

Yolanda Bravo Rodríguez

Análisis y perspectivas de  
desarrollo de un sistema avanzado  
de generación energética de disco  
Stirling

Departamento  
Ingeniería Mecánica

Director/es

Monné Bailo, Carlos  
Moreno Gómez, Francisco

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>



**Universidad**  
Zaragoza

Tesis Doctoral

**ANÁLISIS Y PERSPECTIVAS DE DESARROLLO DE  
UN SISTEMA AVANZADO DE GENERACIÓN  
ENERGÉTICA DE DISCO STIRLING**

Autor

**Yolanda Bravo Rodríguez**

Director/es

Monné Bailo, Carlos  
Moreno Gómez, Francisco

**UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA**

Ingeniería Mecánica

2014





Departamento de  
Ingeniería Mecánica  
Universidad Zaragoza

# **Análisis y perspectivas de desarrollo de un sistema avanzado de generación energética de disco Stirling**

TESIS DOCTORAL

Yolanda Bravo Rodríguez



# **Análisis y perspectivas de desarrollo de un sistema avanzado de generación energética de disco Stirling**

Yolanda Bravo Rodríguez  
Ingeniero Industrial

Memoria presentada en la Universidad de Zaragoza, para la obtención del grado de Doctor, en el **Programa de Doctorado de Tecnologías de Climatización y Eficiencia Energética en Edificios** del Departamento de Ingeniería Mecánica.

Zaragoza, Abril de 2014



Dr. Carlos Monné Bailo y Dr. Francisco Moreno Gómez, profesores titulares del Área de Máquinas y Motores Térmicos del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza,

## CERTIFICAN:

Que la memoria titulada: **Análisis y perspectivas de desarrollo de un sistema avanzado de generación energética de disco Stirling**, presentada por la Ingeniero Industrial D<sup>a</sup>. Yolanda Bravo Rodríguez para optar al grado de Doctor, ha sido realizada bajo su dirección.

Zaragoza, a 1 de abril de 2014.

Fdo. Carlos Monné y Francisco Moreno



*A mis padres*



## AGRADECIMIENTOS

---

En primer lugar, quiero agradecer el apoyo recibido por mis directores, Carlos Monné y Francisco Moreno para la realización de esta tesis. Ambos me han introducido en un equipo muy valioso tanto profesional como personalmente. Debo mencionar, por tanto, específicamente a José Luis Quintana, Carlos Ara, Sergio Alonso y Nuria Bernal, ya que todos ellos han contribuido de una u otra manera en este trabajo.

En especial a Carlos Monné por su dedicación y los ánimos recibidos durante este largo camino. Realmente él ha sido mi guía en esta ardua tarea. Gracias por recibirme siempre con una sonrisa, a pesar de mi ajetreada vida. También por ayudarme en momentos muy concretos donde ha tirado de mí para la consecución de esta tesis.

A Francisco Moreno quiero agradecer, además de su apoyo, parte de mi pasión actual por los motores, donde él es un verdadero experto. Espero de corazón que pueda dedicarse a este campo durante mucho más tiempo, para contar con sus aportaciones.

También quiero agradecer a Luis Serra y Mónica Carvalho sus aportaciones. A Luis por haberme introducido en el apasionante mundo del Análisis de Ciclo de Vida con sus clases. A Mónica por su inestimable colaboración, contribuyendo tanto en la realización como en la disseminación de los resultados. A ambos también gracias por su increíble calidad humana.

Quiero expresar también un agradecimiento general a muchos miembros del Área de Máquinas y Motores Térmicos del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza, con los que he tratado. Gracias por vuestra ayuda.

Más que un agradecimiento, quiero reconocer la labor de mi marido, Rafa. Sin ti no hubiera sido posible el trabajo y la dedicación personal que se esconde detrás de esta memoria. Gracias por aguantar mis horas delante del ordenador, por acompañarme en este camino, por gestionar tantos asuntos, y en especial por haber ejercido de madre suplente con nuestras dos hijas cuando ha sido necesario. Eres parte de esta tesis.

A mis hijas, Jara y Violeta, quiero mandarles un mensaje de superación. Si yo he sido capaz de realizar esta tesis con dos bebés, vosotras seréis capaces de mucho más. Nunca os olvidaré jugando con el ordenador desde el que escribo estas líneas y enredando con mis “letras”, como vosotras las llamáis. Os quiero.

Y por último quiero resaltar mi dedicación de esta tesis a mis padres, por haberme provisto de educación en todos los aspectos. Por haberme proporcionado el afán de superación y dedicación que me ha permitido concluir este trabajo. Espero que os sintáis orgullosos de mí. Yo me siento muy orgullosa de vosotros.



## **PUBLICACIONES**

---

### **Artículos en revistas**

#### **Revistas indexadas JCR**

- Environmental evaluation of dish-Stirling technology for power generation  
Yolanda Bravo, Mónica Carvalho, Luis M. Serra, Carlos Monné, Sergio Alonso, Francisco Moreno, Mariano Muñoz  
Solar Energy, Vol. 86, Issue 9, pág. 2811-2825 Septiembre 2012  
ISSN: 0038-092X
  
- Hybridization of Solar Dish-Stirling Technology: Analysis and Design  
Yolanda Bravo, Carlos Monné, Nuria Bernal, Mónica Carvalho, Francisco Moreno, Mariano Muñoz.  
Environmental Progress & Sustainable Energy. Early view: Article first published online: 13 JAN 2014 | DOI: 10.1002/ep.11929  
ISSN: 1944-7450

#### **Otras revistas indexadas**

- Developments for future implementation in Dish-Stirling technology  
Carlos Monné, Yolanda Bravo, Sergio Alonso, Francisco Moreno, Mariano Muñoz  
Strojarsstvo, Journal for Theory and Application in Mechanical Engineering, Vol. 55, N°1, Febrero 2013  
ISSN: 0562-1887
  
- Analysis of a Solar Dish-Stirling System with Hybridization and Thermal Storage  
Carlos Monné, Yolanda Bravo, Francisco Moreno, Mariano Muñoz  
International Journal of Energy and Environmental Engineering / in phase of production (DOI: 10.1007/s40095-014-0080-x)  
ISSN: 2008-9163 (print version)  
ISSN: 2251-6832 (electronic version)
  
- Beneficios de la hibridación CSP-Biogás  
Yolanda Bravo, Carlos Monné, Francisco Moreno  
Era Solar, número 173, año 2013  
ISSN 0212-4157

## **Comunicaciones en congresos**

- SDEWES 2011, 6TH Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems, 25-29 Septiembre 2011, Dubrovnik, Croacia
  - SDEWES11-0263: Developments for future implementation in Dish-Stirling technology  
Carlos Monné, Yolanda Bravo, Sergio Alonso, Francisco Moreno, Mariano Muñoz, Luis M. Serra
  - SDEWES11-0266: Dish-Stirling technology for power generation. Environmental evaluation  
Yolanda Bravo, Mónica Carvalho, Luis M. Serra, Carlos Monné, Sergio Alonso, Francisco Moreno, Mariano Muñoz
  
- SUNEK 2012, Sun New Energy conference, 4-6 Septiembre 2012, Sicilia, Italia.
  - Hybridization Applied to Solar Dish Stirling Technology: Analysis and Design  
Yolanda Bravo, Carlos Monné, Nuria Bernal, Mónica Carvalho, Francisco Moreno, Mariano Muñoz.
  
- International Congress on Energy, Environment, Engineering and Management, 17-19 Julio 2013, Lisboa, Portugal
  - Analysis of the Incorporation of Thermal Storage and/or Hybridization into a Thermosolar Power Generation System  
Carlos Monné, Yolanda Bravo, Francisco Moreno, Mariano Muñoz

## NOMENCLATURA

---

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
BUWAL	Swiss Ministry of the Environment (Ministerio suizo de Medio Ambiente)
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Acetileno
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Etileno
CdTe	Teluro de cadmio
CDTI	Centro de Desarrollo Tecnológico Industrial
CFC11	Triclorofluormetano
CML	Center of Environmental science Leiden (Centro de Ciencia Ambiental de Leiden)
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CSP	Concentrating Solar Power (energía solar de concentración)
DALY	Disability Adjusted Life Years (pérdida de años de vida por enfermedad)
DB	Diclorobenceno
DNI	Direct Normal Irradiation (irradiación directa normal)
DOE	United States Department Of Energy (departamento de energía de Estados Unidos)
DP	Disco Parabólico
EDIP	Environmental Design of Industrial Products (diseño ambiental de productos industriales)
EI 99	Método Eco-Indicador 99
EMPA	Swiss Federal Institute for Materials, Testing and Research, St. Gallen (Instituto Federal Suizo para materiales, pruebas e investigación)
EPBT	Energy Pay-Back Time (tiempo de amortización energética)
GaInP	Fosfuro de galio indio
GaAs	Arseniuro de galio
GER	Gross Energy Requirement (requisito de energía para fabricación)
GMT	Greenwich Mean Time (hora del meridiano de Greenwich)
GWP	Global Warming Potential (potencial de calentamiento global)
ICV	Inventario de Ciclo de Vida
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático)

ISO	International Organization for Standardization (Organización Internacional para la Estandarización)
LCA	Life Cycle Assessment (análisis de ciclo de vida)
LCI	Life Cycle Inventory (inventario de ciclo de vida)
NMVOG	Non-Methane Volatil Organic Compounds (compuestos orgánicos volátiles excepto el metano)
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrógeno
PAF	Potentially Affected Fraction (fracción potencialmente afectada)
PCM	Phase Change Material (material almacenamiento térmico)
PDF	Potentially Disappeared Fraction (fracción potencialmente desaparecida)
PRé	Product Ecology Consultants (Consultoría de Ecología del Producto)
PSA	Plataforma Solar de Almería
PO <sub>4</sub>	Fosfato
RD	Real Decreto
SBP	Schlaich Bergermann und Partner
SES	Stirling Energy Systems
SETAC	Society Environmental, Toxicology And Chemistry (Sociedad Química y Toxicológica Ambiental)
SPM	Suspended Particle Matter (partículas suspendidas)
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
SO <sub>x</sub>	Óxidos de azufre
η	Rendimiento



# Índice

JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS .....	17
1.1 Interés .....	17
1.2 Objetivo general.....	18
1.3 Objetivos concretos.....	19
1.4 Estructura de la tesis .....	19
INTRODUCCIÓN.....	23
2.1 La energía solar térmica de concentración.....	24
2.1.1 Energía solar. Interés de la concentración .....	25
2.1.2 Tecnología de concentrador cilindro-parabólico .....	30
2.1.3 Tecnología de torre central .....	34
2.2 El sistema de disco Stirling.....	36
2.2.1 Funcionamiento básico del disco-Stirling.....	38
2.2.2 El motor Stirling .....	40
2.2.3 Descripción de componentes de la tecnología de disco Stirling .....	42
2.2.4 Estado de la tecnología .....	48
ESTADO DEL ARTE.....	51
3.1 Instalaciones de disco-Stirling. ....	52
3.2 Hibridación aplicada a la energía solar térmica de concentración.....	59
3.2.1 Experiencias en el sistema de disco Stirling .....	61
3.3 Almacenamiento térmico .....	73
3.4 Análisis de ciclo de vida aplicado a tecnologías de generación solar. ....	77

<b>ANÁLISIS DE OPERACIÓN DE HIBRIDACIÓN DEL SISTEMA DE DISCO STIRLING .....</b>	<b>89</b>
4.1 Metodología .....	92
4.1.1 Datos de entrada para el análisis .....	92
4.1.2 Modelización del sistema .....	96
4.1.3 Indicadores resultados de evaluación .....	105
4.2 Resultados aplicados al sistema de disco Stirling .....	106
4.2.1 Operación solo solar .....	106
4.2.2 Hibridación con gas natural .....	107
4.2.3 Hibridación con biogás .....	109
4.2.4 Aplicación de almacenamiento térmico .....	111
<b>PRE-DISEÑO DEL SISTEMA HIBRIDADO .....</b>	<b>113</b>
5.1 Receptor híbrido. ....	114
5.2 Quemador de combustible .....	119
5.3 Pre calentador de aire .....	127
<b>IMPACTO MEDIOAMBIENTAL .....</b>	<b>133</b>
6.1 Análisis de ciclo de vida .....	136
6.1.1 Definición y fases de ACV .....	136
6.1.2 Programa informático SimaPro .....	138
6.1.3 Selección de los métodos de evaluación de impacto .....	139
6.2 Aplicación al caso de estudio de ACV .....	143
6.2.1 Objetivos y alcance del ACV .....	143
6.2.2 Modelización de los sistemas .....	144
6.3 Resultados .....	148
6.3.1 Comparativa entre sistema de disco Stirling y sistema fotovoltaico .....	148
6.3.2 Evaluación medioambiental de alternativas de hibridación ..	165
6.4 Conclusiones .....	171
6.4.1 Síntesis .....	171
6.4.2 Interpretación de resultados .....	172
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>175</b>
7.1 Síntesis .....	176
7.2 Contribución .....	178
7.3 Perspectivas futuras .....	178
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>181</b>
<b>ANEXO: ECOINDICADOR 99 CML2 .....</b>	<b>189</b>



# JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Interés

El impacto medioambiental y la disponibilidad de la energía serán dos aspectos clave en el futuro energético mundial. Las llamadas energías renovables cumplen el primero de estos aspectos, pero la idoneidad para el segundo queda a disposición de la posibilidad de hibridar las instalaciones que proveen la energía con otras fuentes. Así, es necesario identificar aquellas tecnologías de explotación de energías renovables que permitan la hibridación, a poder ser con otros recursos asimismo renovables. Es aquí donde la energía solar térmica de concentración tiene un alto potencial de implementación.

Si bien la energía fotovoltaica es conocida e identificada por la sociedad en general, no sucede lo mismo con la energía solar térmica de concentración. Pero según determinadas referencias [1], las perspectivas de utilización de la energía solar térmica de concentración (CSP – Concentrating Solar Power-) son significativas: en un escenario avanzado, que implicaría un compromiso político importante, llegan hasta una cuarta parte de las necesidades energéticas mundiales en menos de 50 años. La información que existe respecto a las energías solares térmicas de concentración [2] destaca el potencial de esta forma de energía, debido fundamentalmente a la eficiencia alcanzada y a las posibilidades de explotación de los ciclos termodinámicos asociados. Aún dentro de la CSP existen distintas tecnologías con diferente grado de desarrollo, que va desde la fase de industrializaciones a gran escala, en un número reducido de localizaciones, hasta instalaciones puramente de investigación y desarrollo [3].

Es importante considerar conjuntamente el potencial de cada una de las tecnologías y los aspectos clave de desarrollo que garanticen la viabilidad de las mismas. Si nos ceñimos a la

eficiencia la de más alto potencial es la tecnología de disco Stirling [2]. Es además la única de las tecnologías termosolares de concentración que permite su implementación en unidades aisladas desde 3 a 25 kW, por lo que podría jugar un papel importante en la utilización de generación distribuida. Sin embargo, actualmente es la que presenta mayores retos técnicos asociados a la fiabilidad y rentabilidad de la inversión. Ahora bien, si las perspectivas de utilización de la tecnología de disco Stirling se demuestran prometedoras, se realizará la inversión necesaria para garantizar la factibilidad de la misma.

En este sentido, existen dos factores clave que pueden ayudar a discriminar a la tecnología de disco Stirling frente a su competencia directa para la generación de energía en unidades aisladas o modulares, la fotovoltaica.

Por una parte, las tecnologías de energía solar térmica de concentración presentan la ventaja de ser susceptibles de hibridación con otras fuentes de energía, lo que, frente a la fotovoltaica, supone la no dependencia absoluta de la disponibilidad del recurso solar frente a la adaptación a la demanda. Si además se considera esta hibridación con otras fuentes de energía renovables, tales como la biomasa, el interés puede ser aún mayor.

Por otra parte, el impacto medioambiental puede ser también un factor discriminante para la elección entre una y otra tecnología. De hecho, este criterio puede pasar a formar parte de las políticas energéticas a nivel global para la determinación de acciones de apoyo y desarrollo de diferentes tecnologías. El interés de aplicación de esta tecnología dependerá en gran medida del impacto medioambiental asociado al ciclo de vida completo de las instalaciones necesarias para su explotación. La evaluación de las energías renovables no debe considerar exclusivamente la gratuidad y bajo impacto ambiental de los combustibles utilizados, sino también el impacto completo que origina su aprovechamiento. En este sentido, existe un método de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) que realiza el estudio desde la cuna a la tumba de los productos, procesos y actividades. La aplicación de este método a la tecnología de disco Stirling puede servir para determinar el interés de realizar las inversiones y apoyo a la investigación apropiados, de forma que se garantice que la tecnología de explotación sea viable técnica, económica y medioambientalmente.

## 1.2 Objetivo general

En el contexto actual del uso de energía para generación eléctrica, es necesario el desarrollo de tecnologías de explotación de recursos renovables. Entre estas, los esfuerzos de investigación y desarrollo deben centrarse sobre aquellas que aseguren un funcionamiento fiable y duradero, la amortización de las inversiones, el coste competitivo de generación y un mínimo impacto medioambiental. Además, es importante invertir en tecnologías que garanticen el acceso para generación distribuida, por razones sociales. La tecnología de disco Stirling presenta un alto potencial para todas estas cuestiones. El objetivo general de la presente tesis es analizar aspectos de utilización de esta tecnología, de forma que permita afirmar aún más su potencial de forma complementaria a otras actividades de desarrollo conocidas. Los aspectos de utilización sobre los que se centra son, por una parte la aplicación de hibridación a la tecnología, y por otra la evaluación medioambiental frente a la tecnología fotovoltaica.

## 1.3 Objetivos concretos

Los objetivos concretos de esta tesis son los siguientes:

- Análisis exhaustivo de la información disponible de la tecnología de disco Stirling. Es importante conocer el estado del arte de esta tecnología con el fin de identificar los aspectos de estudio que necesitan ser analizados más detalladamente. Esta información no es fácilmente identificable, ya que esta tecnología no ha sido difundida tan profundamente como otras tecnologías solares de concentración, y no hay informes que registren toda la documentación disponible. Además, la información pública es limitada, con un número reducido de unidades construidas [4].
- Estudio de los factores de operación en función de la disponibilidad del recurso solar. El análisis se realiza sobre la instalación con operación solo solar, así como con hibridación con diferentes combustibles. Determinación de factores de operación específicos con el fin de resaltar las ventajas de la hibridación.
- Pre-diseño del sistema con hibridación, en particular sobre los componentes adicionales necesarios a incluir en el sistema de disco Stirling para su funcionamiento híbrido. El abastecimiento de combustible, y los componentes específicos de combustión y transferencia térmica al motor Stirling son los elementos clave para este funcionamiento.
- Aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) al sistema de disco Stirling. Comparación con la principal tecnología actual de aprovechamiento solar con similares condiciones de utilización en cuanto a modularidad y funcionamiento para generación distribuida, la fotovoltaica. Se incluyen también aspectos de integración de la hibridación del sistema con distintos combustibles.

## 1.4 Estructura de la tesis

La presente tesis se estructura en ocho capítulos.

El primero de ellos presenta brevemente el interés del tema en cuestión, así como el objetivo general planteado para el inicio de la tesis, los objetivos concretos y la estructura de la tesis.

El segundo capítulo es una introducción más detallada de la tecnología, situando la misma dentro de las tecnologías solares de concentración, por lo que también se incluye descripción de todas ellas. El estado de implantación del resto de centrales de generación eléctrica utilizando tecnología solar de concentración ayuda a situar el estado de desarrollo de la tecnología de disco Stirling. Se realiza también una explicación del funcionamiento del disco Stirling, junto con sus componentes.

En el tercer capítulo se recoge una revisión del estado del arte conocido. Se analizan los desarrollos conocidos en esta tecnología, así como las instalaciones construidas que han llegado a operar. Un apartado de este capítulo está específicamente dedicado a recoger las experiencias relativas a la hibridación del sistema, ya que como punto de partida se considera una estrategia interesante para garantizar la viabilidad de la tecnología. El arte previo conocido respecto a la hibridación se centra especialmente en el diseño de receptores híbridos que reciben energía solar y energía procedente de la combustión de distintos combustibles. También se ha recogido información relacionada con sistemas de almacenamiento térmico, ya que se ha considerado a priori como una estrategia potencialmente interesante para su integración en el funcionamiento del disco Stirling. Otro apartado de este capítulo se centra en la recopilación de información de análisis de impacto medioambiental de tecnologías solares. Por una parte, se trata de revisar los métodos más comúnmente utilizados para realizar este análisis y por otro de recuperar valores de evaluación de las tecnologías. Como se realiza también una comparación con los sistemas fotovoltaicos en el capítulo 6, se han recopilado también valores relativos a esta tecnología. De hecho, hay poca información conocida de análisis de impacto ambiental de la tecnología de disco Stirling.

El análisis de operación del sistema de disco Stirling se presenta en el capítulo 4. Se realiza una evaluación del funcionamiento del sistema con energía solar. Se determinan los periodos de operación, los periodos de aprovechamiento total de capacidad de la instalación así como periodos de aprovechamiento parcial y de no operación. Esto permite evaluar el potencial de la tecnología para la hibridación con el fin de completar esas fases de operación donde el recurso solo solar no es suficiente para garantizar el máximo aprovechamiento de la instalación. En este sentido, en este análisis se ha integrado también el funcionamiento de la instalación con hibridación con diferentes combustibles, respetando las regulaciones impuestas al porcentaje permitido de hibridación en las instalaciones solares, que es sustancialmente diferente para combustibles fósiles, como el gas natural, y combustibles procedentes de biomasa, como el biogás [5]. También se ha analizado el potencial de otra solución complementaria para reducir la dependencia del recurso solar, como es el almacenamiento térmico, que permitiría almacenar energía en periodos donde la irradiación solar es superior a la que puede aprovechar el sistema para liberarla en los periodos de aprovechamiento parcial o no operación.

Es necesario realizar el pre-diseño de los componentes necesarios que permitan la hibridación, que en el anterior capítulo se presenta como claramente ventajosa frente a la operación solo solar. Por ello, en el capítulo 5 se presentan los factores clave de diseño para estos componentes. Son necesarios componentes específicos: un receptor híbrido que permita la transferencia térmica al fluido de trabajo del motor Stirling por radiación solar o por energía procedente de la combustión, así como un quemador para el combustible. Con el fin de mejorar la eficiencia general del sistema, se incorpora un precalentador de combustible para minimizar lo máximo posible el consumo asociado a la hibridación.

El impacto medioambiental se presenta en el capítulo 6. Como se ha introducido previamente, éste se realiza mediante la técnica de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Se realiza una introducción a la técnica con el fin de comprender los resultados del análisis, es decir, en base a qué parámetros se realizará la comparación entre los sistemas. Una parte importante de este apartado es la selección del método de evaluación de impacto. Posteriormente, se presenta la modelización de los sistemas sobre los que se centra el estudio: el sistema de disco Stirling como unidad aislada para generación distribuida, la instalación fotovoltaica semejante, y el sistema hibridado con distintos combustibles. Esta modelización supone los datos de entrada para el ACV. Los resultados se presentan por un parte como inventario, y por otra con los indicadores asociados a los métodos de evaluación de impacto seleccionados. Estos resultados

se complementan además con otros indicadores que servirán también para determinar el impacto de las instalaciones, como por ejemplo el “pay-back” energético, que representa el número de años en los que se recupera la inversión energética para la construcción de las instalaciones.

Por último el capítulo 7 presenta las conclusiones, con una síntesis de los trabajos realizados en esta tesis, así como las perspectivas futuras de trabajos de desarrollo para la tecnología de disco Stirling. El capítulo 8 recoge la bibliografía utilizada.



# 2

## INTRODUCCIÓN

*En este capítulo se presenta una introducción a las tecnologías de energía solar térmica de concentración, con el fin de situar la tecnología de disco Stirling dentro de las perspectivas crecientes de utilización de este tipo de aprovechamiento del recurso solar.*

Es bien conocida la tecnología fotovoltaica como forma de explotación de la energía solar. Tanto las grandes instalaciones, huertos solares, como las placas fotovoltaicas colocadas en instalaciones particulares o en pequeños dispositivos constituyen un elemento familiar dentro del conocimiento general. También las instalaciones solares térmicas, como por ejemplo los “combo-system” en azoteas, son un elemento común en determinadas regiones. No sucede lo mismo con la energía solar térmica de concentración. A pesar de ser España un país pionero tanto en desarrollo como en implantación de estos sistemas, siguen siendo todavía relativamente desconocidos para la sociedad en general. Bien es cierto que una tecnología en particular, la de colector parabólico, está experimentando una creciente utilización, especialmente en el sur de España. Dentro de la energía solar térmica de concentración hay otras tecnologías con un futuro prometedor, cuya utilización no ha pasado todavía a fase plenamente industrial: la de torre central y la de disco Stirling. Es esta última el objeto de la presente tesis, y sobre la que se centra el capítulo introductorio. Previamente se presenta el interés de la energía solar térmica de concentración en general, así como una breve descripción de las otras dos tecnologías referidas. Posteriormente, se realiza la introducción a la tecnología de disco Stirling en cuestión, describiendo su funcionamiento, así como los componentes que forman parte de la misma. El estado actual de la tecnología se pasa a explicar en el capítulo 3.

## 2.1 La energía solar térmica de concentración.

El desarrollo de la explotación de la energía procedente de fuentes renovables surge principalmente como consecuencia de la crisis de 1974, donde la situación del sector petrolífero lleva a los países industrializados a la búsqueda de energías alternativas que permitan mantener el alto nivel de consumo energético. Los primeros trabajos sobre centrales solares termodinámicas son realizados en Italia y Francia [6][7]. Estos trabajos llevaron a la creación de plataformas experimentales durante los años 80 en Estados Unidos (Albuquerque, NM, Barstow, CA), en España (PSA, Almería) y en Francia (Thémis, Targassonne) [7][8]. El trabajo iniciado en estos años es considerablemente frenado durante los años 90 debido a la estabilidad del precio del petróleo y de nuevas políticas energéticas en los países industrializados. Sin embargo, a principios del presente siglo, el desarrollo de estas tecnologías es nuevamente relanzado, debido fundamentalmente a la lucha contra el cambio climático –protocolo de Kyoto 1997- y a la incertidumbre sobre el aprovisionamiento de combustibles fósiles que vuelve a resurgir. Se empieza a hablar en términos de “mix” energético con el fin de ampliar el rango de fuentes de energía, y de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> asociados al consumo energético. En este contexto, la energía solar térmica de concentración presenta un alto potencial para su utilización, debido fundamentalmente al alto rendimiento, al valor reducido de emisiones de CO<sub>2</sub> y a la posibilidad de hibridación y almacenamiento térmico. Además, los esfuerzos realizados en investigación por los países pioneros en esta tecnología, como Alemania, España y Estados Unidos, han permitido que el coste de generación sea razonablemente competitivo con otras fuentes energéticas, situándose en el rango entre 0,15 y 0,23 €/kWh según algunas referencias [1][9][10] y entre 0,09 y 0,20 €/kWh según otra [11]. La perspectiva futura según las primeras referencias podría bajar hasta valores entre 0,05 y 0,14 €/kWh [1][9][10]. En cuanto al coste, hay que tener en cuenta además las políticas de incentivos económicos que puedan tener los distintos países. En el caso de España, las últimas noticias apuntan a un recorte en el apoyo gubernamental a estas tecnologías, lo que supondrá un freno en su desarrollo e implementación [12].

Básicamente, los sistemas de energía solar térmica de concentración convierten la energía solar en electricidad mediante la concentración de la radiación solar que transfiere el calor a un fluido, que puede ser aceite de alta temperatura, sales fundidas o hidrógeno. Este fluido de trabajo es utilizado en un ciclo termodinámico convencional. De hecho, las instalaciones del

ciclo termodinámico son hasta cierto punto similares a otras plantas convencionales de energía que pueden funcionar con carbón o gas natural, con la particularidad de que los ciclos están adaptados a las características del suministro solar. El estado actual de desarrollo, desde el punto de vista técnico y económico, hacen prever una mayor implementación en el futuro de las tecnologías de energía solar térmica de concentración. La tecnología más utilizada actualmente es la de cilindros parabólicos. En España la potencia instalada de esta tecnología en 2013 es de 1872 MW de producción eléctrica. En cuanto a la tecnología de torre central, la primera torre a nivel comercial se instaló en Sevilla en el año 2006 (PS10) y existen ya empresas que comercializan unidades de esta tecnología. España cuenta con una potencia instalada en esta tecnología de 51 MW en el año 2013, siendo actualmente líder en su utilización [3]. La tecnología más en desarrollo es la de disco Stirling. No puede considerarse que las plantas actuales estén implementadas a nivel totalmente industrial, teniendo el carácter de demostración en su gran mayoría. Es sobre esta tecnología sobre la que se centra la presente tesis. La ventaja de aplicación de esta tecnología frente al resto es principalmente su modularidad, ya que permite unidades desde 3 kW para generación distribuida hasta centrales de generación de megavatios mediante la adición de módulos que pueden ser de hasta 25 kW. Otra ventaja notable es que la refrigeración se produce sin agua.

### 2.1.1 Energía solar. Interés de la concentración

La calidad termodinámica de la radiación solar es alta, ya que es el resultado de procesos en la superficie solar que tienen lugar a una temperatura de cuerpo negro de 5777 K. La radiación solar es una fuente de elevada temperatura y exergía en origen, pero el potencial de producción de trabajo se destruye cuando ésta llega a la superficie terrestre, debido a la drástica reducción de temperatura. Así, el promedio anual de energía solar que recibe la superficie de la tierra es de  $170 \text{ W/m}^2$  en dirección normal ( $1490 \text{ kWh/m}^2/\text{año}$ ) [13]. Como estimación, el resultado de integrar esta cantidad en el periodo de un año es de 5,4 GJ, que sería la energía total que incide en un metro cuadrado de superficie a nivel de suelo. Esto representa aproximadamente la energía que puede extraerse de un barril de petróleo, de 200 kg de carbón o de 140 m<sup>3</sup>N de gas natural. La distribución de esta energía varía ampliamente de unas zonas a otras, habiendo áreas de la Tierra que reciben hasta un 40% más que el promedio global. La distribución de las diferentes áreas de la Tierra se hace en base al valor DNI (Director Normal Insolation, radiación directa normal), y se expresa como  $\text{kWh/m}^2/\text{año}$ . La energía solar de concentración utiliza esta radiación directa normal, que es la luz solar que no es desviada por nubes, humo o polvo suspendido en la atmósfera y que llega a la superficie terrestre en rayos paralelos para su concentración. Los lugares más idóneos deben tener muchas horas de sol directo, al menos 2000 kWh de radiación solar por metro cuadrado al año, que serían los indicados en Figura 1. Las mejores instalaciones reciben más de  $2800 \text{ kWh/m}^2/\text{año}$ . El valor de la radiación determinará los mejores lugares para la instalación, ya que el coste de la electricidad depende de este valor. A modo de ejemplo, según ECOSTAR el coste de electricidad de una central explotada de  $2900 \text{ kWh/m}^2/\text{año}$  a  $2000 \text{ kWh/m}^2/\text{año}$  se reduce en un 31% [14]. Centrales con el mismo precio y condiciones de financiación, en los estados sur-occidentales de Estados Unidos o la zona del alto Egipto, conseguirán un coste equivalente un 20-30% menor que en el sur de España o en la costa norteafricana porque la cantidad de energía generada a partir del sol es hasta un 30% superior ( $2.600\text{-}2.800$  comparado con  $2.000\text{-}2.100 \text{ kWh/m}^2/\text{año}$ ) 0. Las mejores regiones son aquellas sin mucha humedad atmosférica, polvo o humo, como estepas, zonas de matorral, sabanas, semi-desiertos y auténticos desiertos, localizados idealmente a menos de 40 grados de latitud norte o sur. Por ello, en las zonas más prometedoras del mundo están incluidos los Estados sur-occidentales de Estados Unidos, América Central y del Sur, norte y sur de África, los países mediterráneos, Oriente Próximo y Oriente Medio, Irán y las planicies desérticas de India, Pakistán, la antigua Unión Soviética, China y Australia. En esas regiones es suficiente un

kilómetro cuadrado de terreno para generar hasta 100-130 GWh de energía solar por año utilizando tecnología termosolar 0. Esta es la misma energía que la producida por una central convencional de gas o carbón de 50 MW que funcione a carga media. Como estimación general, si consideramos todo el ciclo de vida de un sistema de energía térmica de concentración su rendimiento puede ser equivalente a la energía contenida en más de 5 millones de barriles de crudo. Un concepto interesante es presentado por DESERTEC [15]: técnicamente se necesitaría sólo un 0,04% de la energía solar procedente del desierto del Sáhara para cubrir la demanda de electricidad de Europa. Y sólo el 2% del área del Sáhara podría cubrir las necesidades de electricidad de todo el mundo. Con la evolución de la tecnología en una aplicación a gran escala, la exportación de electricidad del norte de África a los países europeos es una opción viable pero que requeriría enormes inversiones en importantes centrales de gran tamaño y líneas de interconexión de alta tensión.

