico: Calor y frío renovables. observatorio tecnológico de la energía. 2012. Madrid, España.
- IDAE. Prestaciones medias estacionales de las bombas de calor para producción de calor en edificios, departamento hidroeléctrico, energías del mar y geotermia, departamento solar. 2013.
- IDAE. Factores de emisiones de CO_2 y coeficientes de paso de energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector edificios en españa. Disponible en http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/propuestas/Documents/2014_03_03_Factores_de_emision_CO2_y_Factores_de_paso_Efinal_Eprimaria_V.pdf.
- IEA. Mix energético español. 2014.
- IGME, I. G. Y. M. D. E. N. Mapa geológico de españa. valladolid. 2014. Disponible en <http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/magna50.asp?hoja=384&bis=> (último acceso, Mayo, 2014).
- IHOBE. Todo lo que hay que saber sobre la directiva eup/erp, guía práctica sobre los requisitos legales para el ecodiseño de productos relacionados con la energía. 2011. Disponible en <http://www.ihobe.net/Paginas/Ficha.aspx?IdMenu=eb81d444-6e53-4426-8b4d-59849e5641b3> (último acceso, 15 de Julio de 2013).

- IMMOSOLAR. Catálogo técnico is sw bomba de calor tierra agua. 2011. Disponible en www.immosolar.com (último acceso, 28 de Julio de 2013).
- IPARFRIO. Tasa uso de refrigerantes en españa. Disponible en <http://www.iparfrio.com/index.php?/noticias/noticia07.html>.
- ISO13790. Iso 13790, energy performance of buildings, calculation of energy use for space heating and cooling. 2008.
- ISO14040. Iso 14040, environmental management life cycle assessment principles and framework. 2006. Switzerland.
- ISO14044. Iso 14044, environmental management life cycle assessment. requirements and guidelines. 2006. Switzerland.
- ISO4427. Iso 4427, dimensiones para tuberías pe 100. 2007.
- JIE, J., HUA, Y., GANG, P., BIN, J. y WEI, H. Study of pv trombe wall assisted with dc fan. *Build. Environ.*, vol. 42, páginas 3529–3539, 2008.
- JUTGLAR, L., MIRANDA, A. y VILLARRUBIA, M. *Manual de Calefacción, Ferroli. (1a ed.)*. Marcombo ediciones técnicas, 2011.
- KARIMPOUR, M., BELUSKO, M., XING, K. y BRUNO, F. Minimising the life cycle energy of buildings: Review and analysis. *Building and Environment*, vol. 73, páginas 106–114, 2014.
- KOFOWOROLA, O. y GHEEWALA, S. Environmental life cycle assessment of a commercial office building in thailand. *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 6, páginas 498–511, 2008.
- KUSADA, T. y ACHENBACH, P. Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the united states. *ASHRAE Transactions*, vol. 71, páginas 61–75, 1965.
- LEENA, T. *Life cycle assessment of light sources Case studies and review of the analyses*. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Aalto University, 2013. DOCTORAL DISSERTATIONS.
- LINARES, G. *Plan de Viabilidad de Empresa Ejecutora de estudios, Proyectos y Obra de Eficiencia Energética (Geotermia)*. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Ingeniería Industrial, Madrid, España, 2010.
- LLOPIS, T. y RODRIGO, A. Guía de la energía geotérmica. 2008.
- LÓPEZ, F., MARTÍN, M., ALGUACIL, F., RINCÓN, J. M., CENTENOC, T. y ROMEROB, M. Thermolysis of fibreglass polyester composite and reutilisation of the glass fibre residue to obtain a glass ceramic material. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 93, páginas 104–112, 2012.
- LUPATECH, J. Catálogo general / 3a. 2013. Disponible en <http://www.jefferson.com.ar/repositorio/pdfs-espanol/Cat%C3%A1logo%20General.pdf> (último acceso, Abril, 2014).