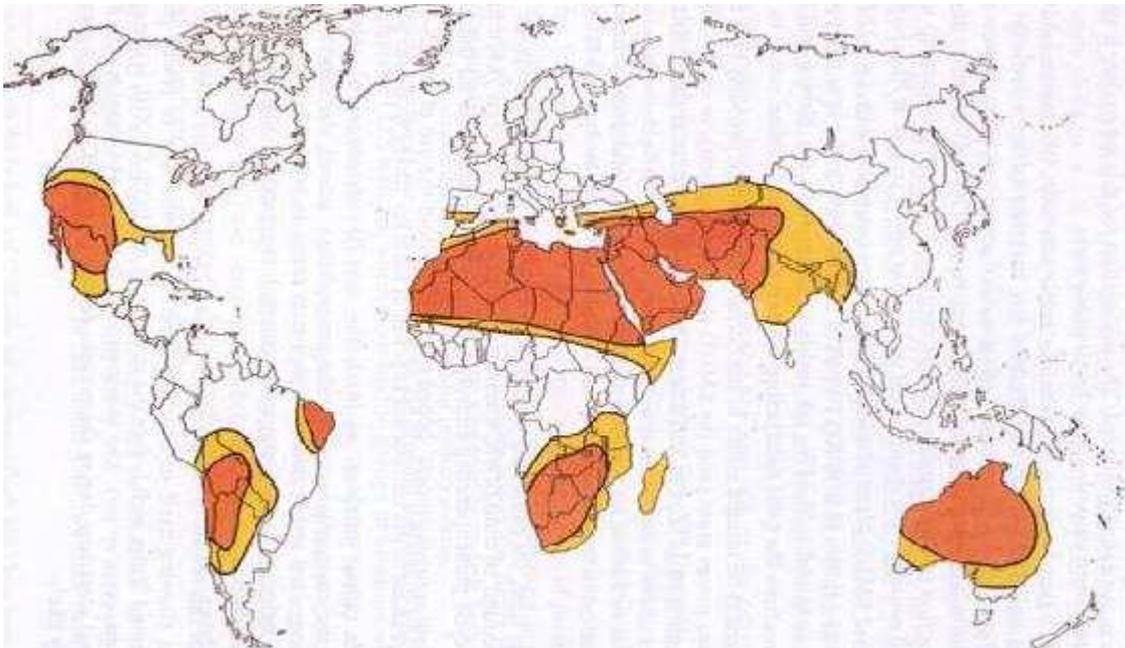


Figura 1 Zonas con valor de irradiación normal directa mayor de 2000 kW/m<sup>2</sup>/año [8].

Los sistemas solares de concentración aprovechan esta radiación directa normal mediante los sistemas ópticos de concentración, que permiten aumentar las densidades de energía y la temperatura. Así, la radiación solar recupera parte de su potencial para la producción de trabajo mediante la utilización de un ciclo termodinámico. El modelo para el diseño de los sistemas de concentración es la geometría del concentrador parabólico ideal, adaptándolo al tamaño de la instalación y a las condiciones reales de operación. Así, se utilizan concentradores solares por reflexión para alcanzar las temperaturas requeridas por los ciclos termodinámicos. Esto determina los tres principales conceptos de sistemas de concentración solar [2]:

- Concentradores cilindro-parabólicos: Son concentradores de foco lineal con seguimiento en un solo eje, concentraciones de la radiación de 30 a 80 veces y potencias por campo unitario de 30 a 80 MW.

- Sistemas de torre o de receptor central: Consisten en un campo de helióstatos que siguen la posición del Sol en todo momento (elevación y acimut) y orientan el rayo reflejado hacia el foco colocado en la parte superior de una torre. Los órdenes de concentración son de 200 a 1.000 y las potencias unitarias de 10 a 200 MW.
- Discos Stirling parabólicos: Son pequeñas unidades independientes con reflector parabólico habitualmente conectado a un motor Stirling situado en el foco. Los niveles de concentración son superiores (1.000-4.000) y las potencias unitarias son de 3 a 25 kW.

Estos tres sistemas se presentan esquemáticamente en Figura 2 .

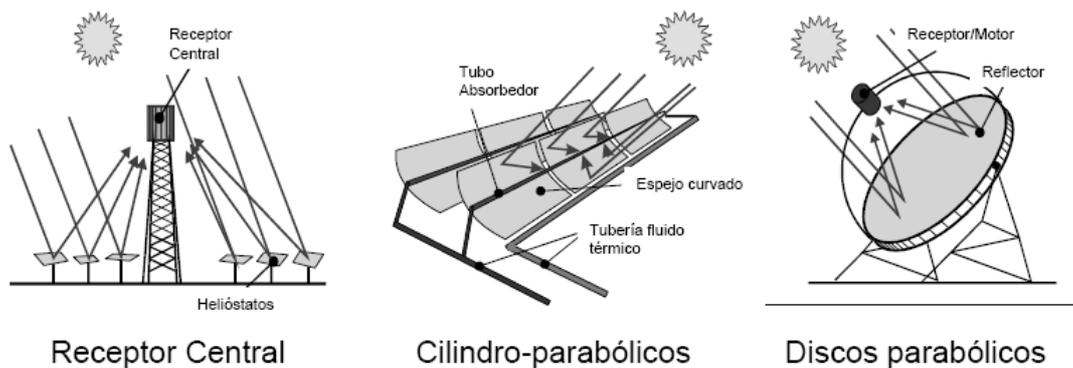


Figura 2 Principales configuraciones de los sistemas de concentración solar [2].

Reuniendo datos de diferentes referencias pueden resumirse las características más reseñables de estas tres tecnologías en la siguiente Tabla 1. Corresponde a la revisión bibliográfica de datos disponibles en diferentes años. En cuanto a la potencia instalada y previsiones de las distintas instalaciones, los datos reflejados en la Tabla 1, se revisarán en los apartados específicos de cada tecnología con el análisis de la última información disponible [3]. Se ha considerado interesante conservar los datos de 2009 a fin de contrastar la evolución y acierto en las previsiones de implementación.

Tabla 1 Características de los sistemas de concentración solar [3][8][16][17].

	<i>Cilindro-parabólicos</i>	<i>Torre central</i>	<i>Disco Stirling</i>
<i>Potencia</i>	30-300 MW	10-250 MW	3-25 kW
<i>Temperatura operación</i>	270-450°C	450-1000°C	600-1200°C
<i>Factor de capacidad anual</i>	23-50%	20-77%	25%
<i>Eficiencia pico</i>	20%	23%	29,4%
<i>Eficiencia neta anual</i>	11-16%	7-20%	12-25%
<i>Estado comercial</i>	Disponible comercialmente	Primeras instalaciones comerciales	Demostración-prototipos
<i>Riesgo tecnológico</i>	Bajo	Medio	Alto
<i>Almacenamiento disponible</i>	Limitado	Sí	Baterías
<i>Diseños híbridos</i>	Sí	Sí	Sí
<i>Precio campo solar</i>	210-250 €/m <sup>2</sup>	140-220 €/m <sup>2</sup>	~150 €/m <sup>2</sup>
<i>Coste total de la inversión</i>	2,8-3,5 €/We	3-4 €/We	10-14 €/We
<i>Potencia instalada hasta 2009 (MW)</i>	500	40	0,5
<i>Electricidad producida hasta 2009 (GWh)</i>	>16000	80	3
<i>Potencia aproximada en construcción y propuesta (MW) a fecha de 2009</i>	>10000	3000	1000

La viabilidad de estas tecnologías se debe garantizar mediante la optimización económica que equipare los costes de generación de energía con otras tecnologías. Con respecto a una planta térmica convencional, el coste directo de capital de la instalación sería en torno a tres veces superior, mientras que el precio de generación se multiplicaría por dos al menos. Sin embargo, comparándola con otras formas de generación a partir de energía solar, podría ser la más competitiva [18]. Son varios los factores que aumentan la viabilidad económica de los proyectos de estas tecnologías, no propios del estado técnico de las mismas, como la reforma del sector eléctrico, el aumento de la demanda de 'energía verde', y el desarrollo de mercados energéticos mundiales para la generación de energía no contaminante. Los programas de ayuda directa suponen también un fuerte empuje, como las leyes sobre tarifas de introducción de renovables a la red u obligaciones de suministro de energías renovables en algunos países. Y no menos importante, el aumento de los precios de los combustibles fósiles acercará el precio de la energía solar al coste de la generación convencional.

Estas instalaciones necesitan una elevada inversión inicial, pero durante todo su ciclo de vida el 80% de los costes son en construcción y deuda asociada, y sólo el 20% es de operación. Esto significa que una vez abonados todos los gastos generados por la construcción de la central, sólo quedan los costes operativos y la electricidad sin amortización es más barata que cualquier otra de la competencia, comparable sólo con las ya amortizadas hidroeléctricas.

En cuanto a su situación con respecto a la tecnologías fotovoltaica, la energía solar térmica utiliza la radiación solar directa, a diferencia de la solar fotovoltaica que utiliza la radiación directa y la difusa. Este hecho reduce la energía solar disponible en solar térmica con respecto a la fotovoltaica para iguales condiciones meteorológicas, sin embargo, la fotovoltaica presenta una eficiencia considerablemente inferior, en torno al 15% en panel y 12% en planta, además de otros problemas adicionales como la aparición de puntos negros o cortocircuitos y serios problemas en el abastecimiento de silicio. En cuanto al coste de las instalaciones, se ha producido una disminución sustancial en los últimos años, llegando a evolucionar de valores aproximados de 3,2 €/kWp desde 2004 hasta valores de 0,7-0,8 €/kWp, estableciéndose costes de generación de energía que estarán en el rango de 0,09-0,20 €/kWh (datos 2012) [11], relacionando los menores costes del rango asociados a instalaciones a gran escala y los mayores costes a instalaciones comerciales. Así, los avances en materia de costes de la energía fotovoltaica, que han sido propiciados por avances tecnológicos, podría frenar el desarrollo de la energía solar térmica de concentración, por la dificultad actual de competir en costes de implementación y precio de la energía. Sin embargo, la tecnología solar térmica está menos madura y es factible hacer mejoras significativas en eficiencia y costes en relación a la tecnología actual. En particular, la hibridación con otros combustibles podría ser el punto clave de diferenciación respecto a la fotovoltaica. En cuanto a la comparativa actual de implementación, se sitúa en torno a 70 GW para la energía fotovoltaica y 1,8 GW para la energía solar térmica de concentración, con una previsión en torno a 700 GW de fotovoltaica y 150 GW de solar térmica de concentración en el años 2030 (datos 2012), si bien es cierto que hay informes más optimistas, como el de Greenpeace que situarían la implementación en 1750 GW para la fotovoltaica y 700 GW para la solar térmica de concentración [19].

Cabe resaltar el papel potencial que la tecnología de disco Stirling puede tener en generación distribuida. El concepto de generación distribuida parte de los orígenes de la generación eléctrica, y supone una generación de la energía allí donde se realiza su consumo. Con la mejora del transporte de energía eléctrica en cuanto a la instalación de redes de distribución, la construcción de centros de transformación, el crecimiento demográfico, y el aumento masivo en la producción, se fue separando el lugar de consumo del emplazamiento de generación. Este cambio fue motivado entre otras cosas por la necesidad de buscar un gran sumidero último de calor que refrigerase las grandes centrales (ríos, mares, lagos), el potencial peligro de instalaciones que utilizan combustibles fósiles o radiactivos (humos, explosiones) y la proximidad a la fuente de combustible. De acuerdo con este principio de generación centralizada se buscaron localizaciones para las grandes centrales actuales. Podemos decir entonces por contraposición que la generación distribuida es la generación o el almacenamiento de energía eléctrica a pequeña escala, lo más cercana al centro de carga, con la opción de interactuar (comprar o vender) con la red eléctrica y, en algunos casos, considerando la máxima eficiencia energética. En la actualidad está resurgiendo el interés, debido a la aparición de nuevas formas de utilización de las fuentes energéticas que no presentan los antiguos inconvenientes asociados. En términos generales, al implementar proyectos de generación distribuida lo que se busca es aumentar la calidad de la energía, entendiendo por esto contar de forma ininterrumpida con la energía eléctrica, con sus adecuados parámetros eléctricos que la definen acordes a las necesidades, esto es voltaje, corriente y frecuencia, entre otros. Permite además su implantación en localizaciones aisladas que no disponen de conexiones a red, por lo que podría ser también un motor de desarrollo para zonas con estas características.

Hay otro factor que incrementa el interés sobre la energía solar térmica de concentración. La transferencia de energía térmica en estos sistemas permite el almacenamiento térmico, la hibridación con sistemas solares-biomasa, por ejemplo, o la instalación de sistemas de cogeneración electricidad-calor. Se debe al hecho de que son centrales termodinámicas, al contrario que las centrales fotovoltaicas. Pueden por tanto trabajar con energía solar de forma intermitente, adaptándose a la variabilidad del recurso. Estas opciones permitan mejorar la calidad y cantidad de la electricidad producida, con respecto a otras tecnologías de energías renovables como la fotovoltaica o eólica, donde el almacenamiento solo puede realizarse de forma eléctrica, lo que conlleva bajos rendimientos y costes muy elevados.

La siguiente imagen (Figura 3) muestra los enclaves geográficos donde se encuentran plantas actualmente en operación y también en fase de construcción o planificación.

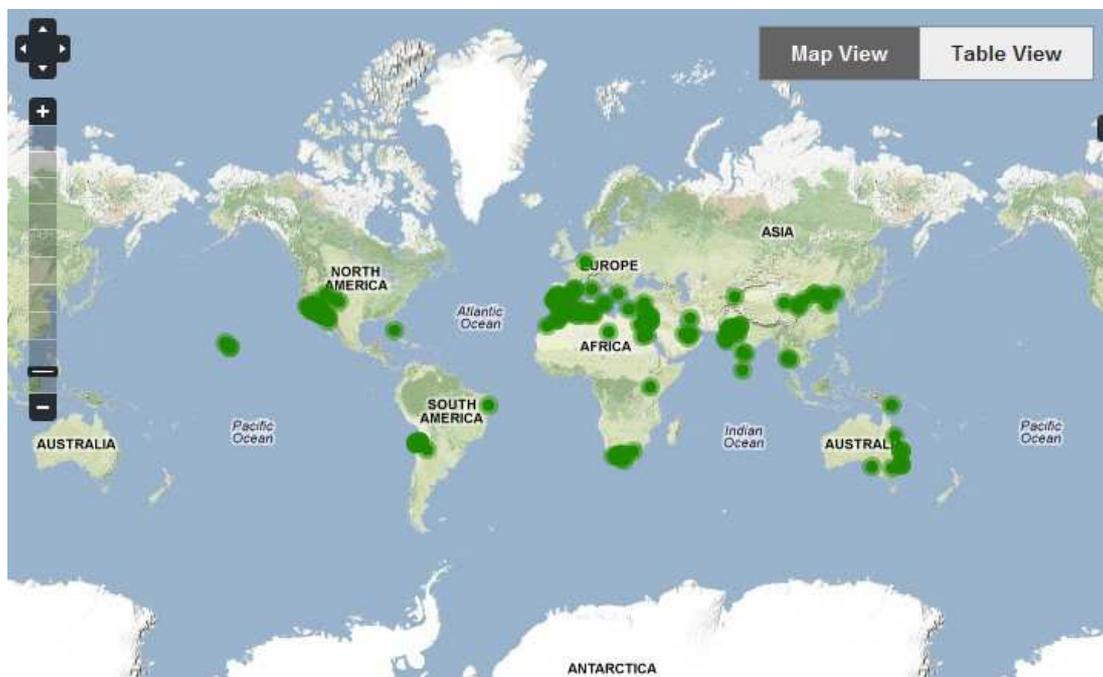


Figura 3 Geografía de las instalaciones de plantas solares térmicas de concentración [3]

### 2.1.2 Tecnología de concentrador cilindro-parabólico

Son sistemas de captadores lineares constituidos por espejos cilindro-parabólicos (Parabolic Trough) que concentran la radiación solar en un tubo receptor situado en la línea focal del captador y por el que circula un fluido portador de calor (aceite sintético, agua-vapor). La energía térmica recibida de la energía solar se transfiere a un sistema de producción eléctrica, que convierte esta energía térmica en trabajo a partir de un ciclo Rankine y posteriormente a electricidad. Esta tecnología es actualmente la más madura de las energías solares térmicas de concentración. La mayor implementación de plantas en el año 2013 en producción se encuentra en España, con un total de 1872 MWe. Le sigue Estados Unidos, donde la producción es de 455 MWe, de los cuales un alto porcentaje procedentes de las instalaciones SEGS, con un valor de

390 MWe, operativas desde los 90. La siguiente tabla (Tabla 2) muestra el número de instalaciones mundiales en operación actualmente (2013) [3].

Tabla 2 Plantas en operación de tecnología de colector parabólico [3] – Marzo 2013-.

<i>Proyecto</i>	<i>País</i>	<i>MWe</i>			
<b>Hassi-R'mel</b>	Algeria	25	<b>Palma del Rio I</b>	España	50
<b>Minera el Tesoro</b>	Chile	14	<b>Palma del Rio II</b>	España	50
<b>Kuraymat ISCC</b>	Egipto	20	<b>Morón</b>	España	50
<b>Indian Institute</b>	India	3	<b>Olivenza I</b>	España	50
<b>Archimede</b>	Italia	5	<b>Puertollano</b>	España	50
<b>Ain-Beni-Mathar ISCC</b>	Marruecos	20	<b>Solaben II</b>	España	50
<b>Sahara Forest</b>	Qatar	No	<b>Solaben III</b>	España	50
<b>Andasol 1</b>	España	50	<b>Solacor 1</b>	España	50
<b>Andasol 2</b>	España	50	<b>Solacor 2</b>	España	50
<b>Andasol 3</b>	España	50	<b>Solnova 1</b>	España	50
<b>La Africana</b>	España	50	<b>Solnova 3</b>	España	50
<b>ASTE - 1A</b>	España	50	<b>Solnova 4</b>	España	50
<b>ASTE - 1B</b>	España	50	<b>Soluz Guzman</b>	España	50
<b>Astexol-2</b>	España	50	<b>Majadas</b>	España	50
<b>La Dehesa</b>	España	50	<b>Borges</b>	España	22,5
<b>La Florida</b>	España	50	<b>Valle 1</b>	España	50
<b>Extresol 1</b>	España	50	<b>Valle 2</b>	España	50
<b>Extresol 2</b>	España	50	<b>Kanchanaburi</b>	Tailandia	5
<b>Extresol 3</b>	España	50	<b>Holaniku</b>	EEUU	2
<b>HelioEnergy 1</b>	España	50	<b>Martin Next</b>	EEUU	75
<b>HelioEnergy 2</b>	España	50	<b>Nevada Solar One</b>	EEUU	64
<b>Helios 1</b>	España	50	<b>Saguaro Power</b>	EEUU	1,16
<b>Helios 2</b>	España	50	<b>SEGS I</b>	EEUU	14
<b>La Risca</b>	España	50	<b>SEGS II</b>	EEUU	33
<b>Lebrija 1</b>	España	50	<b>SEGS III</b>	EEUU	33
<b>Manchasol 1</b>	España	50	<b>SEGS IV</b>	EEUU	33
<b>Manchasol 2</b>	España	50	<b>SEGS V</b>	EEUU	33
<b>Consol</b>	España	50	<b>SEGS VI</b>	EEUU	33
			<b>SEGS VII</b>	EEUU	33
			<b>SEGS VIII</b>	EEUU	89
			<b>SEGS IX</b>	EEUU	89

Los proyectos en desarrollo, planificación y construcción suponen un incremento de más de 5000 MWe a añadir a la producción actual [3]. Previsiblemente Estados Unidos equipará a España en cuanto a la producción eléctrica asociada a esta tecnología, ya que la previsión muestra un incremento de 1740 MWe con un total de 10 instalaciones en proyecto, mientras que en España el incremento rondará los 400 MWe, asociados a 8 nuevas instalaciones. Otros países que apuestan por esta tecnología son: India, con 517 MWe previstos, Marruecos con 485 MWe, Chile con 360 MWe y China e Israel con alrededor de 300 MWe planificados para los próximos años.

Existen cuatro tipos diferentes en función del fluido utilizado o del tipo de concentrador:

- Sistemas cilindro-parabólicos con aceite
- Sistemas cilindro-parabólicos con generación directa de vapor (DSG)
- Sistemas con captadores lineares Fresnel (CLFR)
- Sistemas híbridos de ciclo combinado con precalentamiento solar (ISCC)

La mayor parte de la información de costes relativos a la tecnología solar térmica de concentración está disponible para la tecnología de colectores cilindro-parabólicos, ya que es la que tiene mayor implementación en operación. Según algunas estimaciones presentadas en el informe Estela de Greenpeace 0, las nuevas instalaciones de esta tecnología, introduciendo mejoras probadas, pueden producir electricidad a un coste entre 0,076 y 0,092 €/kWh en modo de operación sólo solar bajo las condiciones del suroeste de EEUU. A modo comparativo, en España, el último dato coste equivalente de electricidad es superior a esa cantidad para la tecnología de colectores cilindro-parabólicos, situándose en torno a 0,23 €/kWh 0, aunque la reducción es continua (posiblemente los datos más actuales muestren una reducción significativa). De acuerdo a experiencias comerciales previas con las plantas SEGS de California en funcionamiento desde 1992, se han realizado considerables disminuciones del coste de la energía. Por ejemplo, la primera unidad de 14 MWe suministraba energía en torno a 0,30 €/kWh, y ha caído a sólo 0,1 €/kWh con la última unidad de 80 MWe 0. En comparación con los valores de producción generales de la energía solar térmica de concentración previamente presentados, estos valores se situarían en el rango menor, por tratarse de la tecnología más madura. Esto es posible debido a las mejoras tecnológicas, la ampliación de la capacidad individual en MW de la planta, los mayores índices de instalación, las presiones competitivas, el almacenamiento térmico, los nuevos fluidos de transferencia térmica, y la mejora operativa y de mantenimiento. De hecho, se espera una mayor disminución del coste. En el sentido técnico, una importante limitación tecnológica está asociada a la máxima temperatura de trabajo que se sitúa en los 400°C. A esto se añaden las ineficiencias y costes asociados al uso de un aceite térmico como fluido de transferencia entre el receptor solar y el generador de vapor. Por este motivo los esfuerzos de desarrollo tecnológico se centran en la búsqueda de mejores medios de transferencia de calor que sustituyen al aceite.

En las siguientes imágenes (Figura 4 y Figura 5) se muestra la foto de una instalación junto con el esquema de operación de la planta.



Figura 4 Imagen de la instalación de colectores cilindro-parabólicos SEGS I en California [8].

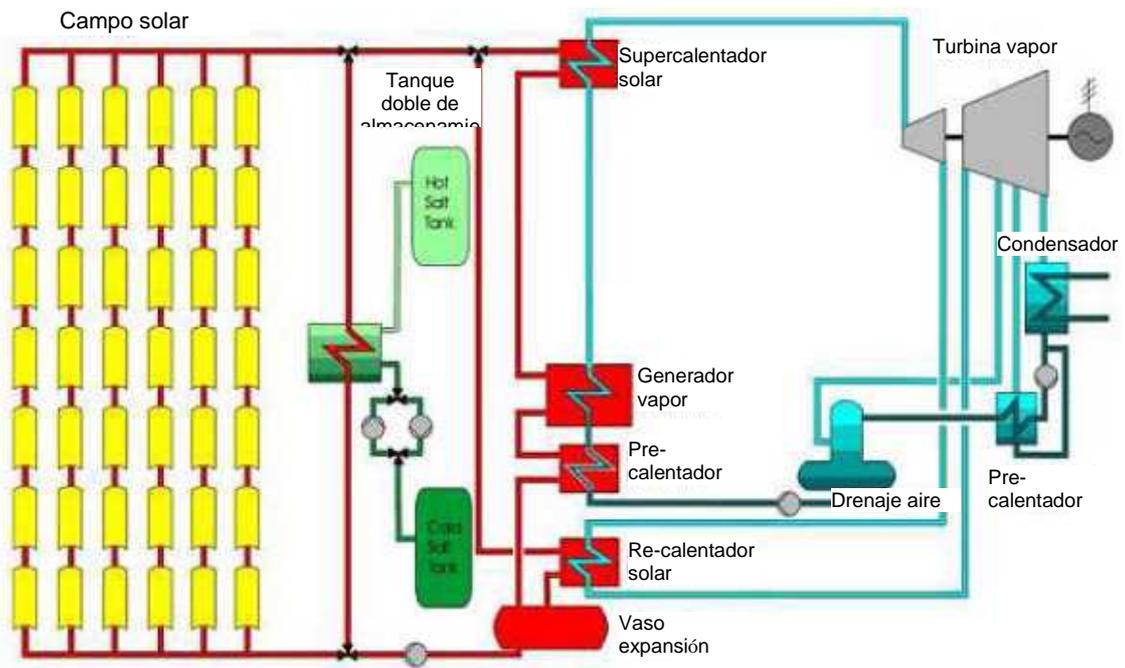


Figura 5 Esquema simplificado de la central Extresol 1, España [8].

### 2.1.3 Tecnología de torre central

Los sistemas de torre central utilizan un campo de espejos (helióstatos) que siguen la trayectoria solar sobre dos ejes con el fin de concentrar la radiación solar sobre un receptor situado en lo alto de una torre. Esta tecnología permite concentraciones más elevadas que las de los sistemas de concentradores cilindro-parabólicos. El fluido portador de calor (agua-vapor, sales fundidas, aire) alcanza temperaturas entre 250°C y 1000°C, lo que acciona un ciclo Rankine, un ciclo Brayton o un ciclo combinado. Debido a los altos flujos de radiación incidente, admite fácilmente el funcionamiento híbrido y almacenamiento térmico. A nivel tecnológico, esta tecnología no ha alcanzado el grado de maduración de los concentradores cilindro-parabólicos: la primera central comercial, PS10, fue inaugurado en 2006 en una localización cercana a Sevilla. La siguiente tabla (Tabla 3) muestra las instalaciones en funcionamiento. España se sitúa a la cabeza también en esta tecnología en cuanto a instalaciones actualmente operativas con un total de 51 MWe, seguida por Estados Unidos con 2 instalaciones que suman 34 MWe.

Tabla 3 Plantas en operación de tecnología de torre central [3] –Marzo 2013-.

<i>Proyecto</i>	<i>País</i>	<i>MWe</i>
<b>Dahan Power Plant</b>	China	1
<b>Jülich</b>	Alemania	1,5
<b>Acme Rajasthan Solar Power 1</b>	India	2,5
<b>BrightSource SEDC</b>	Israel	6
<b>Gemasolar</b>	España	20
<b>PS10</b>	España	11
<b>PS20</b>	España	20
<b>SierraSunTower</b>	EEUU	5
<b>BrightSource Coalinga</b>	EEUU	29

La previsión de aumento de utilización de esta tecnología es significativa, situándose en casi 6000 MWe entre las centrales anunciadas, planificadas, en desarrollo y construcción. El país que va a realizar una mayor inversión es Estados Unidos, con una previsión de casi 3000 MWe en un total de 15 plantas. Destaca también una planta anunciada en Túnez para una producción de 2000 MWe. Otros países cuya inversión va a ser considerable son Chile, con una previsión de plantas que sumarán 400 MWe y Sudáfrica con 250 MWe. En España está prevista la construcción de una planta en Alcázar de potencia 50 MWe. Estos datos han sido extraídos de la referencia [3].

Hay cuatro tecnologías principales que se diferencian por la naturaleza del fluido portador de calor:

- Sistemas de torre central con sales fundidas
- Sistemas de torre central agua-vapor
- Sistemas de torre central con aire
- Sistemas híbridos con fluido portador de calor de aire presurizado acoplado a un ciclo Brayton.

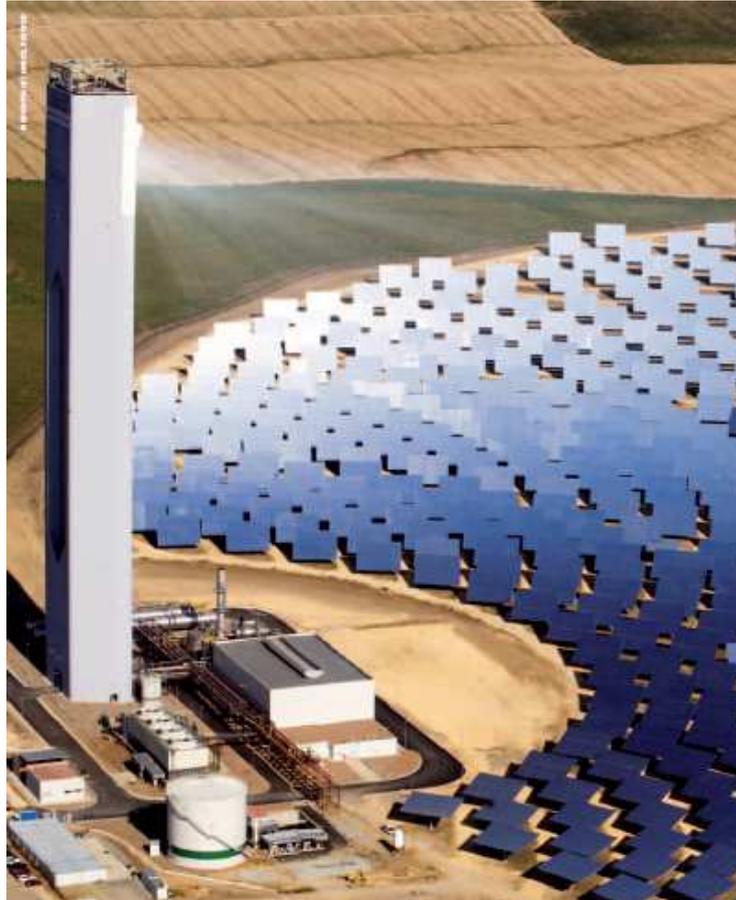


Figura 6 Imagen de una instalación de torre central PS20.

La figura anterior (Figura 6) presenta una foto de una instalación de torre central. La siguiente figura (Figura 7) muestra un esquema simplificado de una central de sales fundidas, tecnología más madura de las cuatro referidas anteriormente.

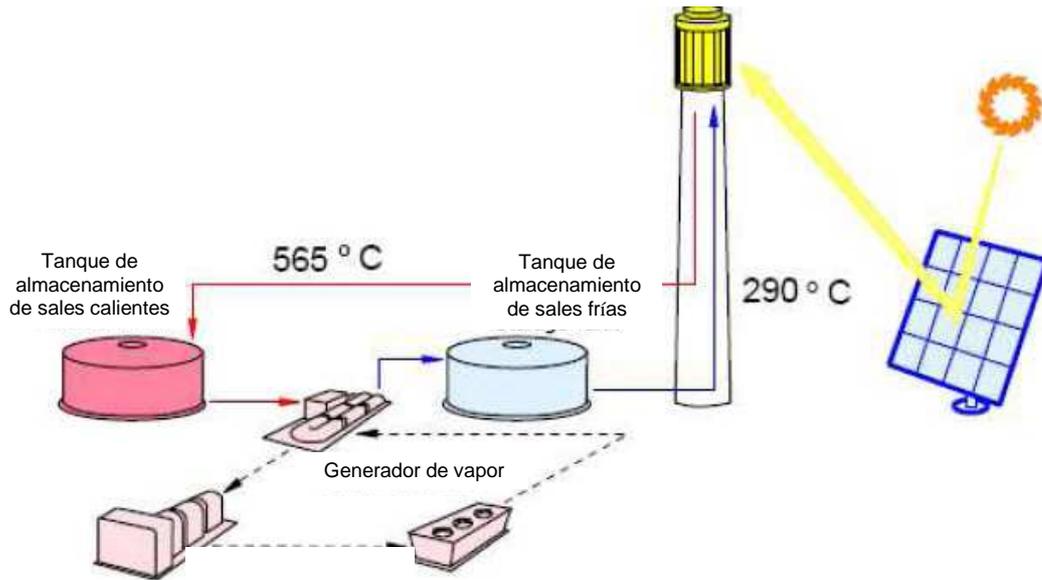


Figura 7 Esquema simplificado de una central de torre de sales fundidas [8].

## 2.2 El sistema de disco Stirling

Los sistemas de disco Stirling son los dispositivos de conversión de energía solar a electricidad con un mayor rendimiento, que si sitúa para su valor pico en torno al 30%. El 31 de enero de 2008, se estableció un record de conversión solar-electricidad en un 31.25%, con la utilización de un dispositivo de la empresa de Estados Unidos Stirling Energy System (SES), en un emplazamiento con una radiación superior a 1000 W/m<sup>2</sup> y una temperatura ambiente de 0°C [20].

El disco Stirling o disco parabólico (DP) es un sistema de generación termosolar, que se caracteriza básicamente por el concentrador (reflector o conjunto de reflectores) con forma de paraboloide de revolución que dirige la radiación solar a un foco. En dicho foco se sitúa un receptor que transfiere la radiación en forma de energía térmica a un fluido que circula por un motor Stirling. Éste se encuentra conectado a su vez a un alternador que convierte el trabajo mecánico realizado por dicho motor a energía eléctrica. En la siguiente figura (Figura 8) se muestra un esquema básico con los componentes fundamentales.