- MARSZAL, A. E. A. Zero energy building - a review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, páginas 971–979, 2011.

- MERINO, E. G. La bomba de calor ¿magia o termodinámica? *Suplemento del periódico Instalnoticias*, vol. 87, páginas 69–70, 1999.
- MINFOMENTO. Indicadores ambientales. ministerio de fomento. 2009. Disponible en <http://www.magrama.gob.es/> (último acceso, Junio de 2009).
- MINFOMENTO. Residuos plástico urbanos. ficha técnica. Disponible en <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/CA000107-6ADB-47C6-9274-0D046AEA8538/119972/RESIDUOSPLASTICOSURBANOS1.pdf>.
- MIRANDA, A. y JUTGLAR, L. *Técnicas de Calefacción*. Marcombo, Barcelona, España, 2009.
- MONROY, M. M. Manual del aire. 2006.
- N.C., M. y J.M., P. Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules. *Energy Policy*, vol. 38, páginas 7041–7047, 2010.
- NCEES. Fundamentals of engineering supplied, reference handbook, (7th ed.), national council of examiners for engineering and surveying. 2005. United States of America.
- ONU. Protocolo de kioto. 1998.
- ONU. Convenio marco sobre cambio climático. Disponible en <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/109s.pdf>.
- PATXI, H. y PAUL, K. From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (lc-zeb). *Energy and Buildings*, vol. 42, páginas 815–821, 2010.
- POMAR, J. F. Diseño de un sistema geotérmico vertical para cubrir la demanda energética de un edificio. 2012.
- PORTUGUESE, M. Laboratório de engenharia civil, serviço de edificios e pontes, divisão de conforto da habitação, proc. 35/1/3214, ventilação natural dos edificios. 1967.
- QUINKERTZ, R., ROMBACH, G. y LIEBIG, D. A scenario to optimise the energy demand of aluminium production depending on the recycling quota. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 33, páginas 217–234, 2001.
- RABAH, M. y EI-SAYED, A. Recovery of zinc and some of its valuable salts from secondary resources and wastes. *Hydrometallurgy*, vol. 37, páginas 23–32, 1995.
- RAMESH, T., PRAKASH, R. y SHUKLA, K. Life cycle energy analysis of buildings: an overview. *Energy and Buildings*, vol. 10, páginas 1592–600, 2010.
- REY, J. y VELASCO, E. *La bomba de calor. Bombas de calor y energías renovables en edificios*. Thomson Editores, 2005.
- REY, J. y VELASCO, E. *Calidad de Ambientes Interiores*. Thomson Editores Spain, Madrid, España, 2007.
- RITE. Disposiciones generales, 15820, real decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el reglamento de instalaciones térmicas en las edificios, ministerio de la presidencia, boe núm. 207. 2007.

- RITE. Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios, versión consolidada. 2013.
- ROEZNİK, N. L. y HERNÁNDEZ, A. A. Análisis de ciclo de vida. ciudades para un futuro más sostenible. 2005. Disponible en <http://habitat.aq.upm.es/temas/a-analisis-ciclo-vida.html> (último acceso, 12 de Noviembre, 2015).
- RUIZ, A., SALMERÓN, S., GONZÁLEZ, R. y ÁLVAREZ, S. *A calculation model for Trombe walls and its use as a passive cooling*, in: *Proceedings of International Conference Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment*. Santorini, Greece, 2005.
- SAADATIAN, O., SOPIAN, K., LIM, C., ASIM, N. y SULAIMAN, M. Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, páginas 6340–6351, 2012.
- SACI, S. Catálogo general. 2013. Disponible en <http://www.bombas-saci.com/docs.cfm/esp/catalogos.htm> (último acceso, 5 de Junio de 2013).
- SAUTER. Sauter, creating sustainable environments. 2010. Disponible en www.sauteriberica.com (último acceso, Abril, 2014).
- SCHEER, H. *Autonomía Energética. La situación económica, social y tecnológica para la energía renovable*. Fundación Terra, 2009.