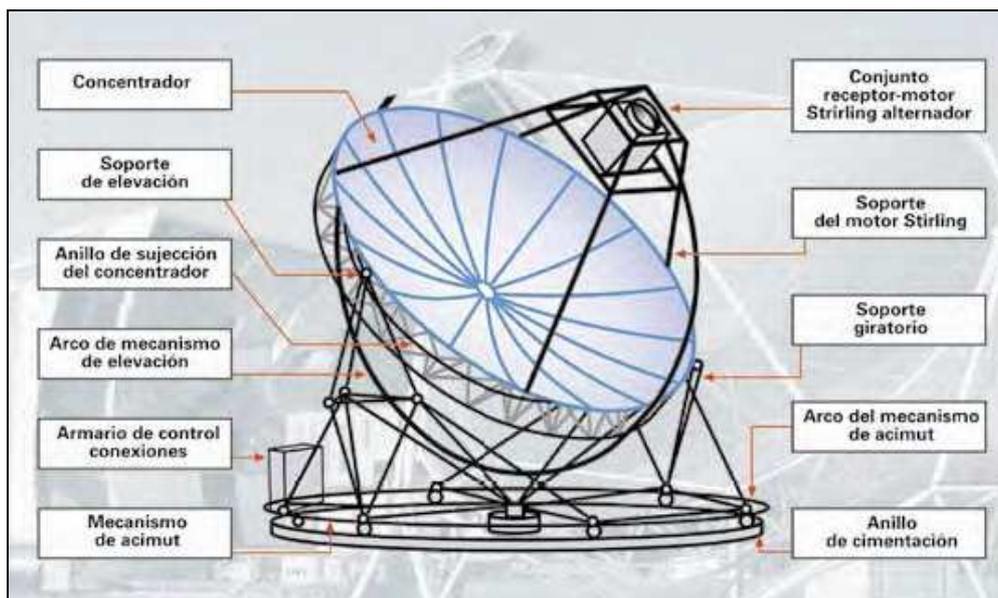


Figura 8 Esquema simplificado de disco Stirling [21].

Los sistemas de disco Stirling se caracterizan por su alto rendimiento, modularidad y autonomía. Según Romero [2] los sistemas de disco Stirling son, sin lugar a dudas, la tecnología con un mayor potencial a largo plazo, por sus altas eficiencias y su modularidad que los hacen extraordinariamente atractivos desde el punto de vista de la planificación de la inversión. La limitación en cuanto a su potencia unitaria (por debajo de 25 kW) es, no obstante, un obstáculo para muchas aplicaciones que pretenden producción eléctrica a gran escala. Las experiencias de operación se restringen a unas pocas unidades por lo que el riesgo tecnológico es alto. También es limitada la experiencia sobre fiabilidad a partir del número de horas acumuladas de ensayo. Se trata además de un sistema que precisa establecer un sistema de producción en masa para reducir costes de utillajes, sobre todo en los motores, por lo que los costes de la inversión para las primeras plantas son altos y la incertidumbre en su reducción también más elevada, resultando ineludible una estrategia industrial que contemple la exportación hacia un mercado amplio para garantizar su viabilidad. Esto ha resultado en los últimos años en un retraso en el desarrollo de la tecnología frente a las otras dos tecnologías solares térmicas de concentración. Sin embargo, la perseverancia de ciertas compañías ha hecho que esta tecnología siga aún viva, y que, de hecho, se estén proyectando instalaciones. Estas compañías se han centrado en el desarrollo de un motor fiable que garantice un buen funcionamiento con hidrógeno, de forma que se solvante el problema asociado a fugas, a la vez que se han vigilado los costes. El hecho de que el motor pueda ser además abastecido por otras fuentes de energía sigue siendo un punto de interés significativo [22]. Un proyecto que está actualmente siendo desarrollado por Infinia (adquirida por Qnergy en noviembre de 2013), con el apoyo del Departamento de Energía (DOE) de los EEUU, tiene el objetivo de alcanzar el valor de 0,07\$/kWh en 2015 para suministro de potencias intermedias y de 0,05\$/kWh para suministro de potencia a gran escala en 2020, combinando el sistema de disco Stirling con un sistema de almacenamiento térmico [23].

El análisis del rendimiento del sistema se realiza en base a la radiación normal directa que recibe el disco. De ésta, se producen pérdidas que hacen que no toda la potencia recibida sea transferida al motor, debido a pérdidas asociadas fundamentalmente a reflectividad de la superficie y pérdidas en la cavidad por convección y radiación. El motor Stirling tiene en sí

mismo también un rendimiento asociado, y existen además pérdidas relacionadas con el generador eléctrico y de refrigeración. Un análisis detallado del balance energético se encuentra en la presente tabla (Tabla 4). Este balance ha sido calculado mediante medidas experimentales y ciertas consideraciones teóricas. En todo caso, sirve como aproximación en la comprensión del funcionamiento del disco Stirling.

Tabla 4 Balance energético de un sistema de disco Stirling (SBP- 10 kW) [24].

<b>ENTRADA</b>	
Radiación Normal Directa (DNI)	<b>906 W/m<sup>2</sup></b>
Potencia reflejada por el disco	<b>44,4 kW</b>
Potencia recibida en apertura de la cavidad	<b>37,75 kW</b>
Reflexión	<b>1,40 kW</b>
Pérdidas radiativas	<b>2,59 kW</b>
Convección a través de apertura de la cavidad	<b>1,00 kW</b>
Radiación y convección en el entorno del motor	<b>1,13 kW</b>
Potencia de entrada al motor Stirling	<b>31,63 kW</b>
<b>SALIDA</b>	
Salida eléctrica (neto del motor Stirling)	<b>10,85 kW</b>
Potencia en eje del motor Stirling	<b>12,25 kW</b>
Potencia asociada a la refrigeración	<b>18,53 kW</b>
<b>Total de potencia de salida</b>	<b>30,77 kW</b>

### 2.2.1 Funcionamiento básico del disco-Stirling

El sistema de disco-Stirling funciona con energía solar. El motor Stirling opera con una diferencia de temperaturas, de forma que el nivel de alta temperatura se obtiene a partir de los rayos solares. Estos rayos son recogidos en una superficie reflectante, generalmente con una forma parabólica, que puede ser también un conjunto de espejos de posición variable. Este colector, es decir, la superficie reflectora, se mueve a lo largo del día para seguir la trayectoria solar. El sistema de seguimiento es uno de los factores clave en la tecnología de disco-Stirling. La siguiente figura (Figura 9) muestra una aplicación típica de esta tecnología.



Figura 9 Sistema de disco Stirling – Infinia [25].

La función del sistema es recoger y concentrar la radiación solar directa, de forma que esta se convierte en energía térmica en un fluido por medio de un intercambio térmico. Así, los rayos solares impactan en el disco y son dirigidos a un punto focal, que es la zona de entrada a una cavidad. Esta cavidad es un elemento, generalmente cerámico, que da lugar a una distribución de la radiación en una superficie de aproximadamente 30\*30 cm, como se muestra en la Figura 10. En este plano se posiciona un intercambiador de calor cuya función es proveer la energía térmica al fluido de trabajo del motor Stirling, constituyendo la fuente de alta temperatura para su operación.

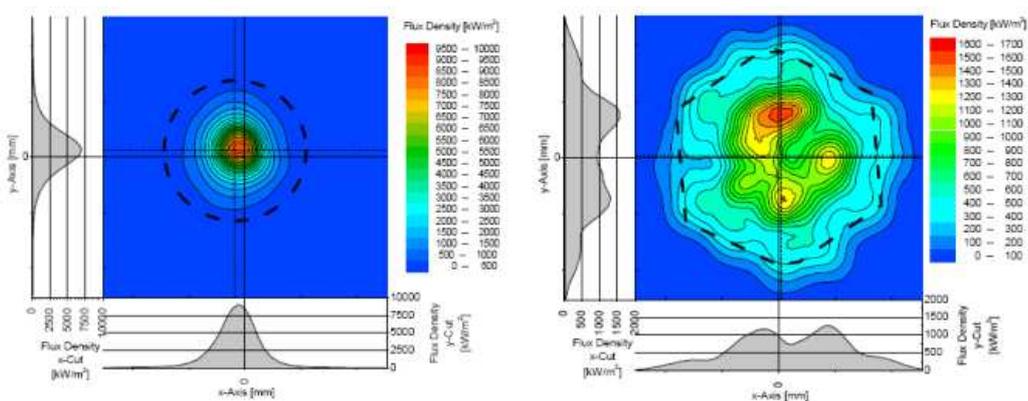


Figura 10 Distribución del flujo solar en el punto focal (izquierda) y en el plano del intercambiador de calor (derecha) –unidades densidad de flujo (*Flux Density*)-[26].

En los apartados siguientes se pasa a describir los componentes asociados, de los que forma parte fundamental el motor Stirling, que da nombre a la tecnología. También se analizarán las instalaciones existentes y el estado actual de la técnica.

## 2.2.2 El motor Stirling

El motor Stirling es un motor de combustión externa que convierte el calor transferido a un receptor a potencia mecánica, de forma similar a los conocidos motores de combustión interna utilizados en automoción y otras aplicaciones. La principal diferencia con estos motores es que la energía para el movimiento del pistón es transferida desde una fuente externa. El motor opera en ciclo cerrado, sin admisión y escape del fluido de trabajo. Este fluido es generalmente hidrógeno que se calienta por encima de los 700°C con una presión máxima de 20 MPa y que lleva a una eficiencia del motor de conversión térmica-mecánica de aproximadamente el 40% [4]. Para alcanzar estas eficiencias elevadas, existe un regenerador que realiza un enfriamiento del fluido de trabajo cuando este se mueve de la cámara de expansión a la de compresión, y un calentamiento cuando lleva el sentido contrario. En la cámara de expansión es donde se recibe la transferencia de calor externa, mientras que la cámara de compresión es refrigerada por un circuito por el que circula un fluido refrigerante de forma similar a un radiador convencional de automoción.

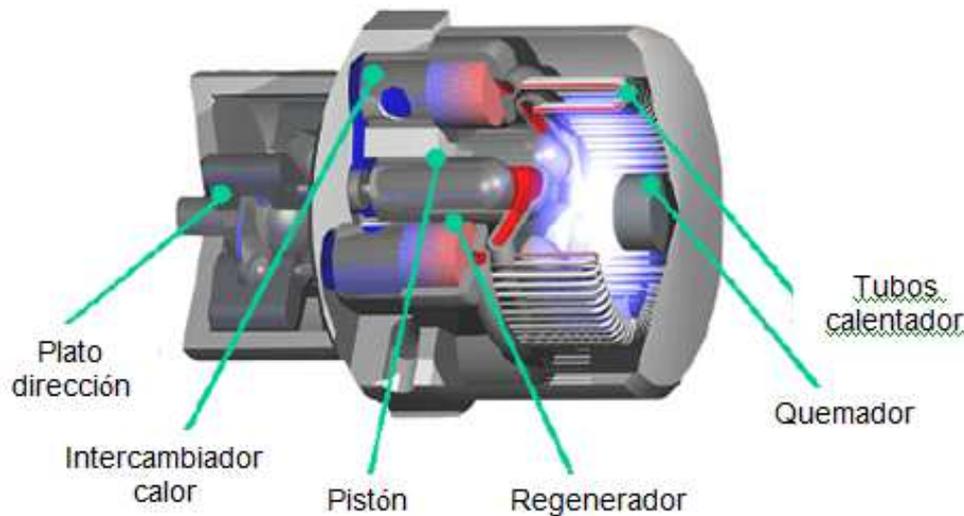


Figura 11 Componentes motor Stirling [4].

Las ventajas básicas de los motores Stirling son [4]:

- Máxima eficiencia potencial de un motor térmico operando entre los mismos niveles de temperatura.
- Combustible flexible: biomasa, solar, geotérmica, calor residual y combustibles fósiles.
- Menor emisión de  $\text{NO}_x$  en comparación con motores de combustión interna
- Mínimas vibraciones
- Alta fiabilidad para las configuraciones de pistón libre.
- Posibilidad de funcionamiento reversible, como un enfriador o bomba de calor.
- Mayor trabajo específico obtenido en comparación con otros ciclos regenerativos.

Las desventajas básicas son:

- Respuesta más lenta para aumentos y disminuciones de la carga.
- Menor potencia específica. Serían de poca aplicación para automoción debido al peso y volumen.
- Estanqueidad de los fluidos habituales de trabajo (hidrógeno o helio).

El ciclo teórico de funcionamiento se representa en la siguiente figura (Figura 12):

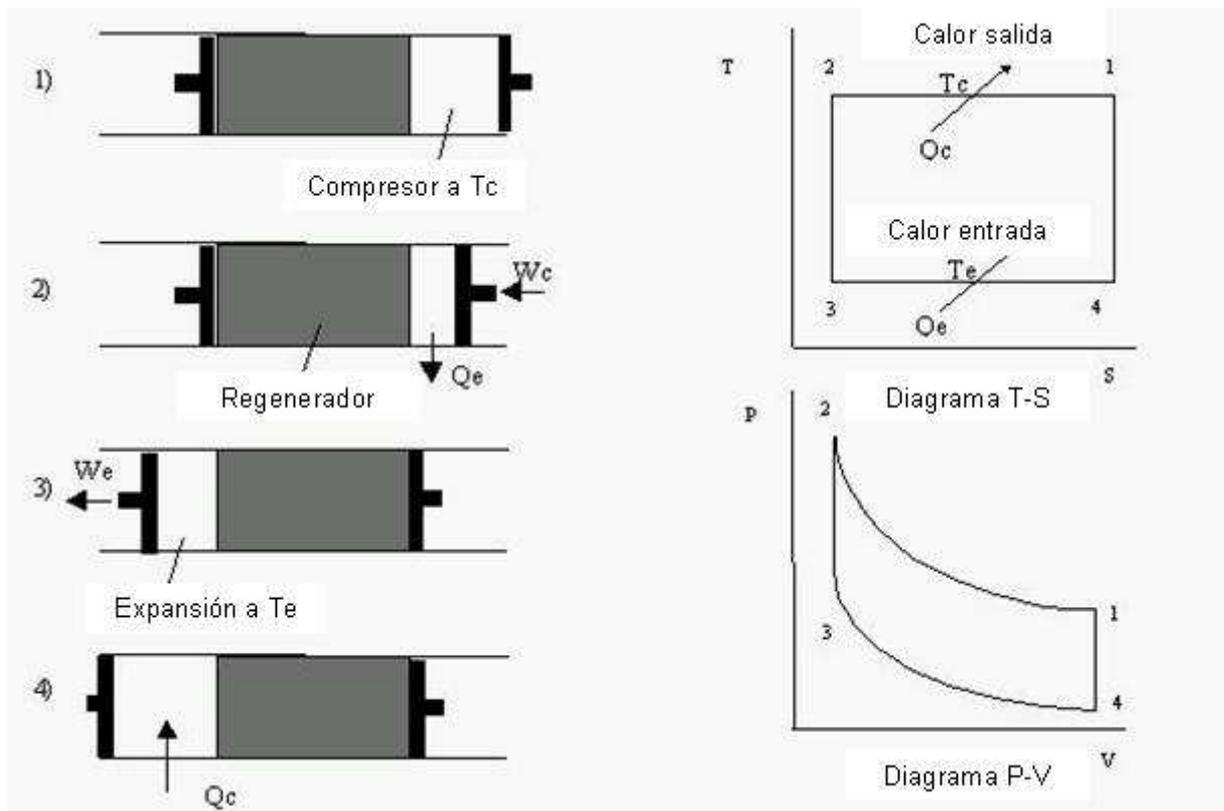


Figura 12 Ciclo teórico funcionamiento disco Stirling [4].

Los motores Stirling aplicados en tecnología de disco Stirling incluyen el C11S de Cleanergy (basado en el SOLO 161, motor de 11 kW de Alemania), el Kockums (anteriormente United Stirling) 4-95, de 25 kW de Suecia y el Stirling Thermal Motors STM4-120 de 25 kW de Estados Unidos [4]. El motor SOLO se ha utilizado en proyectos de cogeneración y en la investigación con el proyecto de disco Stirling Euro/Enviro-Dish. El Kockums 4-95 es la unidad de potencia de los sistemas de Stirling Energy Systems (SES). El STM4-120 fue desarrollado por General Motors y el Departamento de Energía de los Estados Unidos como parte del programa de futuras generaciones de vehículos [27]. Infinia utiliza los motores desarrollados por Microgen Engine Corporation, empresa holandesa [28].

### 2.2.3 Descripción de componentes de la tecnología de disco Stirling

Los componentes básicos de un sistema de disco parabólico, tal como se ha presentado en la Figura 8, son:

- Concentrador
- Receptor
- Sistema de generación: motor Stirling + alternador
- Estructura de soporte: cimentación de hormigón y estructura metálica



Figura 13 Fotografía disco Stirling (SBP) [20][21].

Para la descripción del sistema se ha seleccionado un sistema de generación de 10 kW, de la empresa alemana SBP (Schlaich Bergermann und Partner), que se presenta en la Figura 13. Esta empresa ha participado en los proyectos Eurodish y Envirodish [25], ambos a nivel europeo, para el desarrollo de esta tecnología. Otros sistemas de generación de disco Stirling van desde los 3 kW (Infinia) hasta un valor máximo por unidad de 25 kW (SES- Stirling Energy Systems). Este último valor aunque factible desde el punto de vista técnico (SES tuvo proyectos en EEUU para su implementación en 2011 que no fueron finalmente realizados), no se han visto confirmados en la práctica.

A continuación se incluye información más detallada de cada uno de los componentes que han sido considerados en el análisis de ciclo de vida.

#### **Concentrador**

La forma de la superficie reflectante en un sistema de este tipo es la de un paraboloide de revolución. El tamaño del concentrador depende tanto de la potencia nominal como de la

energía a generar en un periodo de tiempo para unas determinadas condiciones de radiación solar y, también, de los rendimientos asociados de los elementos que constituyen el sistema.

Los discos parabólicos pueden construirse tanto con facetas que aproximan de forma discreta a la geometría del paraboloide, o con membrana tensionada de metal, aproximando así de manera continua a la geometría buscada. La superficie reflectante se consigue a base de espejos de vidrio o de películas reflectantes. Las relaciones de concentración llegan a alcanzar valores muy elevados, de hasta 3.000, lo cual repercute en temperaturas muy elevadas en el absorbedor.

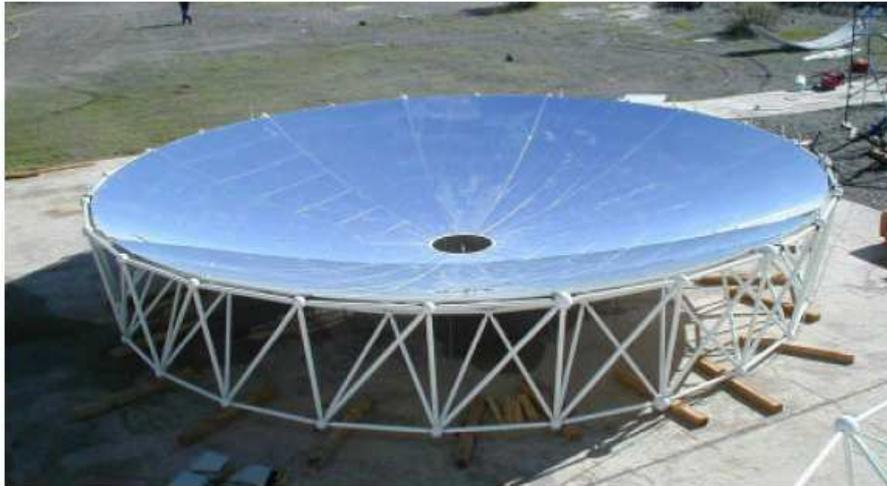


Figura 14 Fotografía concentrador (SBP) [29].

En particular para el sistema SBP el concentrador consiste en 12 segmentos independientes de fibra de vidrio. Estos segmentos se montan formando una parábola, que se tensiona exteriormente para garantizar su forma. El concentrador se encuentra unido a la estructura metálica de soporte. A los segmentos de fibra de vidrio se les añade una capa de espejos de vidrio delgados (espesor 0,8 mm) para obtener una alta y duradera reflectividad de alrededor del 94%. Por supuesto, las operaciones de mantenimiento de la instalación incluyen la limpieza con el fin de garantizar el máximo rendimiento posible. El coste del concentrador representa aproximadamente un 25% del coste total del sistema.

### **Receptor**

El receptor de un sistema parabólico tiene dos funciones fundamentales:

- Absorber la radiación solar reflejada por el concentrador
- Transferir la energía absorbida al fluido de trabajo de la máquina térmica asociada (motor Stirling)

Se trata de un receptor de cavidad, donde la radiación concentrada entra por una abertura situada en el foco del paraboloide, de forma que incide posteriormente en el plano del absorbedor (intercambiador de calor). Esta cavidad, de material cerámico, disminuye las pérdidas radiativas y convectivas, además de homogeneizar y limitar el valor máximo del flujo radiante sobre el absorbedor. La temperatura de trabajo del absorbedor se sitúa en torno a los 800°C.

Se distinguen dos tipos de absorbedores:

- De tubos directamente iluminados, donde la radiación incide sobre un haz de tubos por cuyo interior circula el fluido de trabajo del motor Stirling.
- De reflujo, que emplean un metal líquido (generalmente sodio) como fluido intermedio para la transmisión de calor, en forma de tubo de calor (“heat pipe”).

Los absorbedores de reflujo presentan la ventaja de que son menos sensibles a la falta de uniformidad de la mancha solar, que en los absorbedores de tubos directamente iluminados pueden provocar fallos por dilatación diferencial entre componentes. Además, son más compactos ya que presentan una gran capacidad de transmisión de calor, y son más versátiles para ser utilizados por diferentes fuentes de energía, permitiendo así la hibridación del sistema. Sin embargo, su desarrollo es más complejo, y todavía no existe un desarrollo fiable aplicado al disco Stirling.

El sistema SBP utiliza un absorbedor de tubos directamente iluminados, que se presenta en la Figura 15 [21]. Este diseño consta de 78 tubos de Inconel 625, con un diámetro exterior de 3 mm e interior de 2 mm. Los tubos están unidos mediante soldadura en horno a alta temperatura (“brazing”) a los depósitos, que se unen a su vez mediante los cabezales al motor Stirling.

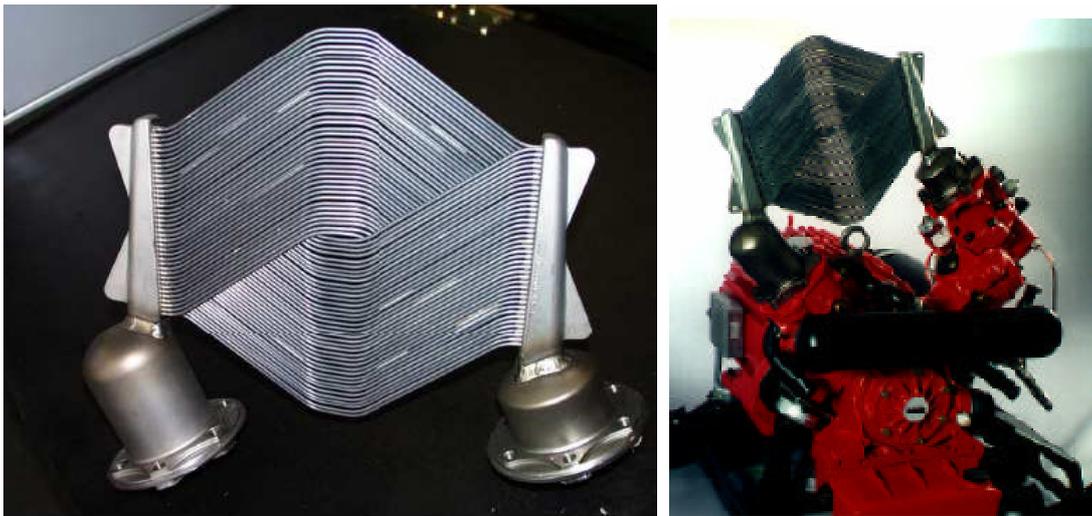


Figura 15 Fotografías absorbedor SBP [21].

### **Sistema de generación: motor Stirling + alternador**

El sistema generador está constituido por una máquina térmica, que sigue el ciclo termodinámico de potencia, y el generador propiamente dicho, que transforma la energía mecánica en electricidad. En este caso, se trata de un motor Stirling unido a un alternador. Las potencias de los motores oscilan entre los 3 y los 25 kW, con rendimientos en torno al 30%.

El fluido que circula por el interior del motor Stirling puede ser helio o hidrógeno. Para el caso particular de la aplicación SBP, éste funciona con hidrógeno. El funcionamiento en las instalaciones experimentales requieren recargas semanales, debido a que no está bien solucionado el problema de las fugas en los componentes del motor. Sin embargo, estas

recargas se minimizarán en gran medida para la aplicación a gran escala. La presión máxima de trabajo se sitúa en torno a los 150 bar.

El motor utilizado en la instalación de SBP es el SOLO-161, de la empresa alemana SOLO KLEINMOTOREN GMBH. Los datos que se han tomado son relacionados con la información disponible de esta empresa, aunque actualmente no existe, ya que fue adquirida por la empresa sueca Cleanergy AB. Esta adquirió los derechos de fabricación, propiedad industrial y medios productivos, de forma que el motor ha pasado a denominarse Cleanergy Stirling C11S. Este motor se comercializa para su aplicación solar desde 2011, en el que Cleanergy envió las primeras unidades de demostración a España, Corea y China. El primer parque de demostración de 10 unidades de esta compañía fue instalado en 2012 en China [29][30].



Figura 16 Fotografías motor SOLO-161 [25]

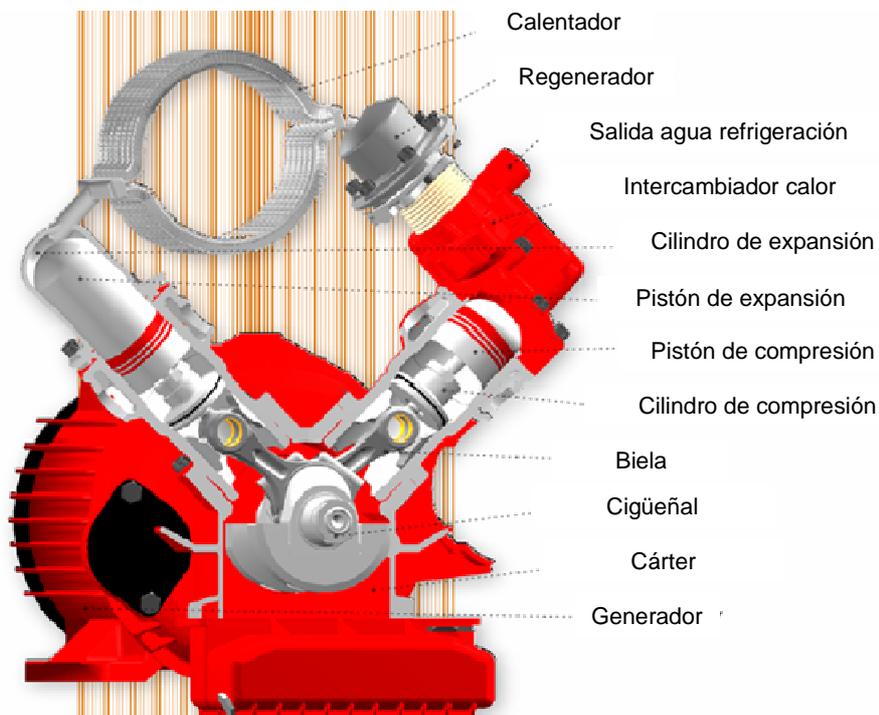


Figura 17 Esquema componentes motor SOLO-161 [25]

## **Cimentación de hormigón**

Uno de los componentes importantes para este tipo de sistema es la cimentación y el sistema de seguimiento. El concentrador está colocado en un soporte giratorio que sigue la radiación solar a lo largo del día. Así, esta radiación se convierte en una mancha solar de dimensiones aproximadas 30\*30 centímetros que incide sobre el receptor. Es importante que la cimentación sea uniforme y consistente para que no se introduzcan fallos en el seguimiento que pueden provocar descensos en la eficiencia (por no aprovechar la radiación normal incidente) así como problemas en los equipos (una mancha solar deslocalizada puede llegar a destruir determinados materiales de la instalación).

La cimentación de hormigón provee el soporte necesario para el sistema Stirling, asegurando la estabilidad de su posición respecto a posibles derivaciones del terreno. Esto es particularmente importante debido a la necesidad de un sistema de seguimiento exacto y fiable. En particular, para la instalación de SBP se han tomado los datos suministrados por la instalación experimental de Odiello, que cuenta con un sistema de disco Stirling SBP del proyecto Envirodish. En esta instalación se utilizó un gran volumen de hormigón (alrededor 240 ton, correspondientes a una plataforma de 9 m de diámetro por 2 m de ancho – considerando densidad del hormigón 1900 kg/m<sup>3</sup>-). Sin embargo, los responsables de dicha instalación han referido una cantidad necesaria en torno a 150 ton, por estar esta instalación sobredimensionada.



Figura 18 Imagen de la estructura de forjado del hormigón [25].

## **Estructura metálica**

La estructura metálica consta del soporte que une el concentrador a la cimentación de hormigón. Es una estructura de acero, con barras de dimensiones 100 mm \* 4-5 mm. Sobre el peso de la estructura se ha encontrado diversa información en cuanto al sistema [31][30]. Para el análisis se ha tomado un valor medio de 3700 kg de acero. Un aspecto particularmente difícil en la realización de este trabajo ha sido la recopilación de información en torno a los componentes. Se han establecido contactos con distintas personas, de instalaciones reales, trabajos de evaluación y con la empresa SBP. Sin embargo, no se ha podido recopilar información exacta al respecto, por lo que se han tomado los datos disponibles y aproximaciones basadas en la información bibliográfica. En la Tabla 5 se presenta un resumen de la información disponible localizada en diferentes fuentes de información.

Tabla 5 Información disponible de sistemas de disco Stirling Información sistemas [28][30][32][28][33][34].

<i>Características concentrador</i>	<i>Número facetas</i>	<i>Área disco (m<sup>2</sup>)</i>	<i>Reflectividad</i>	<i>Peso (kg)</i>	<i>Factor interceptación</i>	<i>Valor pico de densidad energética (kW/m<sup>2</sup>)</i>
SAIC/STM System	16	117.2	0.95	8172	0.9	2500
SBP	12	60	0.94	3980	0.93	12730
SES	82	91	0.91	6760	0.97	7500
WGA 1	32	42.9	0.94	2864	0.99	11000
WGA 2	24	42.9	0.94	2481	0.99	13000
Infinia (Qnergy)	n.d.	35	n.d.	1525	n.d.	n.d.
Cleanergy	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Innova	n.d.	10	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
HelioFocus	219	500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<i>n.d.: no disponible</i>						
<i>Unidad conversión potencia</i>	<i>Diámetro apertura cavidad (m)</i>	<i>Motor / tipo</i>	<i>Número de cilindros</i>	<i>Desplazamiento (cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Fluido de trabajo</i>	
SAIC/STM System	0.38	STM 4-120	4	480	hidrógeno	
SBP	0.15	SOLO 161	2	160	helio	
SES	0.2	Kockums	4	380	hidrógeno	
WGA 1	0.14	SOLO 161	2	160	hidrógeno	
WGA 2	0.14	SOLO 161	2	160	hidrógeno	
Infinia (Qnergy)	n.d.	Infinia / Ricor	1	n.d.	helio	
Cleanergy	n.d.	SOLO 161	2	n.d.	hidrógeno	
Innova	n.d.	Microge n	1	n.d.	n.d.	
HelioFocus	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	vapor	
<i>n.d.: no disponible /n.a: no aplicable</i>						
<i>Información del sistema</i>	<i>Número sistemas</i>	<i>Potencia nominal (kW)</i>	<i>Potencia pico salida (kW)</i>	<i>Eficiencia pico neta (%)</i>	<i>Eficiencia anual (%)</i>	<i>Producción energética anual (kWh)</i>
SAIC/STM System	5	22	22.9	20.0	14.5	36609
SBP	11	10	8.5	19.8	15.7	20252
SES	5	25	25.3	29.4	24.6	48129
WGA 1	1	9.5	11	24.5	18.9	17353
WGA 2	1	8	8	22.5	n.d.	n.d.
Infinia (Qnergy)	145	3.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cleanergy	13	11	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Innova	n.d.	1 kWe – 3 kWt	n.d.	n.d.	13.8% e – 41.4% t	n.d.
HelioFocus	n.d.	A partir de 10 MWe	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

*n.d.: no disponible*

## 2.2.4 Estado de la tecnología

Las instalaciones conocidas hasta la fecha de la tecnología de disco Stirling son a nivel de demostración, por lo que ninguna de ellas se encuentra como instalación operativa en la referencia más actualizada consultada [3].

Sin embargo, sí existe información relacionada con las instalaciones de desarrollo y las planificadas o en construcción, tal como se presenta en la tabla siguiente.

Tabla 6 Plantas en operación, construcción y desarrollo de tecnología de disco Stirling [3] – Marzo 2013-.

<i>Proyecto</i>	<i>País</i>	<i>MWe</i>	<i>Estado</i>
<b>Solar Oasis</b>	Australia	43.50	Desarrollo
<b>HF Orion</b>	China	13.20	Desarrollo
<b>Helios Power</b>	Chipre	50.00	Desarrollo
<b>Maximus</b>	Grecia	75.00	Desarrollo
<b>Bap Project</b>	India	10.00	Planificación
<b>HF Desert Star</b>	Israel	10.50	Desarrollo
<b>HF StarDust 3</b>	Israel	9.50	Desarrollo
<b>Ennex Dish Stirling</b>	Sudáfrica	20.00	Planificación
<b>Casa de los Pinos</b>	España	1.00	Construcción
<b>Tooele Army Depot</b>	EEUU	1.50	Construcción

Además de esta información a nivel internacional, se han identificado otros proyectos de investigación en España, a través de los que se trata de demostrar la viabilidad de la tecnología de disco Stirling.

Por una parte el proyecto Eureka, 5833 Morenergy [35], que la multinacional española, Abengoa lleva a cabo con la empresa israelí Ricorsolar. El proyecto se anunció en junio de 2010, y su finalización estaba planificada en junio de 2013. Su presupuesto es de 2,71 M€. El proyecto está dedicado al desarrollo de una instalación de disco Stirling de 5 kWe, utilizando un nuevo concepto de concentrador, y que incluye la operación en modo híbrido y opción de almacenaje térmico. El sistema utilizará un motor Stirling de pistón libre, diseñado específicamente por Ricorsolar para garantizar la fiabilidad del sistema. El objetivo es garantizar la viabilidad del sistema con una reducción del coste respecto a las tecnologías CSP existentes. Con respecto a las instalaciones fotovoltaicas, se pretende una mejora en cuanto al rendimiento de energía a red, cuyo objetivo se sitúa en torno al 25%. En el proyecto se han previsto dos unidades de demostración, en España e Israel.

Por otra parte, Endesa anunció también en el año 2011 su participación en el proyecto Solardis [36], en el que también se pretende demostrar la viabilidad técnica y económica de la tecnología de disco Stirling. El presupuesto del proyecto, financiado por el Centro de Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) es de 1,7 M€. En él participa Endesa junto a las empresas Alener y Tadarsa. El proyecto prevé la construcción de una planta de demostración en la localidad sevillana de Guillena, junto a la central de Endesa.

A nivel europeo, la empresa Alener participa en el proyecto Biostirling [37] junto con otras 12 empresas europeas (entre las que se encuentra Cleanenergy), de un total de siete países europeos. El presupuesto del proyecto es de 6,1 M€ y su plazo aproximado de ejecución es de 36 meses. En este proyecto se plantea el sistema de disco Stirling como generador de energía para el prototipo SKA, un radio-telescopio de observación que opera continuamente. Así, el sistema de disco Stirling será la fuente de energía que debe garantizar el funcionamiento día y noche. El proyecto prevé la instalación de 15 prototipos de disco Stirling de 10 kWe. De estos 15, 7 prototipos serán híbridos solar-biogás, 3 con sistemas de almacenamiento térmico y 3 híbridos solar-biogás y con almacenamiento térmico.



# 3

## ESTADO DEL ARTE

*Es necesario conocer el estado actual de la tecnología con el fin de identificar cuáles son los aspectos conocidos, y cuáles aquellos sobre los que se necesita ampliar el conocimiento actual.*

Ya que el objetivo de la presente tesis es incidir en los aspectos no desarrollados hasta el momento actual, este capítulo se centra en la recopilación de la información conocida. Así, se realiza una revisión de las instalaciones de disco Stirling sobre las que existe información pública. El objetivo de esta revisión es realizar la selección del sistema en cuestión que se tomará como objeto de estudio. Por supuesto, la accesibilidad a la información sobre sus componentes y operación será clave para determinar esta selección. Aunque se asume desde un primer momento que al ser una tecnología que se encuentra en proceso de desarrollo, la confidencialidad de la información será un factor limitante a la hora de realizar la caracterización de la instalación. Además de la información sobre las instalaciones propiamente dichas, se han buscado trabajos de investigación y desarrollo relativos a esta tecnología. De esta forma se ha identificado que la hibridación es una estrategia con un alto potencial de aplicación en el sistema de disco Stirling. De hecho, hay un número importante de proyectos donde se ha trabajado sobre la definición de receptores híbridos que permitan la captación de energía solar de forma complementaria al aprovechamiento de otra fuente de energía, en particular la provista por la aportación de un combustible a un quemador. La factibilidad de aplicación de hibridación es además un factor diferenciador frente a la tecnología fotovoltaica, lo que puede aumentar el interés de aplicación de la tecnología de disco Stirling. Se determina entonces que un paso importante para el desarrollo de este sistema será la aplicación de hibridación con el fin de aumentar la capacidad de la instalación a la vez que asegura la viabilidad económica de la inversión. Esta conclusión, a la que se llega mediante el análisis del estado del arte, determina el seguimiento del trabajo en la investigación sobre el análisis de operación del sistema hibridado en comparación con el funcionamiento solo solar, que se presentará posteriormente en el capítulo 4, así como la definición de componentes del sistema hibridado, que se presentará en el capítulo 5. La recopilación de información en el presente capítulo servirá también para identificar los datos de entrada a introducir para realizar el análisis de impacto medioambiental mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Otra de las estrategias que pueden considerarse interesantes para aumentar la capacidad de operación del sistema es la aplicación de un sistema de almacenamiento térmico, que realizaría la misma función que la hibridación. El sistema de almacenamiento térmico presenta la ventaja de que no necesita una fuente de energía externa, sino que podría proveer energía adicional mediante el almacenamiento de energía solar excedente en periodos determinados de tiempo. Por este motivo, se presenta también información relativa a estos sistemas de almacenamiento. En cuanto a la determinación del impacto medioambiental de la instalación, se ha considerado relevante identificar los trabajos previos relacionados con esta evaluación. Esto permite realizar un análisis respecto a las herramientas utilizadas, así como sobre los indicadores seleccionados para su caracterización. Se ha encontrado solamente un trabajo que trata específicamente sobre la tecnología de disco Stirling. La información se ha completado con experiencias relacionadas con el impacto medioambiental de otras tecnologías de generación solar. Los valores recopilados servirán como referencia para comparar los valores obtenidos en la aplicación de ACV que se presenta en el capítulo 6.

### 3.1 Instalaciones de disco-Stirling.

La tecnología de disco Stirling ha sido objeto de múltiples proyectos de investigación y desarrollo con instalaciones de demostración apoyadas por diferentes empresas y organismos de investigación en varios países del mundo [32].

En este apartado se va a detallar la información disponible de las empresas que están realizando actualmente la comercialización y desarrollo de esta tecnología. Como se ha referido en el

capítulo anterior, existen varias empresas y organismos que han trabajado en el sistema de disco Stirling. Sin embargo, no todas ellas han apostado por llegar a la industrialización del mismo.

La información pública disponible muestra que son cuatro las empresas que comercializan el sistema de disco Stirling:

- Infinia [32][28]
- Cleanergy AB [30]
- Innova [33]
- HelioFocus [34]

**Infinia** es una organización especialmente dedicada al desarrollo de generadores Stirling de pistón libre, para su implementación en sistemas de aprovechamiento energético solares, de biomasa y de gas natural. Entre su oferta tecnológica está la tecnología de disco-Stirling (PowerDish™), al que definen como “el primer sistema Stirling solar de generación eléctrica diseñado para su fabricación en serie en la industria automotriz, y una distribución modular que va desde pocas unidades a instalaciones de varios megavatios e incluso proyectos de generación solar a escala industrial”. Así, utilizan su motor Stirling patentado acoplado a un disco solar concentrador para generar energía eléctrica que puede ser suministrada a la red. El PowerDish se suministra para instalaciones a pequeña escala, con pocas unidades, hasta para grandes aplicaciones de miles de unidades. El tamaño mínimo de instalación que suministra es de 64 unidades, de forma que establece módulos de 224 kW, escalables proporcionalmente. Cada una de las unidades proporciona 3,5 kW de electricidad [28].

Esta compañía fue fundada en 1985, nombrada como Stirling Technology Corporation (STC), y está ubicada en Utah, EEUU. Los trabajos específicos de desarrollo de la tecnología de disco Stirling PowerDish se iniciaron en el año 2004. Estos trabajos se materializaron en la instalación de 45 unidades en dos localizaciones de Arizona, que actualmente acumulan un periodo de operación de 2 años, con 200000 kWh producidos. El factor de capacidad demostrado de estas instalaciones es del 32%, con una disponibilidad y relación de operación superior al 96%. Además de estas unidades, se han instalado otras 100 en diferentes sitios: Washington, Utah, Nuevo México, California, España e India [28].

Con respecto a las instalaciones que se están realizando actualmente, se ha encontrado la siguiente información [3]:

- 50 MWe en Chipre (Helios Power) y 75 MWe en Grecia (Maximus). Estos proyectos han sido aprobados por la Comisión Europea dentro del programa NER 300. La construcción está prevista para su comienzo en el tercer cuatrimestre de 2013. Esta información apareció en prensa por primera vez en diciembre de 2012. La instalación de Chipre consistirá en 16920 unidades, y la de Grecia en 25160.

Infinia está desarrollando actualmente un sistema de disco Stirling híbrido. En comparación con las tecnologías tradicionales fotovoltaicas, el PowerDish de Infinia permitirá el aumento de la producción mediante un quemador de combustible de biomasa. Defienden una integración sencilla del quemador que permite cambios rápidos y eficientes ante la no disponibilidad de recurso solar [28].

Renovalia Energy [38] ha realizado acuerdos con la compañía Infinia y ha importado a España la tecnología de disco Stirling para la generación eléctrica. Renovalia Energy es una compañía

española productora de energía eléctrica a través de diversas fuentes de energía renovables, en cuya oferta tecnológica se encuentra la energía termosolar. La primera planta con tecnología Infinia es la de Casa del Ángel Termosolar, situada en Casa de los Pinos, Cuenca (España), con una potencia de 1 MW.

Los últimos proyectos anunciados de Renovalia sobre la instalación de 4 plantas de generación eléctrica con esta tecnología, que sumaban un total de 38 MWe, fueron cancelados [3].



Figura 19 Sistema disco-Stirling Infinia [28].

La última información relativa a Infinia (noviembre de 2013) es que ha sido adquirida por Qnergy, una compañía de origen israelí. Qnergy se fundó en 2009 por la empresa Ricor Cryogenic and Vacuum Systems, a empresa líder mundial en pequeños motores Stirling para aplicaciones criogénicas. Actualmente Qnergy desarrolla y fabrica motores Stirling para varias aplicaciones (tales como microgeneración combinada de calor y electricidad y generación solar).

**Cleanergy AB** [30] es una compañía relativamente joven, pero se presenta como uno de los proveedores líderes en la tecnología Stirling solar. Está ubicada en Gotheborg, Suecia.

Cleanergy AB fue fundada en 2008 cuando un grupo de inversores suecos adquirió los derechos del motor Stirling V 161 de la compañía alemana Solo Kleinmotoron GmbH. Así, se transfirieron a Cleanergy las competencias de producto, venta y fabricación, e incluso el personal técnico clave.

Se comercializa la unidad Stirling aislada (Figura 20). Esta unidad puede utilizarse para instalaciones no conectadas a red, tales como en zonas rurales u otras que actualmente utilizan motores diesel como generador. La utilización de disco Stirling permite reducir el coste respecto al aprovisionamiento del combustible necesario para el funcionamiento del motor diesel. La unidad puede completarse con baterías con el fin de proveer energía durante el día completo.

Las primeras unidades de tecnología solar Stirling, dotados con el motor C11S fueron instaladas en España, Corea y China.

Además de las unidades aisladas, Cleanergy puede suministrar parques solares que pueden ir de 10 a cientos de MW (Figura 21). La modularidad es precisamente un punto fuerte de esta tecnología, ya que cada una de las unidades es completamente autónoma.

El primer parque solar de demostración de Cleanergy ha sido instalado en el desierto de Ordos, en Mongolia, China, construido a mediados de 2012.



Figura 20 Sistema disco-Stirling Cleanergy [30].



Figura 21 Parque solar de disco-Stirling Cleanergy [30].

**Innova** [33] es una compañía italiana que desde 2005 se dedica a la energía solar para generación distribuida de electricidad y energía térmica, con sistemas de bajo o nulo impacto medioambiental. Está ubicada en Chieti y Cosenza. Después de cinco años de investigación y acuerdos con proveedores estratégicos, Innova presentó la tecnología TRINUM en septiembre de 2010. Este sistema de disco Stirling genera electricidad (1 kWe) y energía térmica (3 kWt), con un disco de superficie aproximada de 10 m<sup>2</sup>. El motor Stirling es de tipo pistón libre, fabricado por la compañía holandesa Microgen Engine Corporation. Ambas compañías tienen un acuerdo de exclusividad.

TRINUM tiene una eficiencia media anual de 55,2% (13,8 % de eficiencia eléctrica y 41,4% de eficiencia térmica). Comparada con la misma potencia nominal instalada, el sistema puede producir hasta un 40% más de potencia eléctrica que un panel solar fotovoltaico ordinario.



Figura 22 Sistema disco-Stirling Innova [33].

HelioFocus [34] fue fundada en 2007, a partir de IC Green Energy (Israel) y Zhejiang Sanhua (China). Su estrategia se basa en la optimización de costes del sistema. Defiende que dispone del conocimiento industrial de tecnologías ya existentes, fundamentalmente respecto a diseño mecánico y prestaciones ópticas. Con respecto al diseño de la óptica, se especifica que la tecnología utilizada consigue la máxima eficiencia posible con el menor coste, gracias al diseño con estructura de acerco al carbono que soporta una matriz de cristales. La disposición de estos cristales crea la parábola del sistema. La empresa se encarga de la comercialización de plantas desde 10 MWe. En este caso, el motor Stirling no está montado sobre el disco, sino que los discos alimentan vapor para un ciclo termodinámico.



Figura 23 Sistema disco-Stirling HelioFocus [34].

Se han identificado dos proyectos en desarrollo en Israel: HF Desert Star de 10,5 MWe y HF StarDust 3, de 9,5 MWe [3].

Existen otros sistemas de compañías que han trabajado en el desarrollo de la tecnología de disco Stirling. SBP es la empresa que ha participado en los proyectos europeos EURODISH (1998-2001) y ENVIRODISH (2002-2005), para el desarrollo y demostración de esta tecnología, junto con otras empresas e instituciones de investigación europeas, contando además con la participación del CIEMAT, en España. En el ámbito de estos proyectos se instalaron unidades de demostración en diferentes países europeos, tales como Alemania, Italia, Francia y España (Plataforma Solar de Almería – PSA- y Universidad de Sevilla) [39]. Este sistema consistía en una unidad de disco Stirling de 10 kWe con el motor SOLO 161 (de la empresa que ha sido posteriormente adquirida por Cleanergy).



Figura 24 Sistema disco-Stirling SBP [25].

En el capítulo anterior se han introducido las características de diferentes sistemas, donde se incluyen los proyectos de desarrollo. En cuanto al proyecto liderado por SAIC (Science Applications International Corp.) y STM Power Inc, y el coordinado dentro del Cummins Dish-Stirling Joint Venture Program por los asociados en el proyecto WGA, ambos llevados a cabo principalmente en Estados Unidos, no hay información relacionada con la continuación comercial de los mismos.

La empresa SES (Stirling Energy Systems) tuvo como proyectos las plantas mayores de aplicación de la tecnología de disco Stirling (2 instalaciones en California por un total de 1600 MWe). Pero esta compañía fue a la bancarrota en 2011. Según los medios de comunicación, fue debido a la falta de competitividad de la tecnología frente a los decrecientes costes de las instalaciones fotovoltaicas [40]. El sistema de disco Stirling de SBP consistía en unidades de 25 kWe. En 2012 la planta de SES de Maricopa fue adquirida por United Sun Systems, que según la información disponible sigue ofreciendo entre sus productos esta tecnología [41].



Figura 25 Sistema disco-Stirling SunCatcher™ de SES [25].

Dada la información encontrada, que no es muy extensa ni específica, la selección del sistema Envirodish se realiza en base a la disponibilidad de información. Se realiza una visita a la instalación de CNRS-PROMES, donde los responsables de la misma ponen a disposición información no considera confidencial, que ayudará a la identificación y caracterización de componentes, especialmente para el capítulo de Análisis de Ciclo de Vida.

### 3.2 Hibridación aplicada a la energía solar térmica de concentración.

La hibridación, entendida como el uso de varias fuentes de energía en una misma instalación, tiene importantes ventajas tales como adaptar la generación a la demanda de electricidad (flexibilidad), estabilidad de la producción en los transitorios, mayor gestionabilidad, mayor utilización de los equipos de generación eléctrica (amortización) y apoyo en arranques. La hibridación es un concepto que forma parte de las estrategias energéticas a nivel gubernamental [42], ampliamente extendido en diferentes tecnologías, aplicado también a la energía solar térmica. Los primeros conceptos de hibridación solar datan de la década de los 80, cuando el Departamento de Energía de Estados Unidos promovió un programa de repotenciación de plantas de combustible fósil existentes mediante sistemas de receptor central [43]. Debido al desarrollo de las plantas solares termoeléctricas se ha invertido el sentido de la hibridación, donde el sistema de combustión es el que apoya a la planta solar. De hecho, las grandes instalaciones de energía solar térmica en operación, tanto centrales de torre como las de colectores cilindro-parabólicos, disponen ya o están en fase de proyecto para disponer de hibridación. En particular, varias plantas de colectores cilindro-parabólicos con hibridación entrarán en operación comercial en los próximos años [44], estando las de torre central en fase de proyecto (prototipo / demostración –proyectos Solgate, SolHyCo, Solugas [45]). La hibridación en estos casos se realiza con gas natural o biomasa.

La hibridación tiene un papel especialmente relevante en cuanto a utilización de recursos y emisiones contaminantes, cuando se aplica con dos (o más) fuentes de energía renovables [46]. En este sentido, se han realizado interesantes evaluaciones en cuanto a la hibridación de energía eólica con biomasa [47] y energía eólica con solar fotovoltaica [48]. Si tenemos en cuenta el impacto medioambiental de las diferentes energías alternativas, es de especial interés la hibridación de energía solar térmica con biomasa, al ser dos de las energías renovables mejor evaluadas en cuanto a este impacto.

Tanto el motor Stirling por sí mismo como la tecnología de disco-Stirling han sido objeto de diferentes estudios en cuanto a hibridación. En particular, el motor Stirling se ha planteado como complemento a otras instalaciones, tales como un motor Otto convencional [49], células de combustible en sustitución de turbinas de gas [50] o como complemento en los coches eléctricos híbridos [51].

En cuanto a la tecnología de disco-Stirling, el trabajo de desarrollo [32] llevado a cabo por diferentes instituciones y empresas ha incluido ya el diseño de receptores integrados al motor Stirling que permitan el funcionamiento híbrido de la instalación, bien con gas natural o con biomasa (preferentemente biogás). La hibridación es, en sí misma, un importante potencial para la reducción de costes [52] de una tecnología que es, como se ha mencionado previamente, la de mayor eficiencia en relación a la generación de energía solar.

Surge así el concepto de receptor híbrido, donde se produce el aporte térmico a la instalación tanto de origen solar como de combustión, simultánea o alternativamente. El desarrollo de un receptor híbrido así entendido es complejo desde el punto de vista técnico en cuanto a la integración en el sistema, pero es ventajoso frente a la hibridación con un equipo independiente al receptor de la instalación si consideramos que se reduce la problemática asociada a la operación y mantenimiento. El receptor híbrido también puede funcionar como amortiguamiento de las condiciones de exposición en los transitorios, facilitando la gestión del mismo.

También se han desarrollado receptores híbridos para plantas termosolares de receptor central. Cabe destacar el proyecto Sirec [39], finalizado en 2001, donde se definió conceptualmente un receptor solar híbrido y las diferentes posibilidades de integración: caldera de gas natural, combustión con gas natural y ciclo combinado.

Para sistemas de disco-Stirling, como se ha indicado anteriormente, se han desarrollado dos tipos distintos de receptores: los de tubos directamente iluminados, donde la radiación solar incide directamente sobre las superficies en cuyo interior se encuentra el fluido de operación del motor Stirling, o de reflujo (tipo “heat pipe”), donde existe un fluido portador de calor intermedio entre la fuente de energía y el fluido del motor Stirling, normalmente compuestos de sodio y/o potasio fundido. Este último tipo de receptores suponen una mejora en cuanto a durabilidad y eficiencia del motor, por las restricciones mecánicas y de diseño que provoca la falta de uniformidad de temperatura en el material de los receptores de tubos directamente iluminados, pero suponen a su vez un desarrollo más complejo.

### 3.2.1 Experiencias en el sistema de disco Stirling

Los proyectos de hibridación conocidos comenzaron a desarrollarse en 1981. Si se centra el análisis sobre los desarrollos a partir del año 1995, los proyectos más destacados son los siguientes: para tubos directamente iluminados el SAIC/STM Sundish System (1999-2000) [53], el Biodish (2000-2003) [32] y la propuesta HYPOWER de 2005, que por diferentes motivos no llegó a realizarse. Para receptores de reflujos, son el HYPHIRE (1997-2000) [54][55], y el receptor híbrido de Sandia (1995-2002) [56].

A continuación se incluye información más detallada de estos receptores:

- **SAIC/STM Sundish System (receptor de tubos directamente iluminados)**

Empresas participantes: SAIC (Science Applications Corp.) y STM (Stirling Thermal Motors).

Instalación de un sistema de disco-Stirling en un vertedero para el aprovechamiento de biogás en periodos nocturnos. El motor utilizado es el modelo STM 4-120, de 4 cilindros en configuración cuadrada, funcionando con hidrógeno. El receptor tiene forma de cono truncado, compuesto por un banco de tubos metálicos finos paralelos. Como se puede apreciar en la Figura 26, la energía solar se recibe por la parte interior del cono, mientras que la de la combustión se sitúa en la parte contraria. En la apertura del cono se sitúa un dispositivo para proceder a su cerramiento en el caso de operación con el biogás. Para su operación en modo combustión, se introduce aire ambiente que es precalentado con los propios gases de escape, y posteriormente mezclado con el combustible en los quemadores. Los principales problemas asociados al funcionamiento con el biogás han sido la falta de uniformidad en su composición, lo que hizo necesaria la monitorización del contenido de metano, así como ajustes precisos del caudal y presión del mismo. También el ensuciamiento provocado por la combustión hizo necesaria la colocación de un filtro en la línea de aprovisionamiento del gas. El proyecto de demostración tuvo una operación de un total de 600 horas en modo híbrido.

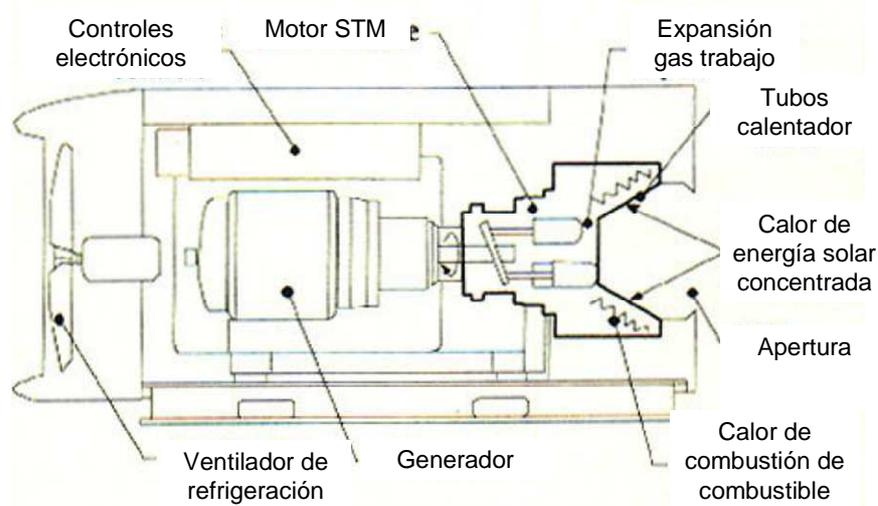


Figura 26 Esquema sistema SAIC/STM Sundish [53].

- **Biodish (receptor de tubos directamente iluminados)**

Proyecto cofinanciado por el V Programa Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Unión Europea, y llevado a cabo por la Universidad de Karlsruhe, Siamant GmbH&Co, DLR-PSA, Sistemas de Calor S.A. y Caja Rural de Almería.

En este proyecto, se realizó un análisis económico para analizar la viabilidad de una planta con un número entre 50 y 100 discos Stirling hibridados, en combinación con una gasificadora de biomasa.

El receptor es de material cerámico, absorbiendo por la cara interna la radiación solar (en el dibujo, interior de la semiesfera) y por la otra el calor procedente de un quemador de flujo rotacional (tipo “swirl”). Se contempla que el receptor pueda funcionar absorbiendo calor por uno de los lados o por ambos de forma simultánea. La novedad principal de este receptor es el material, carburo de silicio (SiC) reforzado con fibra de carbono, con el fin de soportar las altas presiones internas propias del motor Stirling (hasta 150 bar). La principal problemática asociada a este diseño es la complejidad del sistema de fabricación, así como el alto coste de este tipo de receptor.

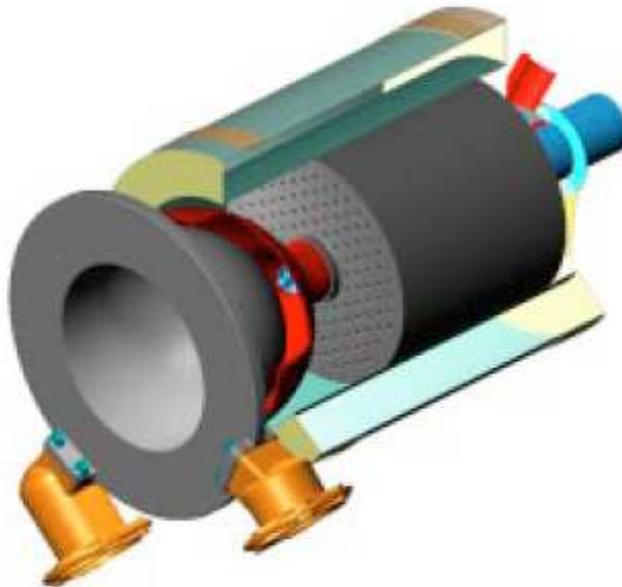


Figura 27 Imagen receptor Biodish [32].

- **Propuesta HYPOWER (receptor de tubos directamente iluminados)**

Propuesta de proyecto presentada a INCO dentro del marco de “medidas específicas en apoyo de la cooperación internacional”, que no llegó a realizarse. El consorcio estaba formado por: DLR, UAE, UERLN, SBP, CNRS, ENREA, AICIA y AES. El objetivo era la aplicación de un sistema de generación solar híbrido para electrificación rural.

El diseño preliminar consta de un receptor de tubos directamente iluminados que recibe por un lado la radiación solar a través de la cavidad, y por otro la energía procedente de un quemador radiante. El hecho de que el quemador sea radiante hace similares las dos fuentes de energía en el receptor, por lo que su diseño se simplifica.

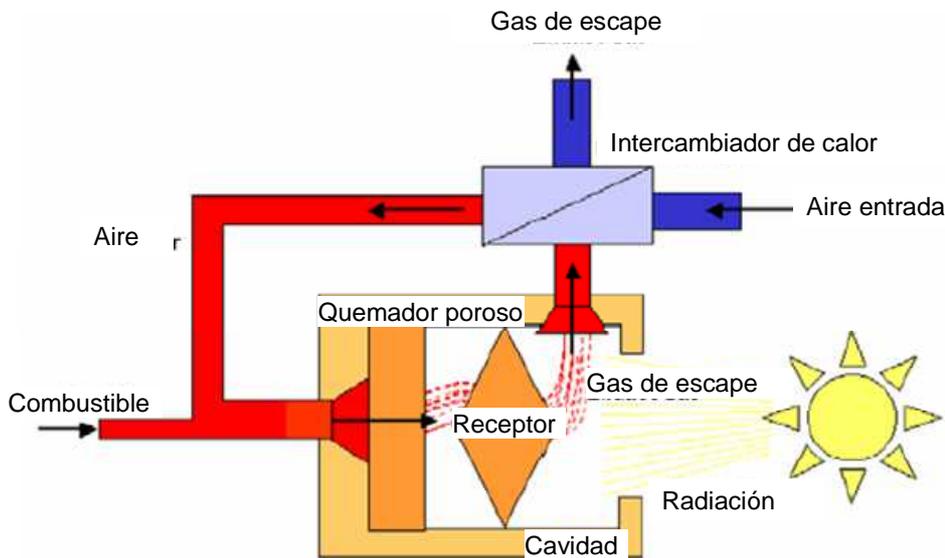


Figura 28 Esquema propuesta HYPOWER.

- **HYPHIRE (receptor de reflujo)**

Proyecto cofinanciado por la Comisión Europea, con la participación de DLR, Intersol, CIEMAT, SBP, Universidad de Stuttgart, e IKE.

En este sistema de disco Stirling (con motor SOLO-161), se utilizó un receptor tipo “heat pipe” de sodio, para trabajar a una temperatura entre 700 y 850°C del vapor de sodio. El receptor consta de 3 superficies de intercambio térmico: la interior con la energía solar, exterior con la combustión del gas y la salida de calor al intercambiador del motor Stirling. La parte de intercambio con la combustión del gas está provista de aletas para garantizar la transferencia térmica de la corriente caliente de gases procedentes de la combustión.

Este sistema puede funcionar aislada o simultáneamente con las dos fuentes de energía: solar y combustión. En la práctica, el receptor ha sido probado en las instalaciones de la Plataforma Solar de Almería (PSA), con una duración de 117 horas en modo solar, 92 horas en modo combustión y 56 horas de funcionamiento simultáneo.

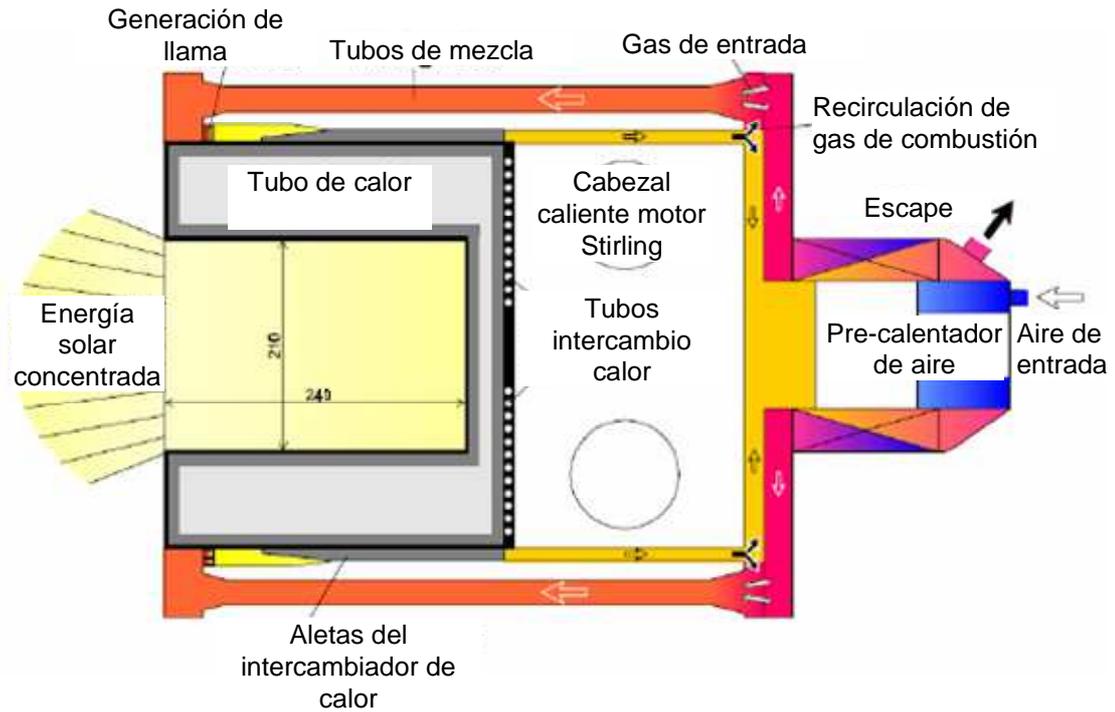


Figura 29 Esquema receptor HYPHIRE [54].



Figura 30 Imagen receptor HYPHIRE [54].

▪ **Sandia (receptor de reflujo)**

El laboratorio Sandia, del Departamento de Energía de EEUU, desarrolló un receptor híbrido tipo “heat pipe” de sodio.

En este caso, también se integra la energía solar con un sistema de combustión de gas que libera energía a través de un quemador de matriz metálica. Este quemador emite calor por radiación al receptor, de forma que para ambos modos de funcionamiento la temperatura del vapor de sodio está alrededor de 750°C. Al igual que en el caso anterior, el receptor “heat pipe” transfiere calor a los tubos del intercambiador del motor. La superficie de intercambio con los gases de

combustión consta además de aletas para mejorar la transferencia térmica. Esto puede apreciarse en las figuras siguientes (Figura 31, Figura 32 y Figura 33) (detalle).