- SEGURA, P. S. N. *La Sostenibilidad Arquitectónica Determinante en la Eficiencia Energética. ACV.* Tesis Doctoral, Universidad de Jaén, Jaén, España, 2013. Trabajo especial de grado.
- SERRES, N., BRAYMAND, S. y COISEFEUGEAS, F. Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing lifecycle assessment. *Journal of Building Engineering*, vol. 5, páginas 24–33, 2016.
- SETAC. society of environmental toxicology and chemistry. 2015. Disponible en <http://www.setac.org/> (último acceso, 12 de Noviembre, 2015).
- SODHA, M., BANSAL, N., BANSAL, P. y MALIK, A. K. M. *Solar Passive Building Science & Design*. Pergamon Press, Oxford Ox3 0Bw, England, 1986.
- SOLARVENTI. Solar venti sv30ax, fabriksvej 8, dk 8881 thorse. Disponible en <http://www.solarventi.es/>.
- TESTGUT. Enco-tekmar, funcionamiento y montaje. 2002. Disponible en <http://tekmarcontrols.com/> (último acceso, Abril, 2014).
- TIRADO, S. La pobreza energética: un grave problema para millones de personas en España. 2015. Disponible en http://www.huffingtonpost.es/sergio-tirado/pobreza-energetica-en_b_6334940.html (último acceso, 31 de agosto de 2016).
- TORRES, D. L. F. C. *Estudio energético del edificio Aulario de la Universidad de Valladolid*. Proyecto fin de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica, 2009.
- TRNSYS. a transient system simulation program, volume 4, mathematical reference. 1967.

- TURK, J., COTIČ, Z., MLADENVIČ, A. y ŠAJNA, A. Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of lca. *Waste Management*, vol. xxx, páginas xxx–xxx, 2015.
- UE. The directive 2010/31/eu of the european parliament and of the council of 19 may 2010 on the energy performance of building. Parlamento Europeo, 2010.
- UE. Diario oficial de la union europea, directiva 2012/27/ue del parlamento europeo y del consejo de 25 de octubre de 2012 relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las directivas 2009/125/ce y 2010/30/ue, y por la que se derogan las directivas 2004/8/ce y 2006/32/ce. 2012.
- UNESID. Unión de empresas siderúrgicas. Disponible en <http://www.compromisorse.com/acciones-rse/2012/11/14/espaa-esta-a-la-cabeza-de-la-ue-en-el-reciclaje-de-acero/>.
- UNESID. Reciclaje del acero en la industria siderúrgica española. unión de empresas siderúrgicas, unesid. 2013. Disponible en <http://www.unesid.org/iris2013/IRISINFORMERECICLAJEACERO2013.pdf> (último acceso, Octubre de 2013).
- UVA. Memoria de actuaciones para la obra de integración de parasoles sobre las ventanas del aulario esgueva, oficina de calidad ambiental y sostenibilidad, universidad de valladolid. 2014.
- VISA, I., M., M. D., COMSIT, M. y DUTA, A. Improving the renewable energy mix in a building towards the net zero energy status. *Energy and Building*, 2013.
- VOSSBERG, C., MASON-JONES, K. y COHEN, B. An energetic life cycle assessment of c&d waste and container glassrecycling in cape town, south africa. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 88, páginas 39–49, 2014.
- VSORG. Materiales y residuos. vida sostenible, org. Disponible en https://www.vidasostenible.org/observatorio/f2_final.asp?idinforme=573.
- WORDPRESS. Poliester reciclado mecánicamente moda sostenible y responsable. 2014. Disponible en <http://modasostenible.wordpress.com/tejidos-sostenibles/poliester-reciclado-mecanicamente/> (último acceso, noviembre de 2014).
- YELLISHETTY M., E. Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: sustainability issues, problems and prospects. *Environmental Science & Policy*, vol. 14, páginas 650–663, 2011.