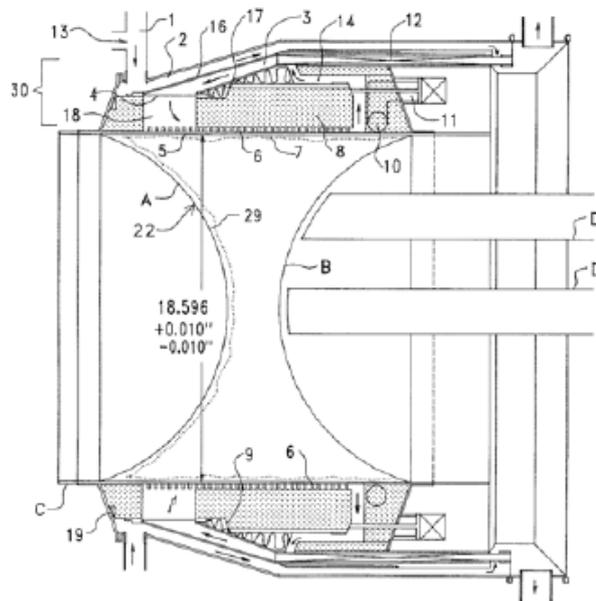


Figura 31 Esquema receptor Sandia [56]

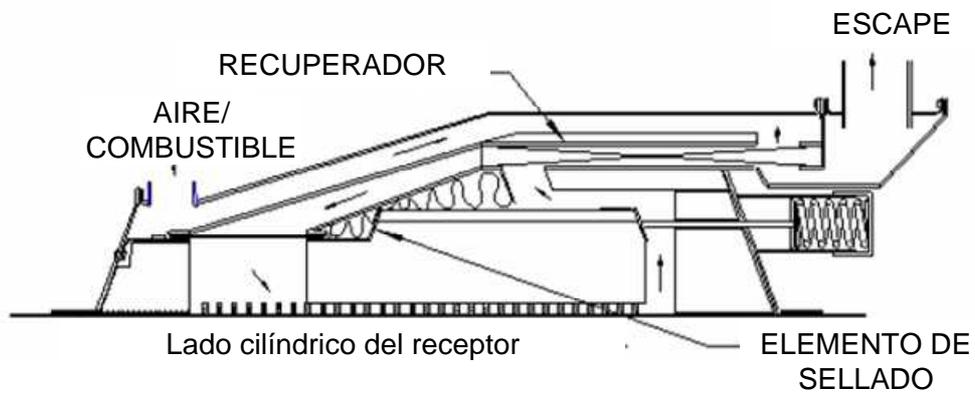


Figura 32 Detalle del esquema receptor Sandia [56].

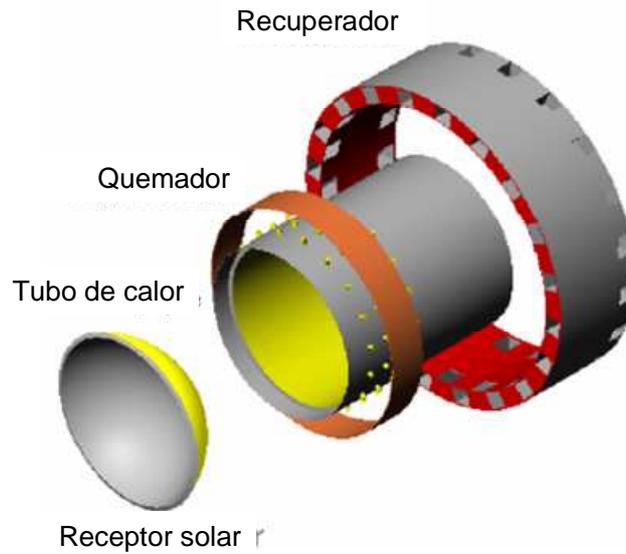


Figura 33 Representación receptor Sandia [56].

En alguno de los proyectos anteriormente mencionados, hay información específica sobre las particularidades del quemador. En concreto, se nombra un quemador de flujo rotacional y quemadores radiantes. La elección del tipo de quemador puede determinar el diseño de otros componentes, especialmente el del receptor, que es el intercambiador de calor que recibe la energía liberada por dicho quemador. Los quemadores se clasifican de acuerdo a diferentes criterios [57]. En función de la presión de alimentación del elemento oxidante, se habla de quemadores atmosféricos o de sobrealimentación. El momento en el que se realiza la mezcla del oxidante y del combustible determinará si el quemador es de premezcla. Esta premezcla se utiliza especialmente en los quemadores radiantes, donde no se produce una llama de difusión, sino que la combustión se produce en zonas muy cercanas a la pared del quemador. Así, la energía de esta combustión se libera por la radiación provocada por la alta temperatura del material. En el caso de quemadores radiantes, hay que tener en cuenta que son más proclives a retrocesos de llama y explosiones que podrían dañar el sistema.

Tabla 7 Tipos de quemadores en función de características de la combustión.

<i><b>Criterio de clasificación</b></i>	<i><b>Designación quemador</b></i>		<i><b>Consideraciones</b></i>
<b>Presión alimentación</b>	<i>Atmosférico</i>	<i>Sobrealimentación</i>	<i>Sobrealimentación mejora el rendimiento de la combustión</i>
<b>Mezcla oxidante - combustible</b>	<i>Mezcla en cámara de combustión</i>	<i>Premezcla</i>	<i>Premezcla mejora el proceso de combustión</i>
<b>Tipo de combustión</b>	<i>Llama de difusión</i>	<i>Radiante</i>	<i>Radiación es similar a la energía solar / mayor complejidad del diseño</i>

También el tipo de combustible debe ser considerado. Esto determina la clasificación del tipo de quemador, diferenciándose entre quemadores gaseosos, líquidos o sólidos. A este respecto, el estado gas del combustible favorece la mezcla con el oxidante por lo que mejora la combustión, tanto en energía liberada como en emisiones. En el caso de los combustibles líquidos se debe realizar la vaporización del mismo para la fase de combustión, lo que hace más complejo el sistema. Los combustibles sólidos presentan mayor dificultad para realizar la combustión completa debida a su estado, dependiendo además del nivel de agregación del sólido.

Otro aspecto a tener en cuenta para el sistema de disco Stirling híbrido, donde se privilegian los combustibles procedentes de biomasa con el fin de combinar dos fuentes de energía renovables, es el ensuciamiento que será previsiblemente más crítico para los combustibles líquidos y especialmente para los sólidos.

Tabla 8 Características de la combustión en función del tipo de combustible.

<i><b>Tipo de combustible</b></i>	<i><b>Ventajas</b></i>	<i><b>Desventajas</b></i>
<b>Gas</b>	<i>Buenas características de combustión</i>	<i>Disponibilidad de biogás</i>
<b>Líquido</b>	<i>Buenas características de combustión con vaporización</i>	<i>Necesario proceso de vaporización. Ensuciamiento</i>
<b>Sólido</b>	<i>Disponibilidad de biomasa en estado sólido</i>	<i>Disminuye eficiencia combustión. Ensuciamiento crítico.</i>

En cuanto a la geometría del quemador, se distingue básicamente en formas rectangulares o redondas, siendo estas últimas preferidas debido a la facilidad de fabricación y a la eliminación de esquinas que pueden representar puntos de fallo del quemador. En otra disposición geométrica, el quemador también puede disponerse en forma concéntrica respecto a la carga a la que transfiere la energía.

El movimiento del fluido en el proceso de la combustión debe ser también considerado. Así, se pueden imponer flujos turbulentos (“swirl” o flujo rotacional) de forma que las características de la llama vienen influenciadas por esa turbulencia, en comparación con la llama laminar. El nivel de turbulencia, baja o alta, también determinará las condiciones de la combustión. Existen quemadores de baja turbulencia con características de llama especialmente diseñados para quemar mezclas pobres con alta eficiencia y bajos niveles de emisiones [58].

En cuanto a la constitución del quemador, el material de construcción del quemador puede ser metálico o cerámico. Ambos pueden soportar las altas temperaturas de combustión, siendo el material cerámico el que muestra mayor estabilidad mecánica a pesar del inconveniente de su fragilidad.

### **Otras experiencias en hibridación con motor Stirling.**

Además de los proyectos anteriormente referidos desarrollados específicamente en instalaciones de disco-Stirling, se han realizado otros trabajos de evaluación por parte del National Renewable Energy Laboratory (United States) para desarrollar quemadores radiantes, metálicos o cerámicos, aplicados a sistemas Stirling híbridos[59][60], de forma que la fuente secundaria de energía (en este caso, combustibles fósiles), proporcione energía radiante de la misma forma que la mancha solar. Esto podría suponer una considerable ventaja en el diseño, al hacer semejantes las fuentes de calor en cuanto a la forma en que llega al receptor, tal como se ha señalado en la propuesta HYPOWER.

Cabe destacar que el motor Stirling se ha planteado también para utilizar exclusivamente energía procedente de biomasa para la generación distribuida [61][62][63]. Así pues, parece factible y muy interesante el desarrollo de tecnologías que permitan la hibridación de energía solar térmica a partir de disco-Stirling con biomasa, del que existen ya precedentes que se han presentado en este documento.

### **Patentes de receptores híbridos aplicados a tecnología solar.**

Las patentes identificadas con receptores híbridos aplicados a energía solar son las siguientes:

- **United Stirling Inc. (1986): US4602614**

Esta patente presenta un receptor de tubos directamente iluminados, integrado en una carcasa de forma que la energía solar o procedente de la combustión es absorbida por el mismo y transferida al fluido de trabajo del motor Stirling. Los tubos están organizados de forma cónica. La carcasa tiene una apertura por donde entra la radiación solar a los tubos, cubierta por una ventana transparente que impide el escape de los gases de combustión. El sistema de combustión consiste en varios quemadores distribuidos radialmente en las paredes de la cavidad. Los gases de combustión pasan a través del conjunto de tubos, que están convenientemente espaciados para permitir el flujo de gas. De esta manera los gases transfieren calor a los tubos del receptor. El sistema consta también de un precalentamiento del aire de entrada, usando el calor de los gases de salida [64].

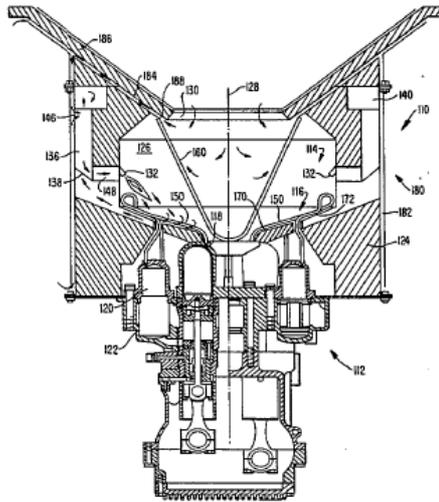


Figura 34 Representación receptor híbrido patente US4602614 [64].

- **Midwest Research Institute (2002): US2002059798**

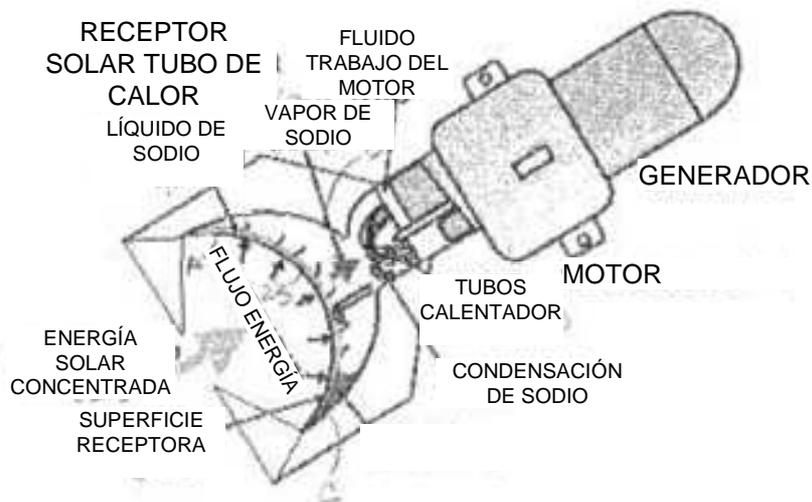


Figura 35 Representación receptor híbrido patente US2002059798 [65].

El receptor solar es de reflujo (“heat pipe”). El receptor está integrado en una cavidad que recibe la radiación solar concentrada por un lado, y por otro dispone de un sistema de combustión para combustibles fósiles. Este sistema de combustión está integrado en la cavidad, de forma que permita la operación simultánea con el modo solar. Además, dispone de una cámara de premezcla de aire y combustible, una camisa de enfriamiento exterior para realizar enfriamiento, un recuperador de energía de gases de escape para precalentamiento de la mezcla, una cámara de quemador y un quemador metálico poroso en forma cilíndrica. La superficie de intercambio térmico con el proceso de combustión dispone de aletas, de forma que permite un

mejor aprovechamiento de la energía producida. Cuenta además con sistemas de direccionamiento y válvula del gas de combustión con el fin de limitar la temperatura antes de la combustión, evitando así el inicio de la misma fuera del punto óptimo de funcionamiento [65].

Existen además otras dos patentes recientes relativas a receptores de disco Stirling no híbridos:

- **Abengoa / Universidad de Zaragoza: Patente mundial WO2011/151488. Receptor cóncavo para disco Stirling y método de fabricación [66].**

En este tipo de receptor los tubos forman una superficie cóncava sobre la que se concentran los rayos solares recibidos. Los colectores están soldados a dichos tubos de forma que dirigen el fluido a/desde los depósitos de gas desde/a los tubos. Los depósitos de gas están asimismo unidos a unos domos que son la interfaz con el motor Stirling. En el diseño los tubos (10, 11) se extienden de un colector (2) a otro (2), y se unen a ellos perpendicularmente, tal como se muestra en la Figura 36. Los tubos tienen una parte curva y una parte recta un su trayectoria entre los colectores. El receptor que consta como anterioridad es el correspondiente al utilizado en el motor SOLO-161, y se muestra en la Figura 37.

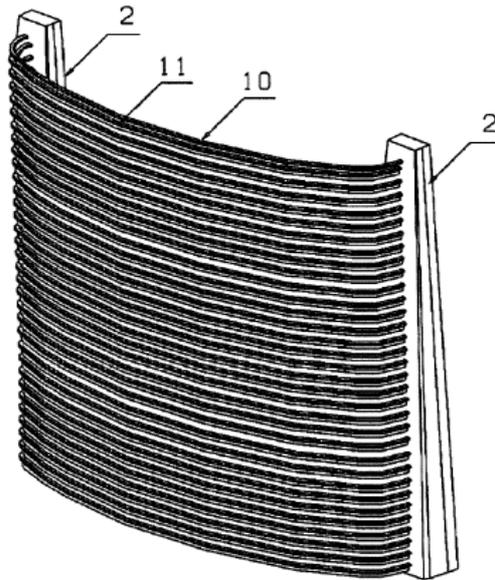


Figura 36 Diseño receptor cóncavo [66]

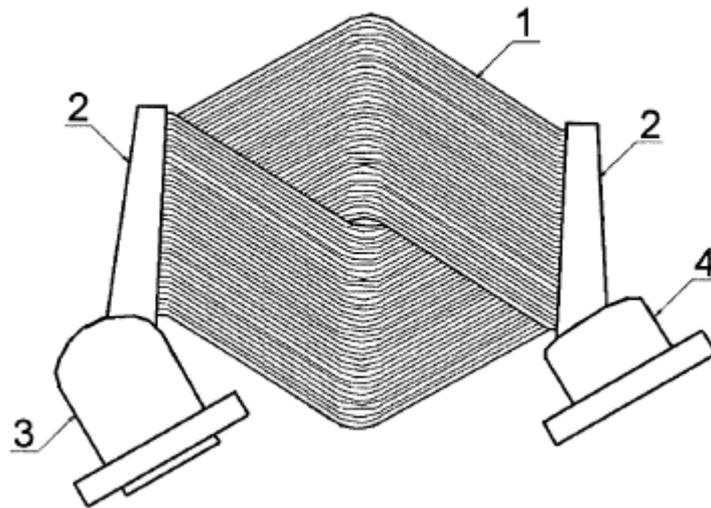
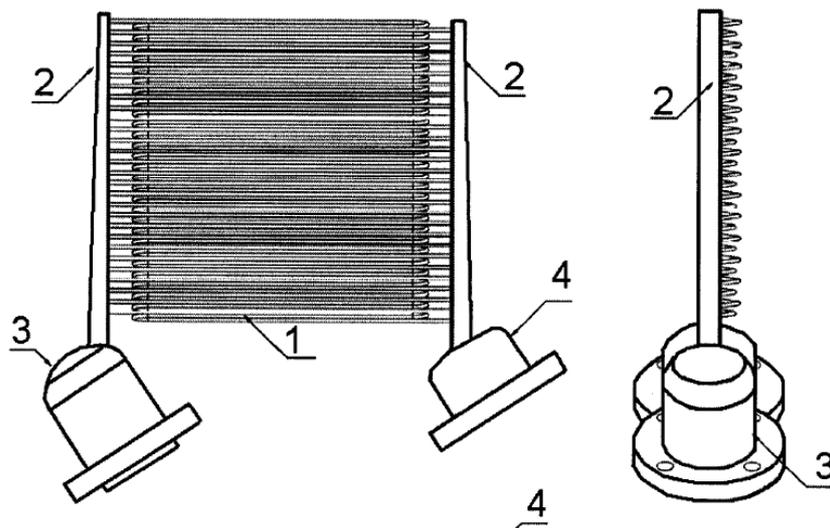


Figura 37 Diseño del receptor del motor SOLO-161 [66].

- **Abengoa / Universidad de Zaragoza: Patente mundial WO2012/001183. Receptor con tubos plegados para un disco Stirling y método de fabricación [66][67].**

La patente se refiere a un receptor con tubos doblados para un disco Stirling, cuyos componentes principales son: tubos, colectores, depósitos de gas y domos. Los tubos (1) entran y salen perpendicularmente a los colectores (2). Cada tubo consiste en dos partes semi-circunferenciales y tres partes rectas (11) paralelas entre sí, con una parte recta entre las dos partes curvadas y las otras dos partes rectas entre una parte curvada y el colector.



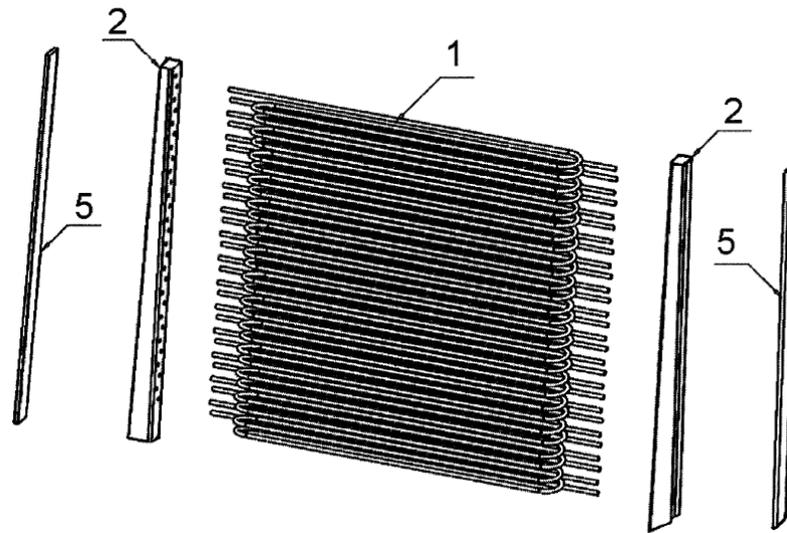


Figura 38 Diseño del receptor con tubos plegados [67].

Tras el análisis de la información localizada relativa a las experiencias de hibridación de la tecnología de disco Stirling, queda patente que se han analizado soluciones diversas para su implementación. Sin embargo, a día de hoy, no se conoce la solución que podría ser adoptada en los sistemas comerciales. Posiblemente esta solución sea conocida cuando una de las empresas dedicadas a la comercialización de la tecnología lance al mercado el disco Stirling híbrido. La información pública al respecto pone de manifiesto que no se trata de un asunto técnico de solución evidente. Si bien el concepto de hibridación no supone un gran reto técnico, es decir, disponer de un intercambiador que reciba energía de dos fuentes distintas, las particularidades de operación del disco Stirling añaden un añadido de complejidad tecnológica. Por un parte, la integración del sistema híbrido en un espacio relativamente reducido y cuya geometría debe ajustarse a los elementos de recepción solar, que son además móviles, Por otra parte, el funcionamiento intermitente debido a la hibridación del recurso solar presenta exigencias específicas en cuanto a su funcionamiento, asociadas especialmente a fiabilidad.

Entre las dos alternativas sobre las que se ha trabajado en los distintos proyectos conocidos entre 1985 y 2005, receptores híbridos de tubos directamente iluminados y tipo “heat pipe”, no se vislumbra un claro posicionamiento favorable a una y otro. Por supuesto, la tecnología de tubos directamente iluminados es más sencilla desde el punto de vista constructivo, ya que se trata de un intercambiador con tubos en cuyo interior circula el fluido del motor Stirling. Ahora bien, tiene la particularidad de que la mancha solar impacta directamente sobre el material, produciendo solicitaciones importantes dado el perfil de temperaturas asociado a esta mancha. Es precisamente de este tipo de receptor del que ha aparecido información pública más reciente [66][67]. Sin embargo, el receptor tubo “heat pipe” podría solventar ciertos aspectos de los receptores de tubos directamente iluminados, como la aparición de puntos calientes, además de ayudar en la regulación debida a la inercia de operación del fluido interior del elemento. El principal inconveniente de esta tecnología viene dado por los problemas de estanqueidad asociados y la correcta distribución del fluido caloportador.

Se ha considerado que la determinación de la utilización de la tecnología “heat pipe” requiere de un desarrollo específico, donde se determine el tipo de receptor, así como de experimentación asociada para determinar la fiabilidad de su comportamiento. Así, en la presente tesis se ha seleccionado la tecnología de receptor de tubos directamente iluminados para el análisis del pre-diseño. Existe suficiente información que justifica la viabilidad de esta tecnología ya que los sistemas comerciales conocidos la utilizan, tal como el sistema Cleanergy con la implementación del motor C11S.

### 3.3 Almacenamiento térmico

La aplicación del almacenamiento térmico permite guardar energía cuando ésta no es necesaria para el funcionamiento de la instalación, de forma que esté disponible en el momento oportuno, bien sea en fases de transitorios, arranques o cuando no se dispone de una fuente de energía en periodos de funcionamiento (en el caso de energía solar, en días nublados o en periodo nocturno).

El almacenamiento térmico se lleva a cabo con materiales de cambio de fase (PCM –Phase Change Materials), de forma similar al utilizado en los sistemas de reflujo (“heat pipes”). Así, el sistema de almacenamiento térmico asociado al funcionamiento de un sistema de disco-Stirling, podría instalarse como un sistema aislado, o integrado con el receptor de reflujo en caso de que esta sea la tecnología utilizada para el receptor del disco-Stirling. Tanto en un caso como en otro, habría que gestionar este sistema para que almacene energía durante determinadas fases de operación para liberarla en otras donde sea necesaria.

En cuanto a los fluidos a utilizar, hay experiencias relacionadas con el motor Stirling en otras aplicaciones con fluoruro de litio [68][69] y para hidruros de magnesio [70]. En el congreso de Clean Technology de 2009 [71] se presentó un motor Stirling de baja temperatura – SolarHeart™ Engine- para la conversión de fuentes de calor de temperatura en torno a 100-300°C, incluyendo térmica solar, geotérmica y flujos residuales industriales. La instalación integraba colectores solares en techo (SolarFlow™ System) con un tanque de almacenamiento térmico.

En general, para la selección del material hay que tener en cuenta la alta temperatura a la que trabajan estos sistemas [72]. Un factor fundamental para el diseño del sistema de almacenamiento térmico es la temperatura nominal del material, así como la capacidad térmica, aunque hay otros criterios a considerar, tales como el balance coste-beneficio y otros criterios técnicos y medioambientales. El coste depende fundamentalmente del mismo material de almacenamiento y del intercambiador de calor para la carga y descarga del sistema. En cuanto a aspectos técnicos: alta densidad energética, buen coeficiente de transferencia (eficiencia), estabilidad mecánica y química (para soportar los ciclos de carga y descarga térmica), compatibilidad con otros materiales, reversibilidad de los ciclos de carga y descarga, baja pérdida térmica y facilidad de control. Los sistemas de almacenamiento de alta temperatura utilizados en plantas solares térmicas pueden ser activos o pasivos. Los activos están caracterizados porque el intercambio térmico se produce por convección forzada cuando el material, almacenado en un tanque, circula por un intercambiador de calor para realizar la transferencia térmica. En los sistemas pasivos hay otro fluido para la transferencia térmica que pasa por el almacenamiento para la carga o descarga térmica. Se ha realizado una clasificación general de fluidos potencialmente utilizables como material de almacenamiento térmico en un

rango de temperaturas cercanas a las que aparecen en el sistema Stirling, que se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9 Sustancias potencialmente utilizables como material de almacenamiento térmico en la instalación de disco Stirling. Extracto de referencia [72].

<i>Compuesto</i>	<i>T<sup>a</sup> fusión</i> (°C)	<i>Energía</i> <i>cambio de</i> <i>fase (kJ/kg)</i>	<i>Densidad</i> (kg/m <sup>3</sup> )	<i>Calor</i> <i>específico</i> (kJ/kgK)	<i>Conductiv.</i> <i>térmica</i> (W/mK)
AlSi <sub>12</sub>	576	560	2700	1,038	160
AlSi <sub>20</sub>	585	460	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
MgCl <sub>2</sub>	714	452	2140	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
80.5%LiF	767	790	2100/2670 /f.	1.97/1.84	1.7/5.9
19.5%CaF <sub>2</sub>			<i>líquida</i>	<i>/f. líquida</i>	<i>/f. líquida</i>
<b>eutéctico</b>					
NaCl	800	492	2160	<i>n.d.</i>	5
	802	466.7			
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -	500-850	<i>n.d.</i>	2600	<i>n.d.</i>	5
<b>BaCO<sub>3</sub>/MgO</b>					
LiF	850	1800	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
		(MJ/m <sup>3</sup> )			
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	854	275.7	2533	<i>n.d.</i>	2
KF	857	452	2370	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	897	235.8	2290	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>

*n.d.: no disponible*

Se conoce también que tanto Stirling Energy Systems como Infinia, en Estados Unidos, están trabajando sobre la integración del almacenamiento térmico con los sistemas de disco-Stirling. En concreto, Infinia ha iniciado un proyecto financiado por el DOE (Department Of Energy) de Estados Unidos con este fin, donde se utilizarán de 40 a 50 discos de demostración en las instalaciones de Sandia. De hecho, Infinia ha realizado una patente (referencia WO2010006319 de 2010) [73].

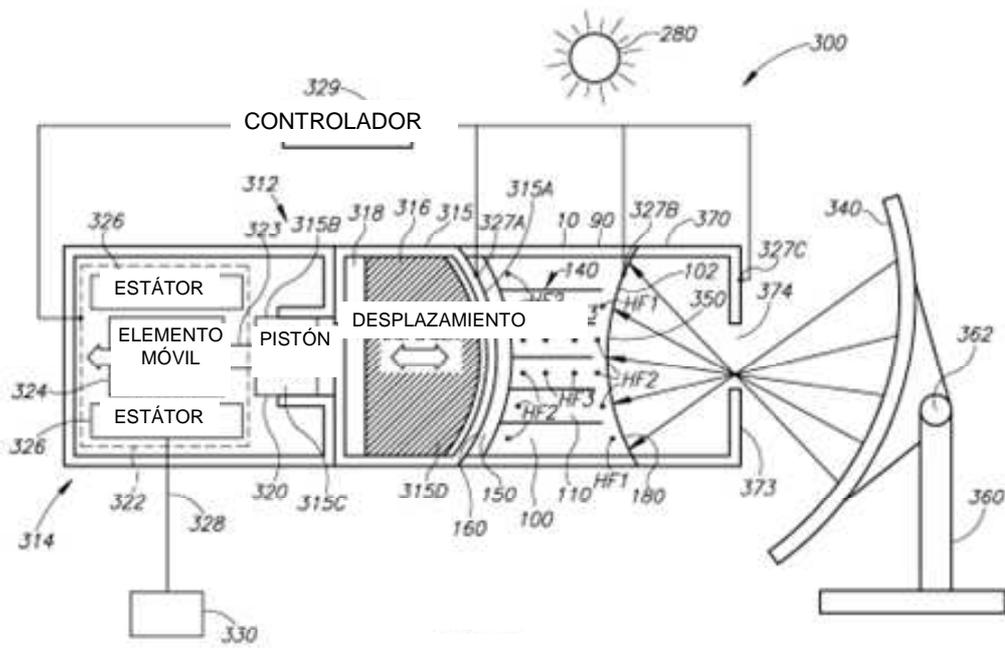


Figura 39 Representación patente WO2010006319 [73].

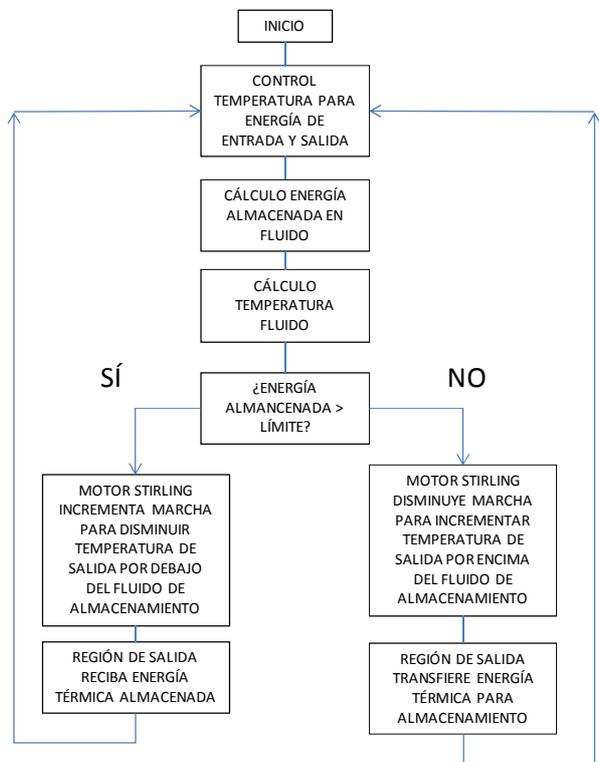


Figura 40 Diagrama funcionamiento sistema WO2010006319 [73].

Esta patente presenta un dispositivo para almacenamiento de energía térmica. Consiste en un recipiente que contiene un volumen continuo de material de almacenamiento térmico, con una zona de entrada y otra de salida para el flujo de calor, y una serie de componentes diseñados para realizar el flujo de energía (tipo receptor de reflujo). La zona de entrada recibe energía térmica desde una fuente externa. Esta energía es transportada por uno o más de los elementos caloportadores hasta la zona de salida y / o al material de almacenamiento térmico. Uno o más de estos elementos caloportadores conectados a la zona de salida son encargados de transportar la energía directamente desde la zona de entrada o desde el material de almacenamiento térmico. También hay elementos caloportadores que transfieren la energía térmica desde la zona de almacenamiento hasta la zona de salida en el momento en que esta energía es requerida. Los diferentes elementos de transferencia térmica pueden estar aislados entre sí con el fin de limitar la transferencia de calor entre ellos. La zona de salida está conectada a un sistema, tal como un motor Stirling, de forma que la energía térmica se transfiere al mismo. En la Figura 40 se presenta un posible procedimiento de funcionamiento del sistema, que ha de estar regulado por un sistema de control. En el caso del sistema de disco-Stirling, almacenaría la energía procedente de los rayos solares, aunque puede funcionar con una amplia variedad de fuentes de energía como combustión o geotérmica. En esta patente, se trata el tema de la selección del material de almacenamiento, que debe basarse principalmente en la correspondencia del punto de fusión a la temperatura de aplicación. Así, el material utilizado debería tener una alta temperatura de cambio de fase, así como un elevado valor de calor latente de fusión. Este es el caso de las sales eutécticas, tales como  $\text{LiF/NaF/MgF}_2$ ,  $\text{LiF/NaF}$  y  $\text{NaF/NaCl}$ . Otros materiales que tienen una alta capacidad de almacenamiento son, por ejemplo,  $\text{Li}$ ,  $\text{LiOH}$ ,  $\text{LiH}$ ,  $\text{LiF/CaF}_2$ ,  $\text{LiF}$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{CaF}_2$  y  $\text{MgF}_2$ . En la descripción de la patente, se cita como un material deseable para aplicación en motores Stirling, el hidruro de litio ( $\text{LiH}$ ), debido a su energía específica (fusión) y a la energía disponible sobre el rango de temperaturas de trabajo propio del Stirling (de 500 a 1000°C). También el  $\text{LiF}$  presenta unos valores apropiados, ya que tiene la mayor densidad de energía sobre el rango especificado de trabajo. La sal eutéctica  $\text{LiF/NaF/MgF}_2$  presenta valores similares para funcionamiento con el motor Stirling. Sin embargo, la utilización de compuestos simples como el  $\text{LiH}$  o  $\text{LiF}$  puede presentar ventajas en cuenta a su preparación y utilización. Además, el  $\text{LiH}$  presenta la ventaja de tener menor peso respecto a los otros dos compuestos seleccionados para la aplicación Stirling. También hay que tener en cuenta para la selección del material de almacenamiento las cuestiones relativas a la seguridad. En general, las sales de flúor ( $\text{LiF}$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{MgF}_2$ ,...) son razonablemente seguras para su uso y manipulación en la mayoría de los ambientes. Sin embargo, algunas de ellas tienen un grado de peligrosidad o toxicidad relativo, especialmente cuando están en forma de grano, aunque éste no es el estado en el que estarían cuando son utilizadas como material de almacenamiento térmico. Las condiciones de almacenamiento deben prevenir la formación de otros compuestos tales como fluoruro de hidrógeno o ácido fluorhídrico, evitando la exposición a temperaturas por encima de las de diseño y al agua. Otro aspecto a tener en cuenta es que se debe garantizar una corrosión mínima del recipiente que contiene a los materiales de cambio de fase, para evitar reacciones y escapes. En particular, el  $\text{LiH}$  es el compuesto de mayor peligrosidad debido a su alta reactividad con agua que resulta en la producción de gas de hidrógeno altamente inflamable y sólidos muy irritables. Sin embargo, por sí mismo, el  $\text{LiH}$  es muy estable y no se descompone en el rango de temperaturas de trabajo antes mencionado. De hecho, este material ha sido muy utilizado en diferentes experiencias sin incidencias [73].

El sistema de almacenamiento térmico presentado en esta patente puede funcionar en combinación con configuraciones de hibridación de forma que haya dos formas de energía diferentes en el sistema.

Infinia ha trabajado además en un proyecto para la definición de un sistema de almacenamiento sin mantenimiento para el disco Stirling, según la información recogida en la página web del Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE), bajo la iniciativa Sunshot [74]. La última actualización de la información relativa a este proyecto es de 2012. Se nombra como una ventaja relativa al coste futuro de la generación con la tecnología de disco Stirling, así como una diferencia positiva frente a la tecnología fotovoltaica.

Otra patente de 2008 (DE102006061509) –individual- presenta un diseño híbrido con almacenamiento térmico [75].

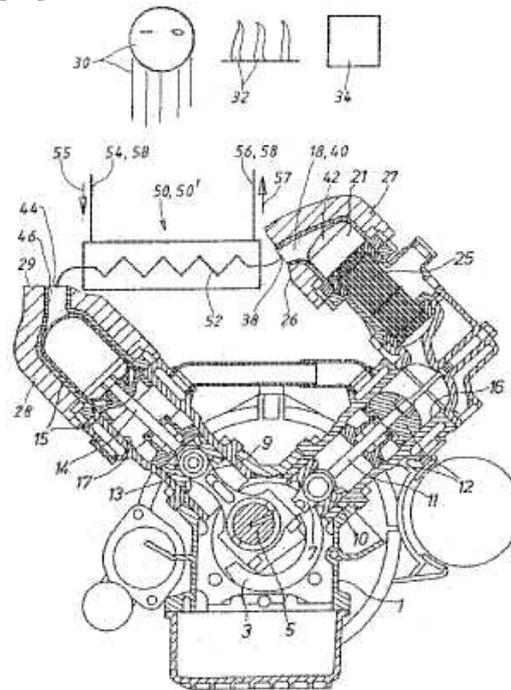


Figura 41 Representación patente DE102006061509 [75].

Se presenta un sistema que puede estar dotado de un motor Stirling o de un motor de vapor. Este sistema utiliza un receptor híbrido adaptado a diferentes fuentes de energía: solar, combustión o acumulación térmica. El intercambiador es de tubos directamente iluminados, y está dotado de apoyos circunferenciales para aliviar las tensiones producidas por la dilatación provocada por el paso del fluido de trabajo del motor. En esta patente se presenta la idea pero no hay una descripción detallada del intercambiador de calor.

### 3.4 Análisis de ciclo de vida aplicado a tecnologías de generación solar.

Se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica con el fin de localizar información relativa a análisis de ciclo de vida de las instalaciones objeto del estudio. Por una parte, de las instalaciones de disco Stirling, y por otra, de los sistemas fotovoltaicos. El objetivo es localizar información para revisar la metodología utilizada en el arte previo, y hallar valores de referencia de los trabajos de investigación ya realizados. Mientras que para los sistemas fotovoltaicos sí se han localizado diversos trabajos técnicos, para la tecnología de disco Stirling sólo uno ha sido

encontrado. Esto puede deberse al estado de desarrollo en el que se encuentra esta tecnología, considerado aún en periodo de investigación y primeras implementaciones, por lo que las empresas e instituciones que trabajan en ello no han publicado todavía información detallada de los análisis realizados. Para los sistemas fotovoltaicos, hay una variedad de diferentes tecnologías [76]. En el presente trabajo no se ha tratado exhaustivamente la diferencia entre tecnologías fotovoltaicas. Cabe destacar que estas tecnologías están en continuo desarrollo, por lo que, aunque actualmente hay un predominio de las tecnologías de silicio (policristalino, monocristalino y amorfo), en un futuro a medio plazo pueden utilizarse complementariamente otras tecnologías actualmente en desarrollo, como las de capa delgada u otras emergentes que combinan capa delgada con células orgánicas.

A continuación se presentan los artículos e información más destacada:

En el estudio realizado por Varun [77], se presenta un compendio de evaluaciones medioambientales de los diferentes sistemas de generación eléctrica. Se han realizado comparaciones de distintos análisis de ciclo de vida realizados a diferentes tecnologías. Aunque la validez es relativa, ya que cada uno de estos análisis ha sido realizado por diferentes personas y/o instituciones, sí sirve para evaluar el orden de magnitud asociado a cada una de ellas, relativizar las energías convencionales y las energías renovables, y éstas últimas entre sí. Esta comparación se realiza básicamente en emisiones de CO<sub>2</sub> por kWh producido (unidades: g-CO<sub>2</sub>/kWh). En especial para las energías renovables, las emisiones se producen principalmente durante la fase de construcción de componentes e instalación, siendo mínimas en la fase de operación, al contrario de lo que sucede con las energías convencionales. Los resultados principales se muestran en forma de tablas. La Tabla 10 muestra la comparativa general, con rangos que corresponden a los distintos estudios identificados.

Tabla 10 Comparación de tecnologías de generación eléctrica convencionales con fuentes renovables (unidad: g-CO<sub>2</sub>/kWh) [77].

<i>Combustibles fósiles / Nuclear</i>		<i>Energías renovables</i>	
<b>Sistema</b>	<b>g CO<sub>2</sub>/kWh</b>	<b>Sistema</b>	<b>g CO<sub>2</sub>/kWh</b>
<b>Carbón</b>	975.3	<b>Eólica</b>	9.7-123.7
<b>Petróleo</b>	742.1	<b>Solar fotovoltaica</b>	53.4-250
<b>Gas</b>	607.6	<b>Biomasa</b>	35-178
<b>Nuclear</b>	24.2	<b>Solar térmica</b>	13.6-202
		<b>Hidráulica</b>	3.7-237

Así, puede observarse que la tendencia general muestra valores favorables a las energías renovables. Ahora bien, los rangos son bastante amplios para determinadas tecnologías. Por ejemplo, la generación hidráulica presenta sus valores mínimos para las instalaciones pequeñas, donde no es necesario el almacenamiento hídrico, con el impacto que esto conlleva. En el caso de la tecnología fotovoltaica, los valores obtenidos muestran que esta tecnología puede tener un impacto significativo. Este impacto debería ser siempre considerado a la hora de planificar las distintas formas de aprovisionamiento energético. En particular para las tecnologías de generación solar térmica, se presenta una tabla comparativa donde se incluye el sistema de disco

Stirling (Tabla 11). El valor obtenido para este sistema en una instalación de 1 MW, con una duración de 30 años es de 13.6 g-CO<sub>2</sub>/kWh. El resto corresponden a instalaciones de torre central, y sistemas cilindro-parabólicos.

Tabla 11 Revisión del análisis de emisiones de CO<sub>2</sub> de sistemas solares térmicos [77]

<i>Año estudio</i>	<i>Localización</i>	<i>Tipo</i>	<i>Vida útil</i>	<i>Potencia (MW)</i>	<i>g CO<sub>2</sub>/kWh</i>
1990	EEUU	Torre central	30	100	43
2006	Italia	Disco parabólico	30	1	13.6
2006	España	Torre central	25	17	202
		Colector cilindro-parabólico	25	50	196

Otros resultados interesantes para su análisis son la distinción entre estudios de distintos sistemas fotovoltaicos (Tabla 12), instalaciones de biomasa (Tabla 13), energía eólica (Tabla 14) y energía hidráulica (Tabla 15). En estas tablas se especifica la tecnología concreta de cada una de las instalaciones y la potencia de la instalación. También es importante destacar que se especifica el año del estudio, por lo que puede deducirse la aplicabilidad al escenario actual. A excepción de los sistemas de biomasa, también se especifica la localización del estudio, aspecto que puede determinar los resultados de forma significativa, por ejemplo en cuanto a sistemas fotovoltaicos. Esto se debe a que la irradiación solar, correspondiente con la energía solar recibida por el sistema, depende de la localización. La energía producida por el sistema en cuestión será el resultado de multiplicar esta energía solar recibida por la eficiencia de la instalación.

Tabla 12 Revisión del análisis de emisiones de CO<sub>2</sub> para sistemas fotovoltaicos [77]

<i>Año estudio</i>	<i>Localización</i>	<i>Tipo célula</i>	<i>Potencia (kW)</i>	<i>g CO<sub>2</sub>/kWh</i>
1992	Alemania	c-Si	300/1500	250/150
1992	Alemania	mc-Si	300/1500	250/110
1992	Alemania	a-Si	300/1500	170/100
1997	Japón	c-Si	3	91
2000	Italia	c-Si y capa fina	3300	50-60
2005	Japón	a-Si	-	53.4
2005	EEUU	mc-Si	3500	184
2005	Grecia	mc-Si	3	104
2006	Singapur	c-Si	2.7	165

*a-Si: silicio amorfo*

*mc-Si: silicio multicristalino (o policristalino)*

*c-Si: silicio cristalino*

Tabla 13 Revisión del análisis de emisiones de CO<sub>2</sub> para sistemas de biomasa [77]

<i>Año estudio</i>	<i>Proceso</i>	<i>Potencia (MW)</i>	<i>g CO<sub>2</sub>/kWh</i>
1999	90% carbón y 10% paja	509	37
	90% carbón y 10% madera		35
1999	IGCC	1 MWh	110
2004	Carbón y cogeneración con biomasa y almacenaje de CO <sub>2</sub>	457	43
2005	IBGCC y eliminación de CO <sub>2</sub> (absorción química)	204.5	178
2005	Cogeneración con biogás	80 kW	78

Tabla 14 Revisión del análisis de emisiones de CO<sub>2</sub> para energía eólica [77]

<i>Año estudio</i>	<i>Localización</i>	<i>Intensidad energía (kWh/kWh)</i>	<i>Vida útil</i>	<i>Potencia (MW)</i>	<i>g CO<sub>2</sub>/kWh</i>
1981	EEUU	1.016	n.d.	3	n.d.
1996	Reino Unido	n.d.	20	6600	25
1996	Japón	0.456	20	100	123.7
1997	Dinamarca	0.1	20	30	n.d.
1999	India	0.032	20	1500	n.d.
2000	Dinamarca	n.d.	20	10 x 500	16.5
				18 x 500	9.7
2001	Brasil	0.069	20	500	n.d.
2001	Japón	0.160	25	100	39.4
2005	Japón	n.d.	n.d.	300	29.5
2005	Suiza	n.d.	20	30-800	11

Tabla 15 Revisión del análisis de emisiones de CO<sub>2</sub> para sistemas hidráulicos [77]

<i>Año estudio</i>	<i>Localización</i>	<i>Tipo</i>	<i>Vida útil</i>	<i>Potencia (MW)</i>	<i>g CO<sub>2</sub>/kWh</i>
1996	Suiza	Río	80	3.2	3.7
		Almacenaje	70-200	8.6	4.5
1996	Japón	Río	30	10	18
1997	Japón	Embalse	100	4000	237

Otra información localizada para sistemas fotovoltaicos incluye evaluaciones de tecnologías futuras frente a las tecnologías utilizadas actualmente. Mohr [78] utiliza la metodología del análisis de ciclo de vida con el método de evaluación de impacto CML 2001. El programa utilizado es SimaPro 7.1.8. [132], y la base de datos Ecoinvent 2.01 [133]. Se comparan las tecnologías de capa delgada GaInP/GaAs (fosforo de galio indio / arseniuro de galio) y el silicio policristalino. La unidad funcional de análisis es 1kWp con una irradiación de 1000 kWh/m<sup>2</sup> en Europa Occidental. Se considera una vida útil de 30 años, y se incluyen operaciones de fabricación, mantenimiento y generación de residuos. A nivel de inventario, en este estudio no se analizan las emisiones de CO<sub>2</sub> por kWh. Los resultados del análisis del ciclo de vida se muestran en las categorías de impacto asociadas al método CML2001 [131] (Figura 42).

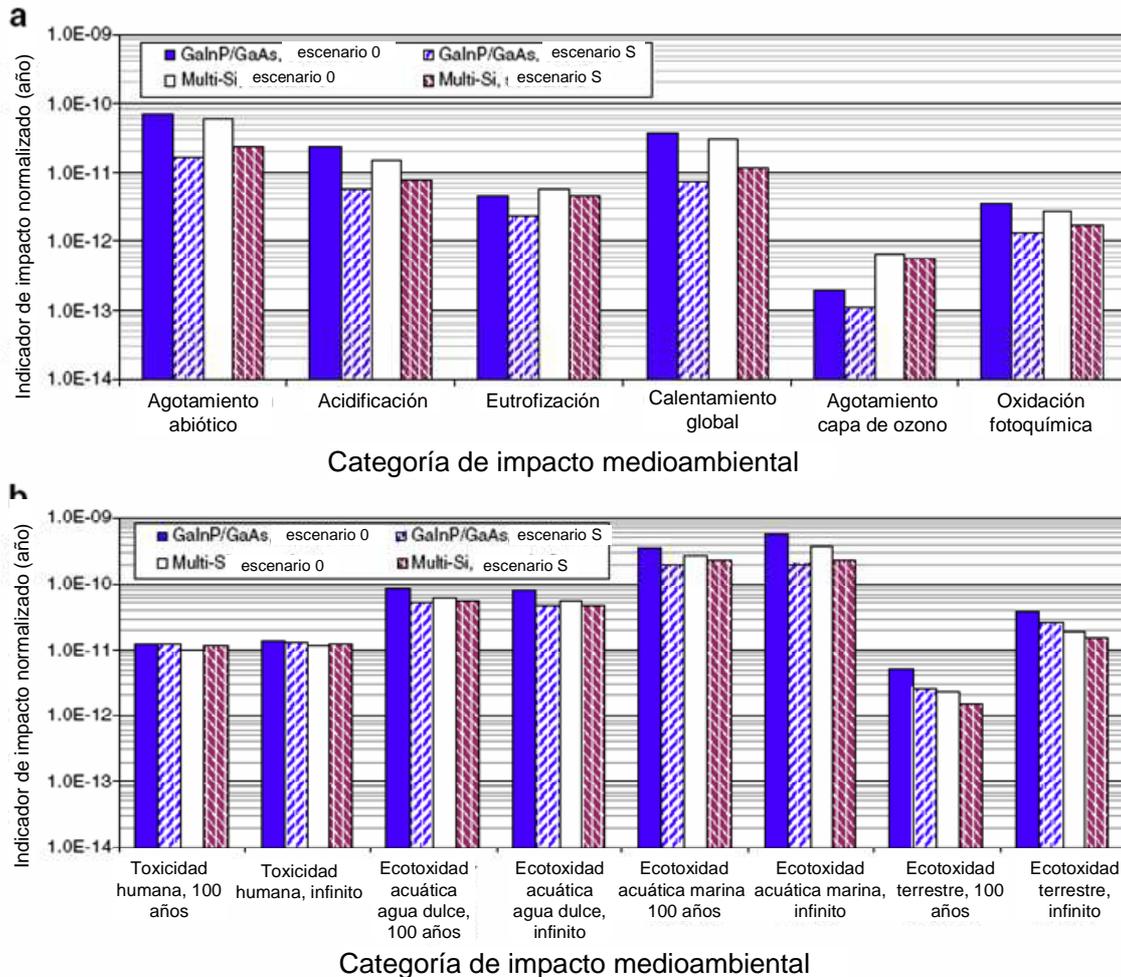


Figura 42 Evaluación normalizada del impacto (años) de los 2 sistemas. En el caso de seis categorías de impacto se ha considerado un solo horizonte temporal, mientras que para las categorías de toxicidad se han elegido (100 años e infinito). Escenario 0 representa el uso de electricidad fósil / Escenario S representada el uso de electricidad generada por el módulo [78].

La conclusión del estudio señala que la diferencia entre utilizar fuentes de energía convencionales o bien la energía procedente del sistema fotovoltaico en cuestión para la fabricación de módulos tiene un impacto favorable en las categorías de impacto: calentamiento global, agotamiento abiótico, acidificación y oxidación fotoquímica. Sin embargo, las reducciones en toxicidad son mucho más pequeñas, incluso despreciables. Como puede observarse en la gráfica, no se encuentran diferencias significativas entre las dos tecnologías fotovoltaicas.

Stopatto [79] analiza la tecnología de silicio policristalino, la más común actualmente. En este caso el cálculo se implementó en el Boustead Model V5.0 [131], un programa alternativo al SimaPro para análisis de ciclo de vida. Se presentan los detalles de proceso para la fabricación de los paneles fotovoltaicos. En este estudio no se ha incluido el transporte y la colocación de los paneles fotovoltaicos, ni la operación. Para la unidad de referencia de un panel de superficie 0,65 m<sup>2</sup>, se ha evaluado el requerimiento energético para la construcción de un panel (1494 MJ/panel – GER “Gross Energy Requirement”), y el efecto de gases invernadero o potencial de calentamiento climático (80 kg CO<sub>2</sub> por panel – GWP “Global Warming Potential”). También se ha calculado el periodo de amortización energética (EPBT “Energy Pay-Back Time”), que es de 6,5 años, en comparación con los 28 años considerados de vida útil. En este caso, se ha incluido un análisis por operación, que muestra las fases que más contribuyen a los parámetros seleccionados de control (GER y GWP). Estas fases son la transformación a silicio solar y el montaje de las células solares en el panel. Las siguientes figuras muestran este análisis:

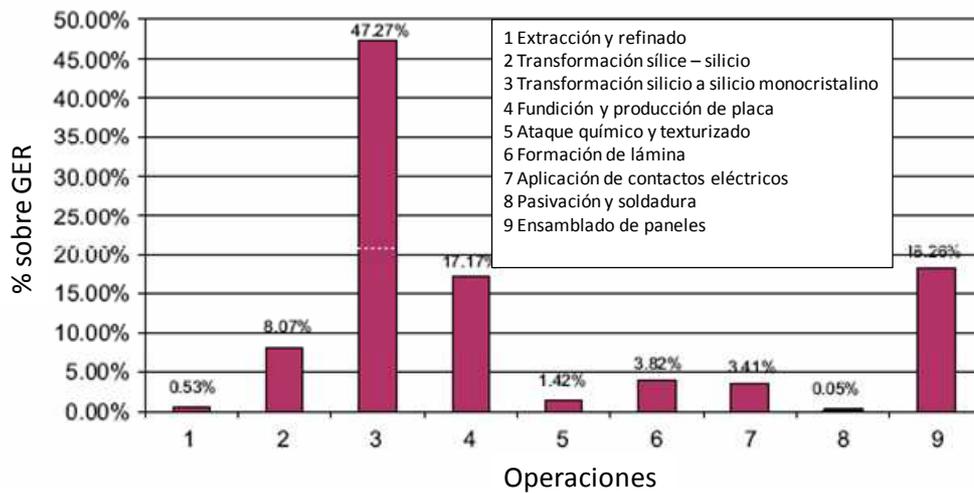


Figura 43 Contribución al valor de GER por operaciones, expresado como porcentaje [79].

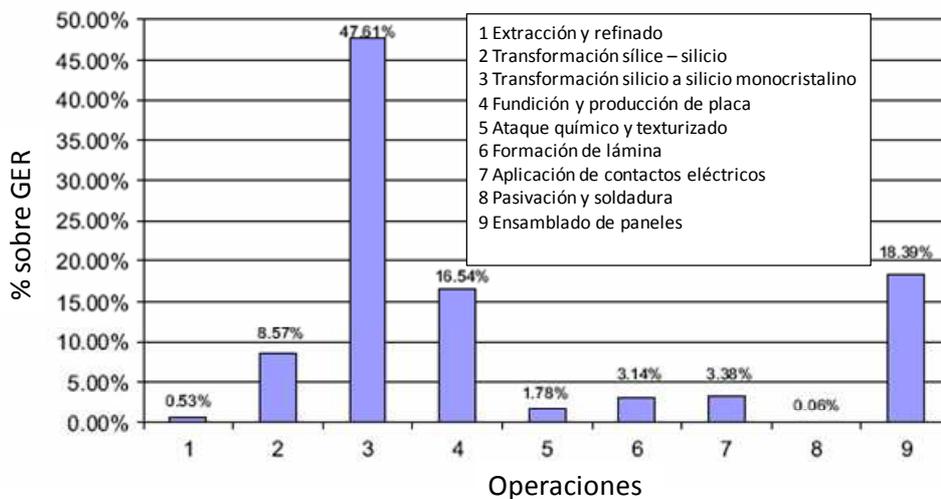


Figura 44 Contribución al valor de GWP por operaciones, expresado como porcentaje [79].

Se han realizado también comparativas que evalúan las diferentes tecnologías fotovoltaicas teniendo en cuenta el estado presente y las expectativas futuras [80]. En particular, entre las tecnologías de silicio cristalino y las tecnologías de capa delgada (CdTe – telurio de cadmio), con localizaciones en el sur o zona central de Europa (con valores de irradiación que varían de 1700 a 1000 kWh/m<sup>2</sup>/año). Este estudio se centra en el periodo de amortización energética (EPBT) y los gases de efecto invernadero, calculados respectivamente mediante el método Cumulative Energy Demand (v. 1.03) [131] y el IPCC 2001 GWP 100<sup>a</sup> (v. 1.02) [131]. Los resultados se presentan también en comparación con otros sistemas convencionales de generación energética. Cabe destacar del gráfico que se presenta a continuación (Figura 45), que hay sistemas que, a pesar de presentar un valor bajo de gr CO<sub>2</sub>/kWh, tienen otras implicaciones que deben ser evaluadas con criterios adicionales. Este es el caso de la energía nuclear, por la generación de residuos radiactivos a largo plazo y las implicaciones de seguridad.

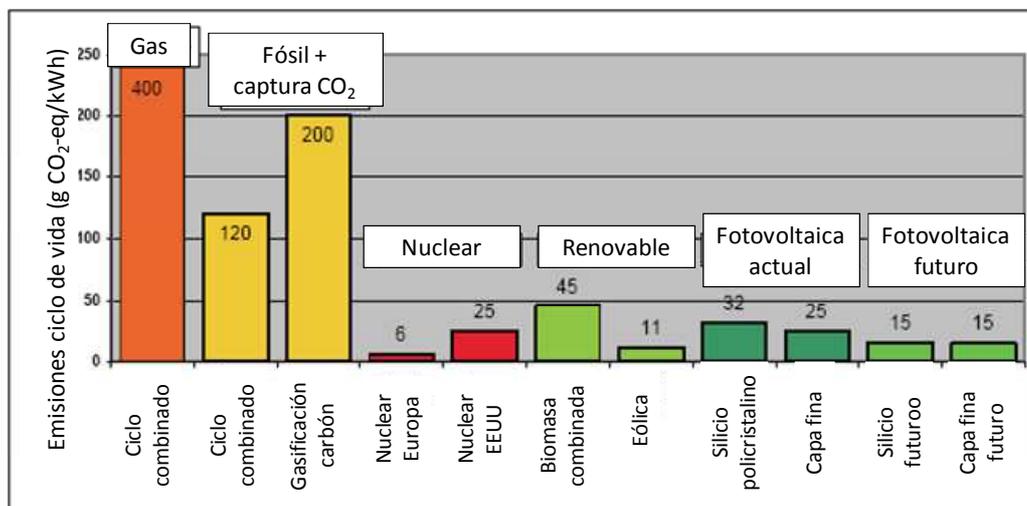


Figura 45 Comparación de emisión de gases de efecto invernadero para diferentes opciones de suministro de energía. Las instalaciones fotovoltaicas están instaladas en el sur de Europa [80].

Los resultados globales de evaluación de tecnologías fotovoltaicas muestran rangos entre 1 y 2 años para el periodo de amortización energética para el sur de Europa, y entre 1.7 y 3.5 para la parte central, encontrándose la tecnología de capa delgada en los valores más bajos. En cuanto a emisiones, éstas se centran en los procesos de fabricación, encontrándose valores en el rango de 25-35 g/kWh en el sur de Europa, un valor bajo en comparación con valores de otras tecnologías (Figura 45). Así, la tecnología fotovoltaica se presenta en una buena posición dentro de las tecnologías energéticas de bajo impacto, aunque debería hacerse un esfuerzo en la reducción de la energía requerida en los procesos del silicio. La tecnología de capa delgada se presenta como la de mayor potencial de cara a futuro.

Con respecto a las tecnologías fotovoltaicas se han realizado también análisis de sensibilidad para verificar las alternativas en su fabricación y operación que la harían más competitiva en términos de energía requerida, periodo de amortización energética y emisiones de CO<sub>2</sub>. En una evaluación realizada para un sistema fotovoltaico de tecnología de silicio monocristalino [81], se analizan las posibilidades de que el uso energético para su fabricación se

reduzca a la mitad, la utilización de soportes estructurales de hormigón en sustitución de los metálicos y el incremento de su eficiencia. Los resultados se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 16 Evaluación de mejoras en un sistema fotovoltaico de silicio monocristalino [81]

<i>Escenario</i>	<i>Energía (MJ/kWh<sub>e</sub>)</i>	<i>Pay-back energético (años)</i>	<i>Emisiones de CO<sub>2</sub> (g/kWh<sub>e</sub>)</i>
<b>Caso base</b>	2.91	5.87	217
<b>Reducción de energía de fabricación del módulo fotovoltaico del 50% (caso A)</b>	1.72	3.48	129
<b>Reducción de uso de la estructura – ejemplo reducción de aluminio del 10% (caso B)</b>	2.38	4.81	177
<b>Incremento de la eficiencia del sistema fotovoltaico del 10.6% (caso C)</b>	2.21	4.47	165
<b>Caso A+B</b>	1.20	2.42	89
<b>Caso B+C</b>	1.81	3.66	135
<b>Caso A+C</b>	1.31	2.65	98
<b>Caso A+B+C</b>	0.91	1.84	68

El estudio más actual localizado sobre evaluación de ACV en tecnologías fotovoltaicas, de Fthenakis [82], muestra los valores comparativos de evaluación entre las distintas tecnologías fotovoltaicas.

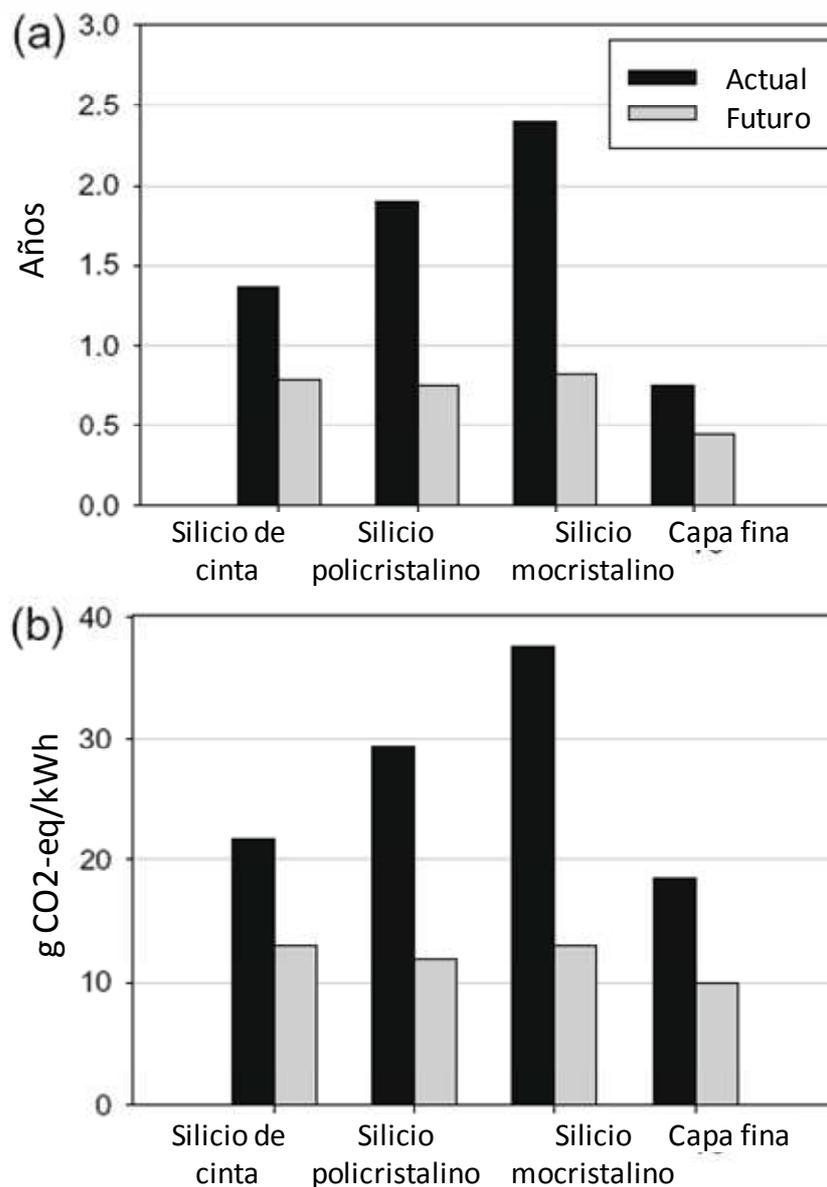


Figura 46 Valores presentes y predicción futura para el pay-back energético (EPBT) –a- y emisiones de CO<sub>2</sub> de los ciclos de vida de módulos fotovoltaicos. Las estimaciones están basadas en valores de irradiación del sur de Europa 1700 kWh/m<sup>2</sup>/año), una relación de operación (#) del 0.75 y una vida útil de 30 años. A excepción de \*, basada en irradiación EEUU de 1800 kWh/m<sup>2</sup>/año y relación de operación de 0.8 [82]  
 (#) La relación de operación es la energía eléctrica real producida con respecto a la teórica o ideal (energía solar \* eficiencia).

El único estudio localizado referido a la tecnología de disco Stirling, [83] evalúa una instalación de potencia 1 MW, con 17 discos solares de potencia 50 kW. Utiliza el programa SimaPro, y las bases de datos ETH-ESU 1996, IDEMAT 2001 y BUWAL 1996 [131]. El método de evaluación de impacto es el Eco-indicador 99. Se analizan los resultados por categoría de impacto, con la opción de reciclado o no reciclado. Las categorías de impacto son los siguientes: carcinógenos, orgánicos respirados, inorgánicos respirados, cambio climático, radiación, capa de ozono, ecotoxicidad, acidificación, uso de la tierra, minerales y combustibles fósiles. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 47.

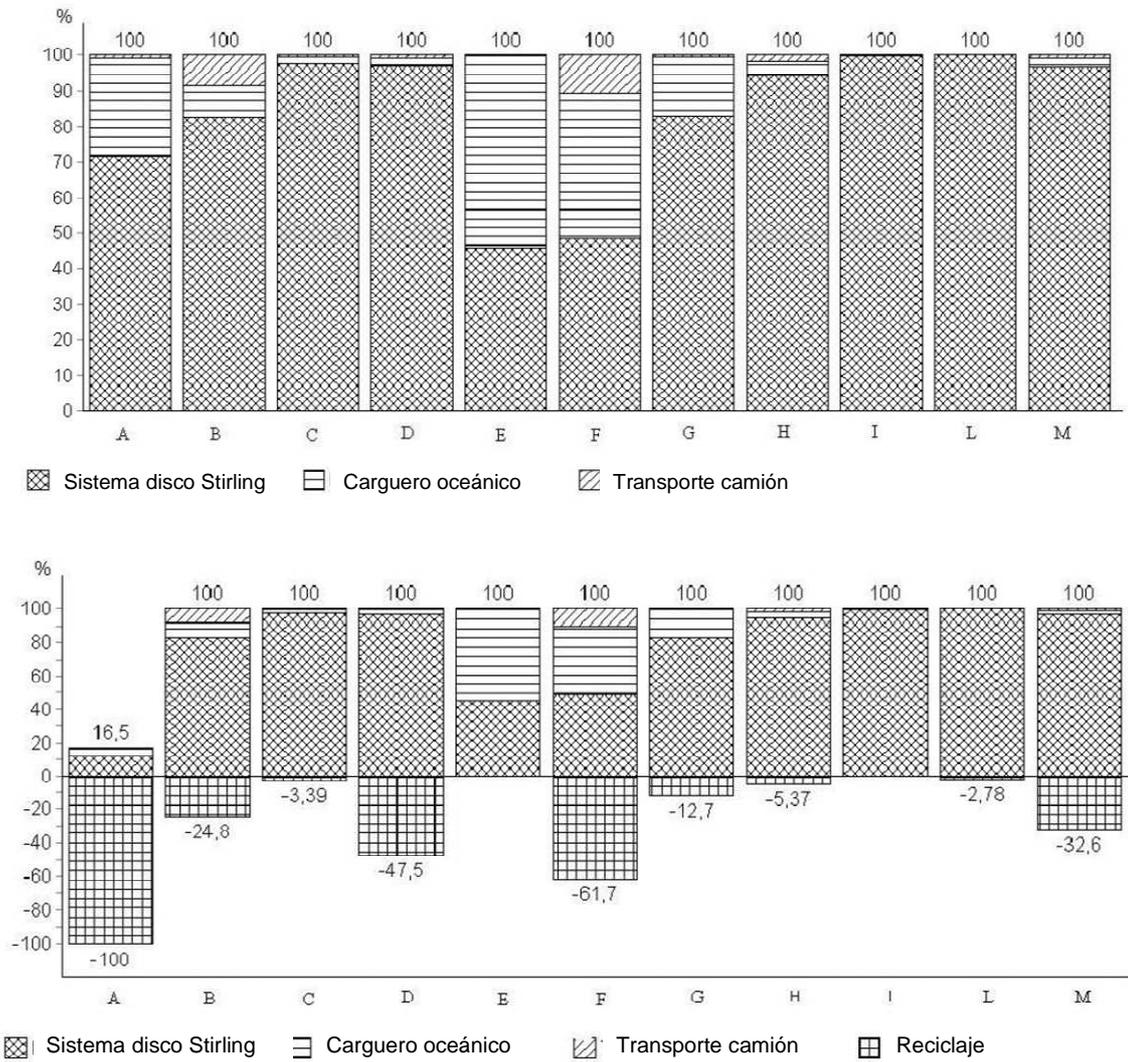


Figura 47 Contribución de los procesos (en %) por categoría de impacto sin y con reciclado [83].

Leyenda: A (cancerígenos), B (orgánicos respiratorios), C (inorgánicos respiratorios), D (cambio climático), E (radiación), F (capa de ozono), G (eco-toxicidad), H (acidificación), I (uso de la tierra), M (combustibles fósiles).

Los efectos medioambientales se evalúan en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> (acidificación), CFC11 (capa de ozono), PO<sub>4</sub> (eutrofización), SPM (niebla de invierno), C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (niebla de verano) y residuos sólidos, tanto para la situación donde se considera el reciclaje como donde no se considera.

Tabla 17 Efectos medioambientales por kWh de electricidad [83]

<i>Efecto medioambiental</i>	<i>Unidad</i>	<i>Con reciclado</i>	<i>Sin reciclado</i>
<b>GHG</b>	kgCO <sub>2eq</sub>	7.37e-03	1.36e-02
<b>Acidificación</b>	kgSO <sub>2eq</sub>	4.66e-04	4.82e-04
<b>Capa de ozono</b>	kgCFC11	5.35e-10	1.40e-09
<b>Eutrofización</b>	kgPO <sub>4</sub>	5.28e-06	6.23e-06
<b>Niebla invierno</b>	kgSPM	5.25e-04	5.38e-04
<b>Niebla verano</b>	kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2.18e-06	3.88e-06
<b>Residuos sólidos</b>	kg	0	1.97e-03

También se presenta la evaluación del daño en las 3 categorías de daño que considera el método Eco-indicador 99: impacto en la salud humana, en la calidad del ecosistema y en el consumo de recursos naturales.

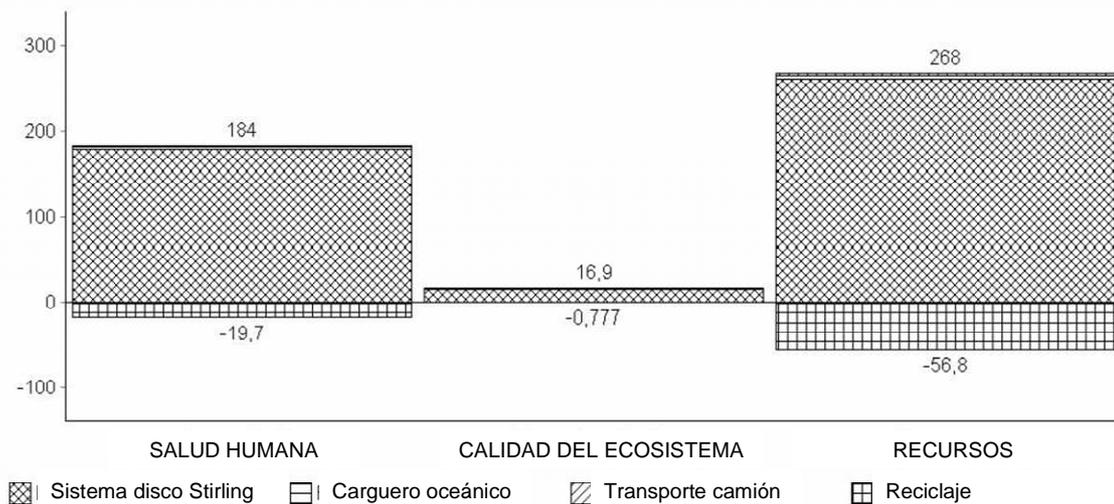


Figura 48 Evaluación del daño (Eco-indicador 99) [83].

De la información analizada anteriormente, se deduce que el análisis de ciclo de vida establece una diferencia significativa entre la energía procedente de combustibles fósiles y las energías renovables. En cambio, el orden de magnitud es similar en cuanto a las tecnologías de aprovechamiento solar: térmica de concentración y fotovoltaica. Sin embargo, el estudio pone de manifiesto que el rango de variación es amplio, ya que hace una recopilación de análisis realizados por diferentes autores, que por supuesto, han utilizado diferentes premisas y condiciones. En cuanto a la tecnología de disco Stirling, el estudio es sobre una instalación de 1 MW, donde el motor de generación no está montado sobre el propio disco. Por lo tanto, no se corresponde con los sistemas objeto de análisis que constituyen un sistema aislado de generación. Así, el valor de evaluación medioambiental (13,6 gCO<sub>2</sub>/kWh), situado en el rango más bajo de los valores analizados, puede tomarse como un orden de magnitud, pero no como un valor indicativo. Justifica, por tanto, el interés de realizar este análisis en la presente tesis.

Hay que destacar que los estudios revisados anteriormente no parten de instalaciones semejantes ni están realizados en el mismo espacio temporal, por lo que se ha considerado que es necesario determinar la comparativa entre una instalación de disco Stirling y otra fotovoltaica con condiciones de utilización e implementación similares. En particular, se considera de interés realizar la comparativa para una instalación de generación distribuida, no conectada a la red de suministro energético. Por supuesto, sería también interesante la comparativa en base a plantas energéticas para suministro de red, pero queda fuera del alcance de la presente tesis.

En cuanto a la aplicación del análisis de ciclo de vida, se nombra el programa SimaPro en diferentes versiones y el Boustead Model, las bases de datos ETH-SU, IDEMAT, BUWAL y Ecoinvent, y los métodos de evaluación de impacto CML 2001, CML2, IPPC 2001, Cumulative Energy Demand y Eco-indicador. Todos estos factores tienen una influencia en los resultados del análisis de ciclo de vida, por lo que en la presente tesis se seleccionará una de las alternativas para programa, bases de datos y métodos de evaluación de impacto, con el fin de realizar un análisis comparativo coherente.

Otras evaluaciones interesantes que pueden servir como comparativa, son, por ejemplo, el pay-back energético que se ha presentado, así como la evaluación de energía necesaria para la fabricación de la instalación. Así, estos conceptos se implementarán para la evaluación comparativa que se presenta en este trabajo.

# 4

## **ANÁLISIS DE OPERACIÓN DE HIBRIDACIÓN DEL SISTEMA DE DISCO**

### **STIRLING**

*Con el fin de evaluar el potencial de la aplicación de la hibridación del sistema, es imprescindible conocer el impacto de dicha aplicación en sus resultados operativos.*

Tal como se ha introducido en los capítulos anteriores, existe ya un conocimiento previo que plantea la ventaja que supone su aplicación en el sistema de disco Stirling como diferenciadora frente a otros sistemas de aprovechamiento del recurso solar. Pero estos estudios previos no plantean la cuantificación de esta ventaja. El objetivo del presente capítulo es definir cuál es la ganancia concreta, mediante el cálculo de la operación del sistema. En particular, cuál es la ganancia en generación eléctrica del sistema hibridado frente al funcionamiento solo solar. El análisis de operación permite además cuantificar los consumos asociados de combustible. Esto es también necesario para el dimensionamiento del módulo de hibridación con el que se complementaría el sistema de disco Stirling en el caso de que los resultados de operación lo justificasen.

La metodología seguida para la realización de este análisis de operación cubre la definición de los datos de entrada, la modelización del sistema respecto a la conversión energética en los distintos elementos y la selección de los indicadores resultados de la evaluación, que serán utilizados para posteriores evaluaciones.

En cuanto a los datos de entrada, deben identificarse por una parte las características de la instalación en concreto, y por otra, las condiciones meteorológicas del lugar donde opera el sistema. La instalación seleccionada se basa en el sistema Envirodish de 10 kWe [25], que utiliza el motor V-161. Las condiciones meteorológicas determinan el funcionamiento de la instalación, fundamentalmente la radiación solar. Es necesario por tanto seleccionar la forma de los datos de entrada de la energía solar con la que funciona el sistema.

Para la modelización del sistema se ha utilizado un programa informático desarrollado para este fin en el Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza [84][85]. Este programa realiza los cálculos que determinan la energía eléctrica de salida en base a la modelización de los diferentes componentes de la instalación.

La definición de los indicadores resultado debe poner de manifiesto la diferencia en el aprovechamiento de alternativas del sistema, y además responder a las necesidades de las posteriores evaluaciones a considerar. Por una parte el diseño de los elementos propios del sistema de hibridación, como el quemador y el receptor, dependen de estos resultados. Representarían por tanto los datos de entrada para la definición de los componentes descritos en el capítulo 5, donde se analizan criterios de pre-diseño de los mismos. Por otra parte los resultados son también los datos de entrada para la evaluación medioambiental del sistema hibridado que se realiza en el capítulo 6 de Análisis de Ciclo de Vida.

El apartado de resultados se divide fundamentalmente en los modos de funcionamiento solo solar y sistema hibridado. Para el análisis del potencial de explotación del sistema con hibridación, se tiene en cuenta la regulación específica en España, RD661/2007 [86]. Esta normativa establece la cantidad máxima de energía eléctrica que puede provenir del módulo de hibridación. La limitación depende del tipo de combustible, fundamentalmente si se trata de combustibles fósiles o combustibles con origen en biomasa. Esta diferencia entre el origen del combustible a utilizar se ha considerado en el presente trabajo. Se presenta el análisis considerando hibridación con gas natural y con biogás.

El análisis de operación determinará los periodos donde puede utilizarse la hibridación, de forma que el combustible proveerá una energía eléctrica adicional. Así, se establecerá la

diferencia entre esta operación solo solar y la obtenida con hibridación con distintos combustibles en términos de energía eléctrica de salida. Este dato supone una evaluación en sí misma, ya que permitirá determinar el interés de la realización de inversión en la instalación. Se analizará también el número de horas efectivas de la instalación con y sin hibridación de forma que se establezca la capacidad de operación del sistema con ambas alternativas. Esto permite evaluar la idoneidad de suministro que puede proveer la instalación de disco Stirling hibridada con respecto al aprovechamiento solo solar.

Además del análisis del sistema hibridado, se realiza también la evaluación de utilización de un sistema de almacenamiento térmico. El sistema de almacenamiento térmico consistiría en la utilización de un material de cambio de fase (PCM- Phase Change Material) que aprovechara el excedente de radiación solar en periodos donde la radiación solar supera el valor nominal aprovechable por la instalación, de forma que esta energía se almacene para liberarla en los momentos donde la radiación esté por debajo del valor nominal. Supone un aporte adicional de energía en relación al funcionamiento solo solar del sistema, de la misma forma que la hibridación, pero en este caso no es necesario un aporte adicional de combustible, por lo que puede resultar una alternativa interesante, bien de forma aislada o complementaria al sistema de hibridación. El análisis de operación del sistema determinará si el aumento de generación eléctrica asociado al almacenamiento justificaría la inversión necesaria para su implementación.

## 4.1 Metodología

### 4.1.1 Datos de entrada para el análisis

Como se ha explicado anteriormente, los datos meteorológicos son un parámetro de entrada para el cálculo de la energía suministrada por la aplicación. En el caso de este sistema, el recurso aprovechable por el sistema es la radiación solar directa (DNI: Direct Normal Irradiation).

La radiación solar global tiene tres componentes: radiación solar directa, radiación solar difusa, y radiación reflejada, tal como se presenta en la Figura 49.

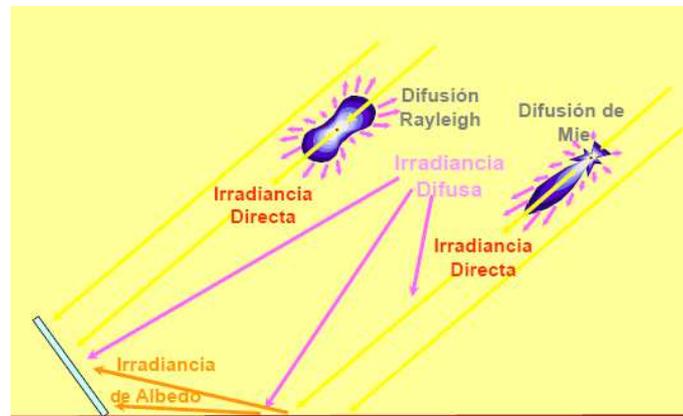


Figura 49 Esquema de los tres tipos de radiación.

En particular, la radiación solar directa representa una fracción de hasta un 90% en días con el cielo claro, y puede llegar a ser nula en días completamente nublados. La captación de esta radiación por los concentradores viene determinada por su carácter vectorial. Así, la radiación normal directa efectiva que recibe una superficie de captación es la componente perpendicular a dicha superficie. Las estaciones meteorológicas disponen de un pirheliómetro y un sistema de seguimiento solar para medir esta componente directa de la radiación, separándola de los otros componentes. Los datos de las estaciones meteorológicas se refieren a una ubicación geográfica determinada en un periodo de tiempo definido. Estos datos se registran diariamente con una frecuencia temporal que permite definir una curva de radiación solar directa a lo largo de cada día. Las bases meteorológicas están definidas anualmente. El promedio de datos meteorológicos de varios años permitirá realizar un análisis de la energía media producida por una instalación tipo de disco Stirling en promedio.

Con el fin de aprovechar la máxima radiación normal incidente, los sistemas solares pueden disponer de sistemas de seguimiento solar. En el sistema de disco Stirling en particular se produce el movimiento de la estructura completa de acuerdo con el posicionamiento del sol, de forma que el concentrador parabólico esté lo más enfrentado posible a la posición del sol, por lo que se considera que aprovecha toda la radiación normal incidente que recibe.

Existen varios modelos matemáticos válidos [87] para distintas ubicaciones geográficas, que calculan el valor de la radiación solar directa en función del movimiento de traslación de la tierra y la rotación diaria. Sin embargo, estos modelos no tienen en cuenta agentes atmosféricos que representan una fuente de variación, tales como la nubosidad.

En el caso de estudio, se han utilizados datos meteorológicos procedentes de una estación situada en Sevilla (España) (latitud 37.40° Norte, longitud 6.01° Oeste). Los datos que se poseen han sido registrados diariamente con una frecuencia de cinco segundos y son relativos a los años naturales 2000, 2003, 2005 y 2008.

A modo de ejemplo, las gráficas siguientes (Figura 50) muestran la evolución diaria de la radiación solar directa, para dos días diferentes. La línea azul representa la radiación incidente medida, frente a la línea roja, que representa la radiación de acuerdo a un modelo teórico [84].

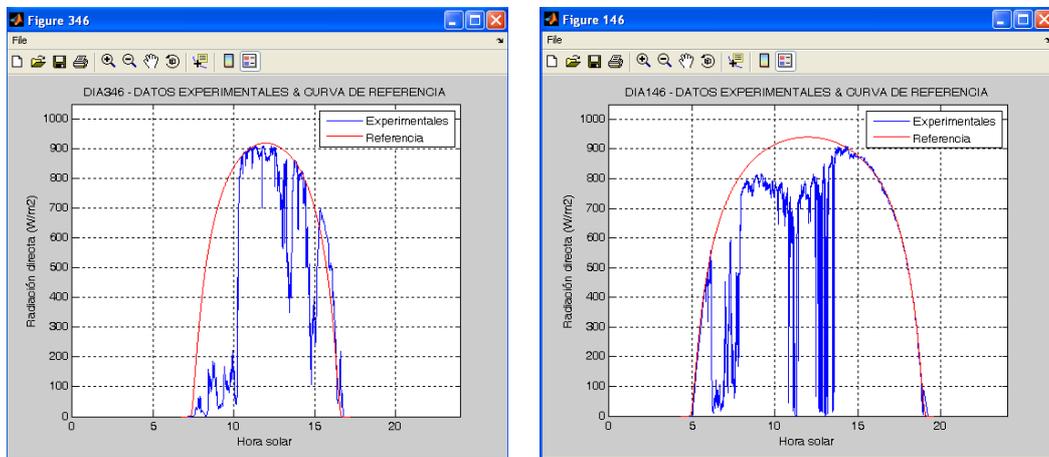


Figura 50 Representación de la radiación solar directa (W/m<sup>2</sup>) – evolución diaria.

Como trabajo previo a la modelización del sistema a través del programa informático desarrollado, se ha analizado si el cálculo operativo puede referirse a algún modelo teórico concreto. En particular se han analizado los siguientes modelos teóricos de radiación: modelo de Hottel [88], modelo de Bernard [89], modelo de Meinel [90], modelo de Meinel-Forero [91], modelo de Allen [92] y modelo de Moon [92].

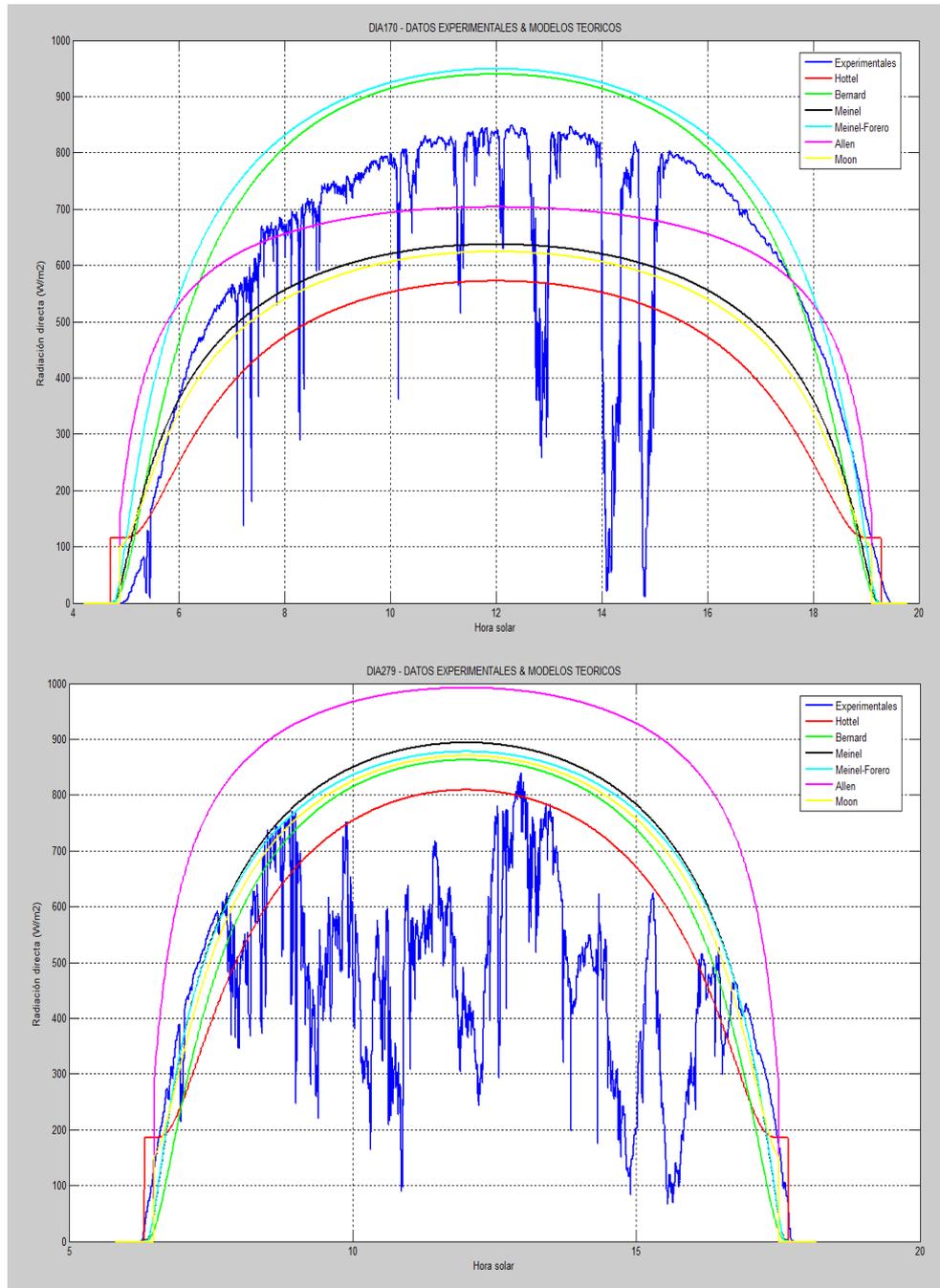


Figura 51 Resultados proporcionados por los modelos teóricos para los días: 18 de Junio de 2000, y 5 de Octubre de 2000 (días ejemplo comparativos).

Como puede verse en las figuras anteriores (Figura 51) hay una diferencia considerable entre la radiación medida (línea azul) y todos los modelos teóricos analizados. Por lo tanto, la conclusión de este análisis es que ninguno de los modelos es válido para representar el funcionamiento del disco Stirling. Pueden utilizarse exclusivamente para realizar el análisis de la potencialidad del sistema en base teórica, y cómo el funcionamiento real se diferencia del teórico. En este sentido, si se plantease seleccionar alguno de los métodos analizados se propone el método de Meinel-Forero para verano y de Moon para invierno, distinguiendo el año exclusivamente en estos dos periodos [84]. Los valores de estos modelos pueden tomarse como

referencia para establecer la máxima radiación incidente que podría recibirse, asumiendo que representan una situación ideal de recepción en la que se aprovecharía totalmente la radiación directa que pasa a través de la atmósfera en un día claro con las mejores condiciones ambientales y meteorológicas. La comparativa del funcionamiento real del sistema en base a datos medidos de radiación incidente con los modelos teóricos adaptados sirve exclusivamente para analizar la energía auxiliar adicional necesaria para alcanzar el máximo nivel de operación posible en condiciones meteorológicas ideales. Es decir, como análisis de la calidad y fiabilidad del recurso solar, especialmente en base comparativa para diferentes años. Sin embargo, la hibridación planteada en este trabajo se basa en la necesidad de mantener durante todo el tiempo posible el funcionamiento nominal de la instalación aprovechándose al máximo su capacidad, considerando por supuesto las limitaciones impuestas por la regulación vigente [86]. Por este motivo, los análisis posteriores se refieren exclusivamente a datos meteorológicos medidos. El análisis se refiere al valor promedio de los años disponibles que se han referido anteriormente, de forma que se establece un año tipo en función del histórico disponible.

Los datos de entrada al programa se han tomado de una base meteorológica [93] donde aparecen varios parámetros. Éstos se toman de un fichero tipo texto donde aparecen 10 columnas con la información que se detalla a continuación (ejemplo en Figura 52):

- Hora GMT (hh:mm:ss)
- Irradiancia difusa sobre superficie horizontal ( $W/m^2$ )
- Irradiación difusa sobre superficie horizontal ( $kJ/m^2$ )
- Irradiancia global sobre superficie horizontal ( $W/m^2$ )
- Irradiación global sobre superficie horizontal ( $kJ/m^2$ )
- Irradiancia difusa sobre superficie inclinada  $37^{\circ}S$  ( $W/m^2$ )
- Irradiación difusa sobre superficie inclinada  $37^{\circ}S$  ( $kJ/m^2$ )
- Irradiancia directa normal, DNI ( $W/m^2$ )
- Irradiación directa normal ( $kJ/m^2$ )
- Hora solar aparente (hh:mm)

De esta información, la que toma el programa de cálculo es la irradiancia directa normal y la hora solar aparente.

10:53:54	0	4005	593	3945	768	5146	930	8746	10:17
10:53:59	248	4006	593	3948	768	5150	930	8750	10:17
10:54:03	0	4006	593	3951	769	5154	931	8755	10:17
10:54:08	1183	4012	593	3954	769	5158	931	8760	10:17
10:54:13	0	4012	593	3957	770	5162	931	8764	10:17
10:54:18	240	4013	594	3959	770	5165	931	8768	10:17
10:54:23	0	4013	594	3962	771	5169	933	8773	10:17
10:54:28	1047	4018	594	3965	771	5172	933	8777	10:17
10:54:33	0	4018	595	3968	772	5176	933	8782	10:17
10:54:37	1099	4023	595	3971	772	5180	933	8787	10:17
10:54:42	0	4023	595	3974	772	5184	933	8791	10:17
10:54:47	766	4027	596	3977	773	5188	932	8796	10:17
10:54:52	0	4027	596	3980	773	5191	932	8800	10:18
10:54:57	244	4028	595	3982	773	5195	933	8804	10:18
10:55:02	0	4028	595	3985	773	5199	933	8809	10:18
10:55:07	0	4028	595	3988	774	5203	933	8814	10:18

Figura 52 Ejemplo del formato de datos de entrada ARAD.

Para cada día existe un fichero de texto con los datos correspondientes. Estos ficheros de texto se ordenan también por año. De forma adicional al fichero de radiación, se adjunta una base meteorológica con el dato de temperatura ambiente, necesario para los cálculos a realizar. Se trata de un formato texto similar al anterior que se carga en el programa de forma simultánea.

Con el fin de realizar el análisis en base anual, el programa de cálculo dispone de un procedimiento que permite cargar todos los ficheros diarios correspondientes a un mismo año.

Con respecto a los datos de entrada correspondientes a la instalación, que como se ha introducido previamente es el sistema Enviroidish de 10 kWe [25], se van a describir en el apartado siguiente de modelización del sistema.

#### 4.1.2 Modelización del sistema

Para el caso de análisis se ha utilizado un programa informático, DNICalc [84][85], específicamente desarrollado para este fin por la Universidad de Zaragoza. Básicamente, este programa analiza la radiación normal incidente (Direct Normal Irradiation – DNI-) en un periodo de tiempo y proporciona como resultado la energía eléctrica producida por una instalación de disco Stirling tipo de potencia nominal 10 kWe [25].

Además de este dato de salida, hay otros parámetros que pueden analizarse mediante esta aplicación. Uno de estos parámetros es la energía radiante recibida, que supone una primera estimación del potencial del sistema. Permite también analizar el nivel de DNI al que podría ajustarse la instalación para favorecer un funcionamiento óptimo. Este valor de DNI determina el funcionamiento nominal de la instalación, pudiéndose analizar también la energía excedente respecto a este punto (energía no aprovechada para el funcionamiento), así como los periodos de funcionamiento inferior al nominal de la instalación. En estos periodos se incluyen las caídas de irradiancia intradiarias, los transitorios, debidas principalmente a nubosidades. Estas caídas son de especial interés ya que son problemáticas para los componentes estructurales del sistema por las sollicitaciones térmicas que suponen. Los análisis de funcionamiento por encima y por debajo del nominal son los que permiten introducir los conceptos de hibridación y almacenamiento térmico. La hibridación será utilizada para aportar un extra de potencia cuando sea conveniente, especialmente durante los transitorios. El almacenamiento térmico se llevará a cabo durante periodos de energía excedente con el fin de liberarla en los momentos de funcionamiento por debajo del nominal.

La modelización del sistema se basa en la definición de eficiencias de los componentes, tomando como referencia tanto valores experimentales en instalaciones de demostración [26] como trabajos anteriores que tratan sobre la modelización detallada de los componentes que forman parte del sistema de disco Stirling [4]. De forma adicional a las referencias anteriores, este programa incluye la posibilidad de definir hibridación y almacenamiento térmico aplicados al sistema.

La modelización del sistema dentro de este programa informático se refleja en la Figura 53.

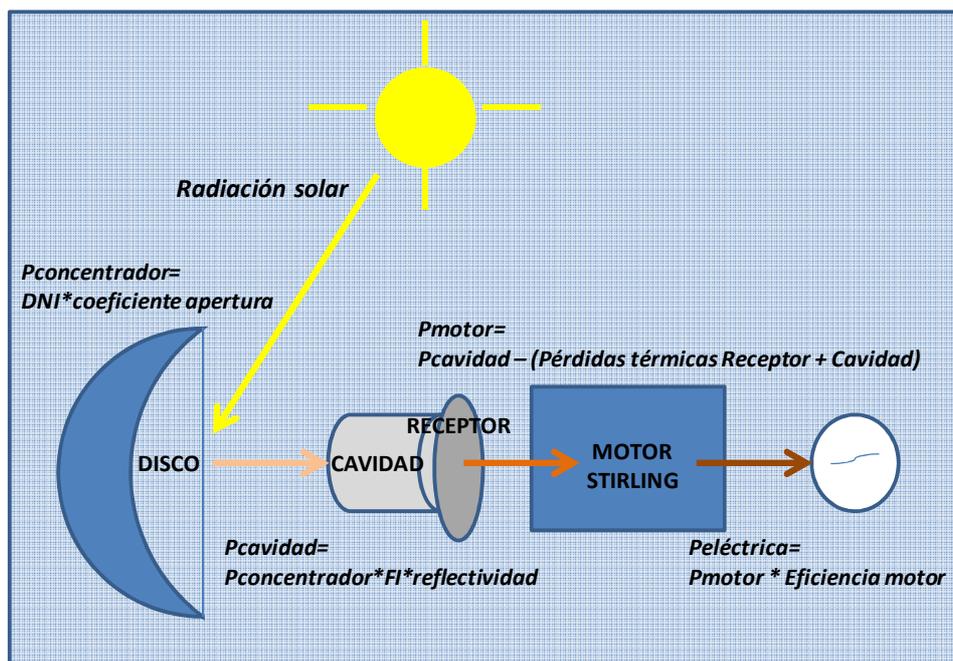


Figura 53 Diagrama de conversión energética del sistema de disco Stirling.

Este diagrama representa la conversión energética desde la energía procedente de la radiación solar hasta la energía eléctrica obtenida del sistema. Esta conversión se divide de acuerdo a los diferentes componentes que forman la instalación, de la siguiente forma:

- La energía solar incide en el disco parabólico, para el que la eficiencia se define en función de un coeficiente de la apertura de este disco. Este coeficiente determina la potencia de entrada al siguiente componente, el concentrador. Para el caso de estudio se ha tomado el valor de 0,9. Este primer paso determina la potencia radiante de entrada a la cavidad.
- La conversión de potencia desde el concentrador hasta la salida de la cavidad viene dada por el rendimiento óptico del disco, que se conoce como factor de interceptación (FI), así como por la reflectividad. Ambos valores toman el valor de 0,9.
- La potencia de entrada al motor se calcula sustrayendo el valor de pérdidas térmicas en receptor y cavidad a la potencia de entrada a la cavidad. En el caso del programa utilizado, estas pérdidas resultan de un análisis experimental de una instalación determinada. Las pérdidas de la cavidad se calculan en función de la radiación normal incidente (DNI).
- Finalmente la potencia eléctrica viene determinada por la potencia de entrada al motor multiplicada por la eficiencia del mismo. La potencia máxima de salida real del motor es 9 kWe debido a la propia operación del motor del sistema considerado (V-161). En caso de que la potencia de entrada hiciese posible que la potencia de salida fuese

superior a 9 kW<sub>e</sub>, habría que disipar la energía con algún dispositivo adicional. Es necesario conocer el rendimiento del motor en función de la potencia de entrada, que a su vez, vendrá determinada por la irradiancia recibida. En la siguiente figura (Figura 54) se representa la curva implementada en el modelo para un rango de temperatura ambiente de operación entre 30 y 40°C.

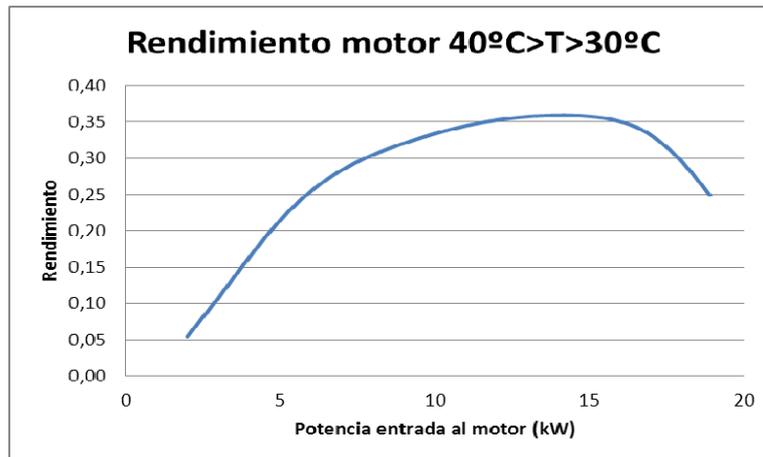


Figura 54 Rendimiento del motor Stirling en función de la potencia de entrada [85].

El programa realiza el análisis de acuerdo a dos premisas diferentes:

- El sistema trabaja con potencia nominal fija. Es decir, tiene un valor nominal de DNI, de forma que sólo proporciona energía cuando el valor de esta DNI es igual o superior a este valor nominal. No aprovecha la energía radiante que está por debajo del valor nominal.
- El sistema trabaja con potencia variable. En este caso, el sistema aprovecha toda la energía radiante recibida, que está determinada por las condiciones meteorológicas registradas en continuo. En este caso se utiliza la variación del rendimiento del motor en función de las condiciones de irradiación a través de la potencia de entrada.

En el programa, estas dos formas de cálculo se denominan “Análisis I” y “Análisis II”. La selección de uno u otro método de análisis se determinan en la primera fase del cálculo.



Figura 55 Pantalla principal del programa.

Los datos de entrada al programa se detallan a continuación, así como el rango de selección de estos datos. Estos datos incluyen la posibilidad de definir hibridación y aplicación de almacenamiento térmico al sistema. El rango de validez se basa en valores factibles de utilización. La utilización de valores fuera de este rango puede provocar un fallo en la ejecución del programa.

- Valor de irradiancia nominal de diseño del equipo. Rango recomendado: 200-1200 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).
- Descenso mínimo en el valor de irradiancia que ha de producirse para considerar un transitorio. Valores recomendados: 50-1000 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).
- Duración mínima que ha de presentar un descenso en el valor de irradiancia solar directa para ser considerado como transitorio. Valores recomendados: 1-3600 (seg).
- Rendimiento medio estimado del sistema. Así pues, será la eficiencia de conversión de energía radiante a energía eléctrica. Valores recomendados: 10-30%.
- Porcentaje máximo de la demanda eléctrica a ser cubierta por la hibridación. Valores recomendados: 0-90 %.
- Rendimiento medio estimado del sistema funcionando con combustión. Valores recomendados: 10-60 %.

- Coste por kW·h térmico (PCI) del combustible seleccionado para emplear en la hibridación. Valores recomendados: 1-100 c€/kW·h.
- Cantidad máxima de energía que es capaz de albergar el sistema de almacenamiento térmico. Valores típicos: 0-500(W.h/m<sup>2</sup>).

En el caso de que no se aplique hibridación y almacenamiento térmico se debe seleccionar el valor nulo en los datos de entrada asociados, es decir 0 en el porcentaje máximo de demanda eléctrica a ser cubierta por la hibridación, y 0 en la cantidad máxima de energía del sistema de almacenamiento térmico.

El programa permite analizar las potencias en cada estadio del sistema, es decir desde la potencia que alcanza la parábola hasta la producida por el sistema. Esto es lo que determina el rendimiento del sistema en función de las condiciones meteorológicas de radiación normal incidente.

A modo de ejemplo, se presenta una gráfica con las diferencias potencias de interés en un día determinado (Figura 56) para el tipo de análisis de potencia variable. En el caso de potencia nominal no existe variación de estas potencias en función del valor de radiación solar, ya que el sistema funciona con potencia fija exclusivamente durante los periodos de tiempo en los que el valor de la radiación es igual o superior al nominal de la instalación. Estas potencias se listan a continuación (resultado en kW):

- Pcon: Potencia concentrada, es decir, la que alcanza la parábola
- Pcav: Potencia que alcanza la cavidad tras pérdidas por reflexión.
- Peng: Potencia que aprovecha el motor, tras pérdidas de calor en la cavidad.
- Pel: Potencia eléctrica producida por el motor.
- Pexc: Potencia excedente cuando se alcanza el límite de funcionamiento del motor.

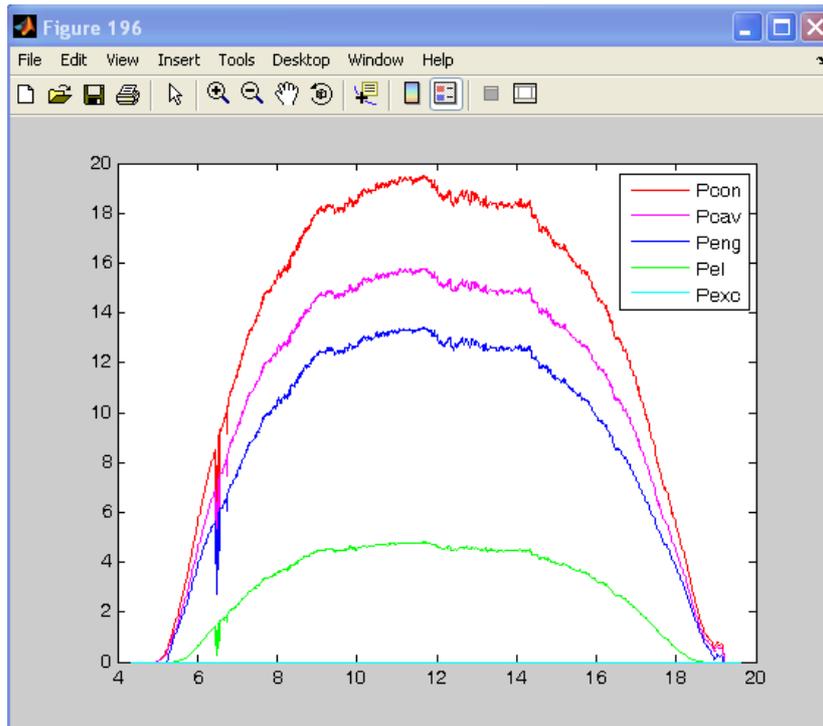


Figura 56 Análisis de distribución de potencias para el caso potencia variable (ejemplo).

Para los dos tipos de análisis (potencia fija y potencia variable) el funcionamiento del sistema viene marcado por la radiación recibida. Se establece una diferencia de tipo de funcionamiento en función de esta radiación, tal como se indica en la siguiente figura (Figura 57), donde se indican los periodos de funcionamiento en valor nominal (indicados con el número 2) o los que están fuera del valor nominal (indicados con el número 1).

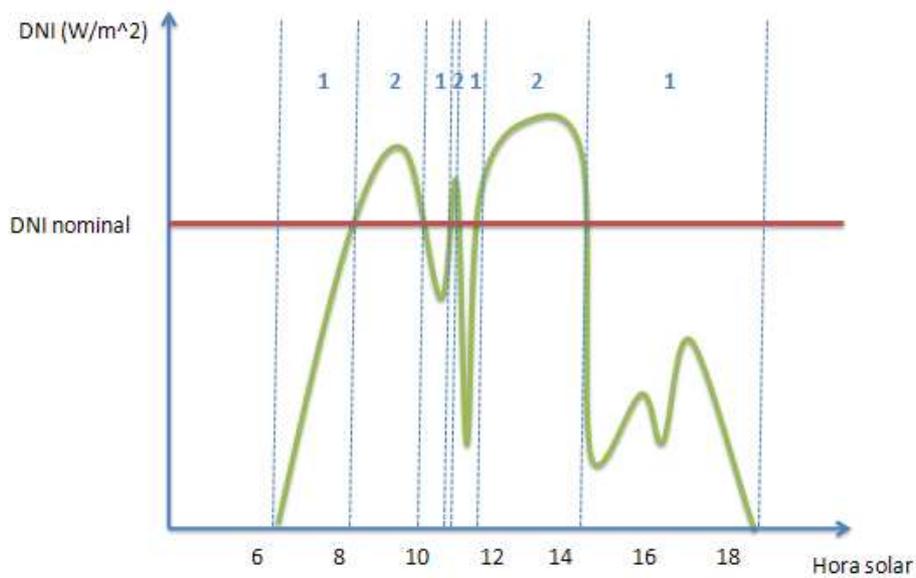


Figura 57 Tipos de periodos de funcionamiento para un día genérico.

- Potencia nominal fija:** La energía radiante aprovechada es la energía recibida en los periodos de funcionamiento donde se alcanza al menos el valor nominal considerando que el equipo no es capaz de asimilar la energía superior a este valor, que en el caso de estudio se ha fijado en 800 W/m<sup>2</sup>. En este caso, la energía necesaria para alcanzar una utilización para la radiación directa nominal se define como la energía que habría que aportar adicionalmente, ya sea mediante hibridación, o mediante cesión del calor almacenado en un sistema de almacenamiento térmico, para restaurar o alcanzar el nivel de irradiancia nominal. Gráficamente se corresponde con el área delimitada superiormente por la línea de radiación directa nominal e inferiormente por la curva de irradiancia construida a partir de las mediciones experimentales, tal como se muestra en la Figura 58 –derecha-.

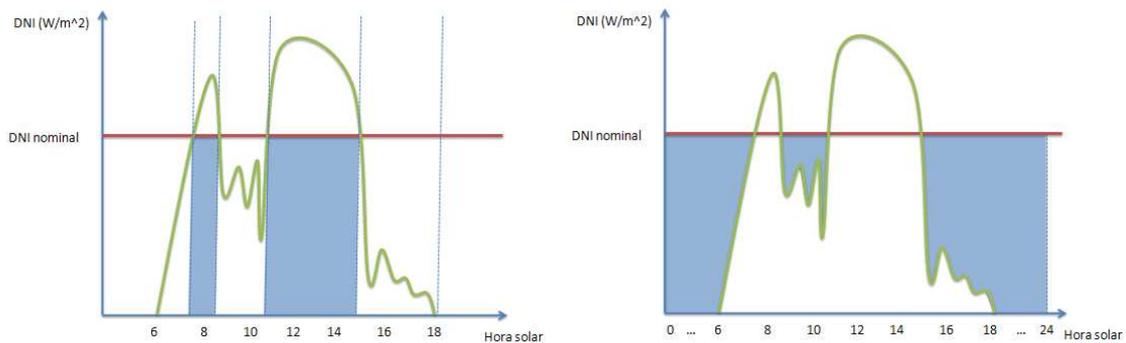


Figura 58 Gráficas DNI utilizada en modo potencia nominal fija, y energía necesaria para alcanzar la DNI nominal en un día genérico.

- Potencia variable:** En este caso la instalación aprovecha toda la energía radiante que alcanza el sistema, de forma que éste funciona a cargas parciales. Este funcionamiento es más representativo de las instalaciones conocidas. En este caso se reducen considerablemente las necesidades adicionales de energía para alcanzar el funcionamiento nominal del sistema. La Figura 59 ilustra el funcionamiento del sistema en potencia variable con recurso exclusivamente solar. En este caso, podría aplicarse hibridación en los periodos donde la curva de irradiancia recibida está por debajo del valor nominal, y aprovechar el excedente de irradiancia en otros periodos para el almacenamiento térmico, que sería utilizado en los momentos inmediatamente posteriores a este exceso de irradiancia, tal como se muestra en la Figura 60.

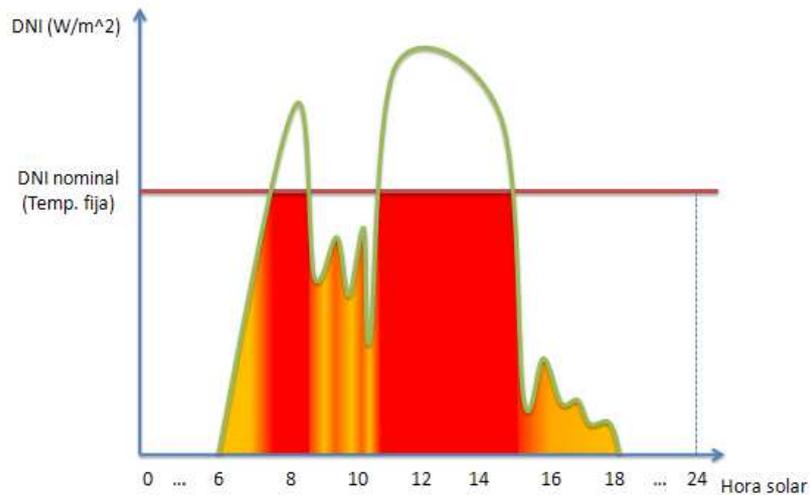


Figura 59 Grado de aprovechamiento de la energía radiante recibida en un día genérico.

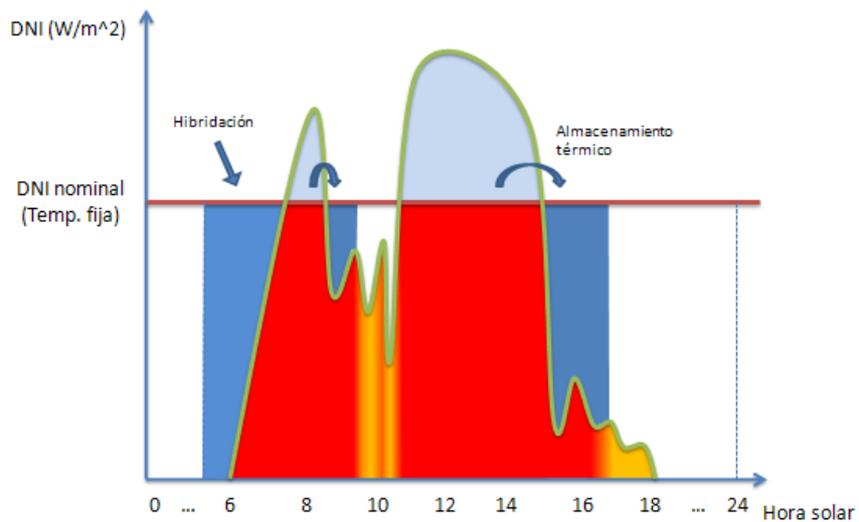


Figura 60 Grado de aprovechamiento de la energía radiante recibida en un día genérico con la aplicación de las tecnologías de apoyo energético descritas.

Con respecto a la aplicación de la hibridación y el almacenamiento térmico, hay que distinguir entre el máximo valor alcanzable teóricamente y la aplicación real, limitada tanto por aspectos técnicos como de regulación.

En particular, el máximo valor alcanzable para el almacenamiento implicaría una capacidad infinita del sistema y un tiempo de respuesta inmediato, mientras que para la aplicación de hibridación supondría la inexistencia de límites en la aplicación de una fuente auxiliar de energía. Estos valores máximos se muestran en las figuras siguientes (Figura 61 para el almacenamiento y Figura 62 para la hibridación).

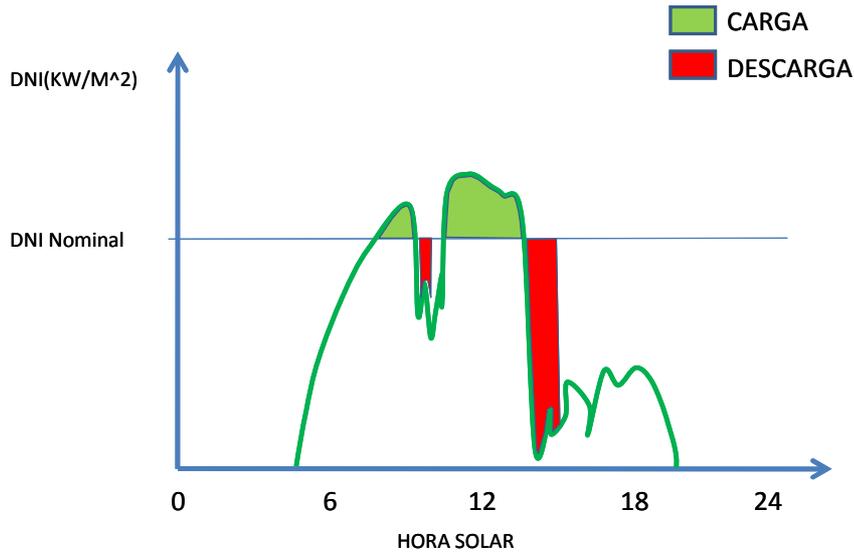


Figura 61 Aplicación de almacenamiento térmico considerando capacidad infinita y tiempo de respuesta inmediato.

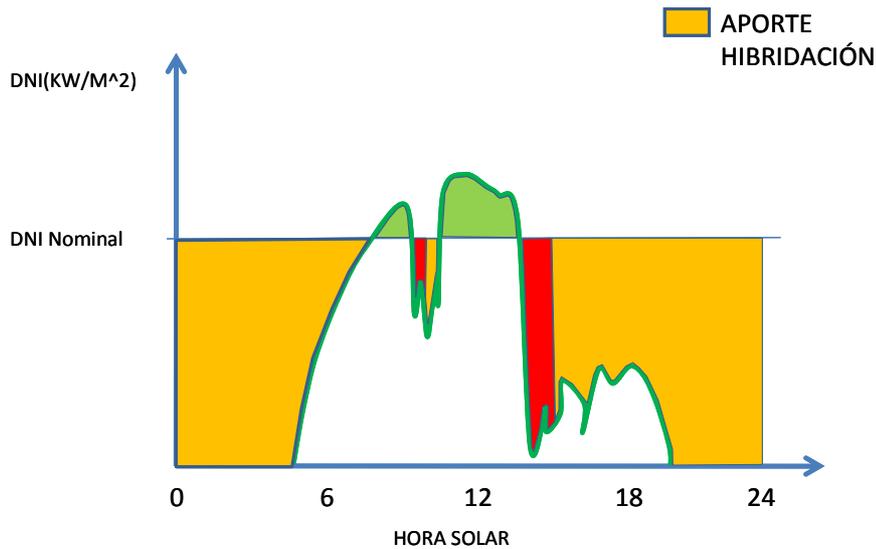


Figura 62 Aplicación de hibridación sin limitaciones de regulación en el uso de combustibles auxiliares y aplicación del quemador instantáneo.

En la aplicación real, las limitaciones asociadas al almacenamiento térmico serían por una parte la velocidad de carga inferior a la velocidad de variación de la DNI, y por otra un límite debido a la saturación del sistema, que tiene un volumen limitado debido a su implementación sobre el sistema. Esto hace que no pueda almacenarse la cantidad teórica presentada previamente. En cuanto a la hibridación la limitación viene principalmente ligada a la legislación que limita el uso de combustibles auxiliares. Así, la imagen real del potencial de ambas tecnologías auxiliares para el disco Stirling (Figura 63) resultaría en una aplicación limitada respecto a la anteriormente presentada.

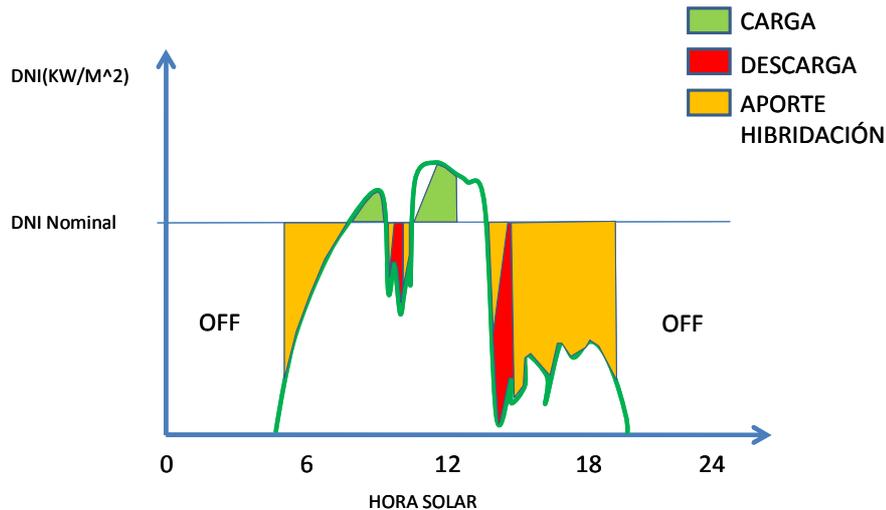


Figura 63 Representación de aplicación real de almacenamiento térmico e hibridación.

#### 4.1.3 Indicadores resultados de evaluación

El objetivo principal de este capítulo de la tesis es evaluar el funcionamiento del sistema de disco Stirling tipo elegido [25] y compararlo con la respuesta en caso de disponer de hibridación y / o almacenamiento térmico. Esta comparación es la que permitirá afirmar si los diferentes tipos de hibridación o almacenamiento térmico son interesantes desde el punto de vista operativo. Por lo tanto, la comparación se basará en parámetros funcionales del sistema de generación eléctrica. Estos parámetros funcionales se relacionan con la viabilidad técnico-económica de las alternativas analizadas. Así, se establecen los siguientes parámetros:

- Potencia suministrada: Este valor se calcula en base anual. El programa informático utilizado permite calcular la potencia suministrada por el sistema en un periodo de tiempo al cual corresponden los datos meteorológicos asociados.
- Horas de operación equivalentes: Referido a las horas de funcionamiento del sistema en caso de que operase en funcionamiento nominal. Supone una reducción respecto a las horas reales en el sistema de potencia variable, ya que en este caso hay periodos de tiempo de operación real donde no se alcanza la potencia nominal.
- Capacidad de la instalación: Este valor se entiende habitualmente como la energía suministrada por el sistema en cuestión medida experimentalmente durante un periodo de tiempo en relación a la energía teórica en condiciones nominales en el mismo periodo. En este caso, no existen medidas experimentales, por lo que se ha interpretado como la energía resultante calculada en un periodo de tiempo con el programa utilizado en comparación con el funcionamiento nominal si fuese posible operar el sistema el día completo (con hibridación, por ejemplo).

El interés de estos tres parámetros funcionales es básicamente establecer la comparación entre el sistema con funcionamiento solo solar, en contraste con la implementación de sistemas para hibridación con combustibles adicionales y / o sistemas de almacenamiento térmico que permitan usar en periodos necesarios el exceso de energía no aprovechada en otras fases de operación.

## 4.2 Resultados aplicados al sistema de disco Stirling

### 4.2.1 Operación solo solar

El resultado de la operación solo solar será la referencia para determinar la ganancia con los sistemas de hibridación y almacenamiento térmico. La primera cuestión es elegir entre los dos modos de operación que permite seleccionar el programa: potencia fija y potencia variable.

Analizando el resultado sobre el año medio en Sevilla referido a la información meteorológica disponible que se ha detallado previamente, se obtienen los siguientes resultados para la operación solo solar –producción anual-

- Valor potencia fija: 4675 kW.h
  
- Valor potencia variable: 16407 kW.h

La diferencia entre ambos valores es claramente significativa. Esto pone de manifiesto la necesidad de utilizar un motor en la instalación que opere a potencia variable. Un gran porcentaje de la energía radiante recibida se capta en situación de irradiancia inferior a la nominal, de forma que no podría aprovecharse en el caso de utilizar un motor que opera exclusivamente a potencia nominal. Los datos experimentales disponibles, así como el modelo asociado en la referencia [25] indican que las instalaciones existentes utilizan motores que funcionan con potencia variable. Por lo tanto, el análisis presentado a continuación se basará en potencia variable.

La tabla que se presenta a continuación presenta los datos de funcionamiento solo solar por mes. Así, puede analizarse la energía captada por el sistema en los diferentes meses, poniéndose de manifiesto una diferencia significativa entre los meses de primavera-verano y los meses de otoño-invierno. De hecho, la energía eléctrica suministrada por el sistema llega a multiplicar por cuatro durante el mes de julio la producida en el mes con menor energía captada, diciembre (2265 kW.h frente a 562 kW.h). La energía eléctrica generada durante los meses de primavera-verano (Abril a Septiembre) representa el 65% de la energía eléctrica generada durante el año. El rendimiento medio de la instalación se sitúa en torno al 15% sin que se aparezcan diferencias significativas en los diferentes meses del año. Los valores se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18 Cálculo de energía producida: Operación solo solar.

<i>Mes</i>	<i>Energía captada (kW.h)</i>	<i>Energía térmica motor (kW.h)</i>	<i>Energía eléctrica solo solar (kW.h)</i>	<i>Rendimiento medio (%)</i>
<b>Enero</b>	7594	6557	1205	15.87
<b>Febrero</b>	7543	6502	1182	15.68
<b>Marzo</b>	7584	6522	1146	15.11
<b>Abril</b>	8783	7541	1366	15.56
<b>Mayo</b>	10308	8890	1603	15.55
<b>Junio</b>	12710	10985	1997	15.71
<b>Julio</b>	14117	12197	2265	16.05
<b>Agosto</b>	11074	9564	1762	15.91
<b>Septiembre</b>	11231	9705	1777	15.82
<b>Octubre</b>	5742	4944	863	15.03
<b>Noviembre</b>	4554	3924	677	14.87
<b>Diciembre</b>	3684	3185	562	15.27
<b>ANUAL</b>	104923	90516	16407	15.64
<b>Media Diaria</b>	313	270	49	

#### 4.2.2 Hibridación con gas natural

La aplicación de hibridación en el caso de la tecnología de disco Stirling presenta las ventajas generales de esta fuente auxiliar de energía, de forma que aporta flexibilidad, adaptabilidad a los transitorios meteorológicos y mejora de la gestión energética. Además, permite mejorar la recuperación de la inversión y el tiempo de operación útil. Estos son dos factores clave para esta tecnología, ya que actualmente se necesita una evolución en el coste de la energía producida para ser competitivo con otras tecnologías de aprovechamiento de fuentes renovables.

Al ser un motor de combustión externa, el motor Stirling puede suplirse de una gran diversidad de fuentes energéticas. La hibridación consistirá precisamente en que el motor tome la energía para su funcionamiento de otras fuentes adicionales al recurso solar, de forma combinada o alternada.

La hibridación con combustibles fósiles es una alternativa factible debido a la disponibilidad de suministro de éstos, aunque elimina en parte el concepto de tecnología renovable del sistema de disco Stirling. En todo caso, es una opción interesante especialmente si se tiene en cuenta que algunas de las localizaciones geográficas donde esta tecnología presenta un mayor potencial de explotación (por ejemplo, países del norte de África y de Oriente Medio) son regiones donde se realizan importantes extracciones de los combustibles fósiles. En concreto para este análisis se ha considerado el gas natural, aunque también podría considerarse otros, tales como propano o butano.

La aplicación de hibridación está limitada por las regulaciones nacionales que a su vez dependen del tipo de combustible utilizado como fuente energética auxiliar. En concreto, en España, donde se ha basado el presente estudio, debe considerarse el Real Decreto RD661/2007 [86]. El límite establecido para la hibridación de instalación de aprovechamiento de energía solar con combustibles fósiles es del 12% de la electricidad anual generada, incrementándose hasta el 15% en el caso de que el combustible fósil en cuestión sea gas natural. Así, la hibridación con este combustible fósil en particular aportará una ventaja adicional al permitirse un porcentaje mayor de utilización respecto a la electricidad generada. La limitación en España se ha implementado de forma que es un caso representativo del potencial de la instalación en otras regiones donde se establecen regímenes energéticos similares de limitación de hibridación [94][95]. En el caso de gas natural, donde se establece una significativa limitación restrictiva en su uso, la hibridación se utilizará sobre todo en los momentos iniciales del día, donde la demanda es más alta.

La implementación de la restricción de utilización de gas natural en una instalación solar para el funcionamiento del sistema con potencia variable da como resultado la generación eléctrica presentada en la Tabla 19. En esta se detalla por meses la producción asociada al recurso solar y la debida a hibridación con gas natural.

Tabla 19 Cálculo de energía producida: Hibridación con gas natural

<i>Mes</i>	<i>Energía eléctrica solo solar (kW.h)</i>	<i>Producción eléctrica de la hibridación GN (kW.h)</i>	<i>Producción sistema hibridado GN (kW.h)</i>
<b>Enero</b>	1239	219	1458
<b>Febrero</b>	1233	218	1451
<b>Marzo</b>	1190	210	1400
<b>Abril</b>	1403	248	1651
<b>Mayo</b>	1637	289	1926
<b>Junio</b>	2027	358	2385
<b>Julio</b>	2299	406	2705
<b>Agosto</b>	1786	315	2101
<b>Septiembre</b>	1813	320	2133
<b>Octubre</b>	895	158	1053
<b>Noviembre</b>	711	125	836
<b>Diciembre</b>	600	106	706
<b>ANUAL</b>	16834	2971	19804
<b>Media Diaria</b>	50	9	

La hibridación en sí misma tiene un beneficio respecto al funcionamiento solo solar. El hecho de que el sistema hibridado cambia la energía de entrada al motor Stirling, hace que éste opere

en un punto diferente, dando lugar a un rendimiento mayor del mismo, lo que se contabiliza según el programa en la producción solar. Es por este motivo que hay una diferencia entre la producción mensual y anual en kW.h de la producción solo solar entre el sistema de disco Stirling solo solar y el sistema hibridado, tal como puede observarse en la columna de “Energía eléctrica solo solar” en las Tabla 18 y Tabla 19.

Las consideraciones sobre las ganancias de la hibridación con gas natural se establecen en el siguiente apartado en comparación con la hibridación con biogás.

### 4.2.3 Hibridación con biogás

Con respecto a la hibridación anteriormente referida con un combustible fósil como es el gas natural, la hibridación con biogás cuenta con la ventaja de aprovechar una fuente de energía renovable adicional a la solar. Por lo tanto, en principio se espera un menor impacto medioambiental. La aportación del biogás puede ser mediante producción en la misma ubicación del sistema de disco Stirling y alimentación directa al sistema de hibridación. Esto sería especialmente interesante para instalaciones aisladas donde el suministro de combustibles fósiles como el gas natural no fuese factible.

En relación con la limitación establecida para que la producción de energía mediante el sistema de disco Stirling sea incluida en el sistema tarifario español, según RD661/200722 [86], ésta es considerablemente más alta que en el caso de combustibles fósiles anteriormente referidos. Mientras que esta limitación se fijaba en 12% para combustibles fósiles en general y ligeramente superior, 15%, para el gas natural, en el caso del biogás se incrementa de forma significativa hasta un 50% de la energía anual producida. Es decir, el 50% de la energía que se produzca con la instalación hibridada puede provenir de la combustión del biogás. Esta limitación se ha considerado a la hora de evaluar el sistema hibridado, si bien es cierto que un sistema de generación distribuida no conectado a la red eléctrica no tendría dicha limitación.

Al igual que en el caso anterior, el uso de hibridación, además de suponer un aumento en las horas de operación de la instalación, suponen una ganancia intrínseca en la eficiencia del motor Stirling. Esto sucede igualmente porque se modifica el punto de operación del motor al incrementar la potencia de entrada al mismo, por lo que su eficiencia aumenta. Así se produce una mejora del funcionamiento solo solar. Supone un incremento medio de 6.2% aproximadamente con respecto a la electricidad producida (kW.h) del sistema solo solar. Así, el resultado final de hibridación supone que la producción anual sea más del doble al añadir el aumento de eficiencia a la hibridación (incremento del 112%). En la Tabla 20 se presentan los resultados mensuales y anual correspondientes a la hibridación con biogás.

Tabla 20 Cálculo de energía producida: Hibridación con biogás

<i>Mes</i>	<i>Energía eléctrica solo solar (kW.h)</i>	<i>Producción eléctrica de la hibridación BG (kW.h)</i>	<i>Producción sistema hibridado BG (kW.h)</i>
<b>Enero</b>	1264	1264	2528
<b>Febrero</b>	1245	1245	2490
<b>Marzo</b>	1225	1225	2451
<b>Abril</b>	1438	1438	2876
<b>Mayo</b>	1700	1700	3400
<b>Junio</b>	2115	2115	4230
<b>Julio</b>	2389	2389	4777
<b>Agosto</b>	1863	1863	3725
<b>Septiembre</b>	1888	1888	3775
<b>Octubre</b>	924	924	1849
<b>Noviembre</b>	736	736	1473
<b>Diciembre</b>	603	603	1205
<b>ANUAL</b>	17389	17389	34779
<b>Media Diaria</b>	52	52	

Como se ha explicado anteriormente, interesa evaluar la comparativa de la hibridación con diferentes combustibles. En este caso, con los seleccionados con mayor potencial de implementación: gas natural y biogás. Los parámetros de interés para análisis posteriores de diseño del sistema de hibridación y aplicación al Análisis de Ciclo de Vida son la generación eléctrica conseguida con la hibridación de ambos combustibles y el consumo asociado a esta hibridación:

- La producción anual asociada al uso adicional de los combustibles es: 125 GJ para el biogás y de 71 GJ para gas natural. Si se considera la vida útil de la instalación de 30 años (basado en informaciones relativas a discos Stirling concretos [96][97]), la energía total producida durante este tiempo sería de 3750 GJ para el biogás y de 2130 GJ para el gas natural.
- De estos valores se calculará en el apartado correspondiente el consumo asociado a cada uno de los combustibles. La cantidad del combustible vendrá determinada por la eficiencia del sistema de combustión así como por la capacidad calorífica del combustible en cuestión.

En cuanto a factores de operación de la instalación, la aplicación de hibridación supone también un incremento significativo en las horas efectivas de operación de la instalación. Esto implica un impacto favorable en cuanto a la amortización de los equipos y a la carga medioambiental asociada. La evaluación económica queda fuera del alcance del presente trabajo debido a la falta

de información al respecto. Sin embargo, el cálculo asociado será utilizado para la evaluación medioambiental de los sistemas. Así, se evaluará el balance entre la carga medioambiental asociada al consumo de combustible respecto a la energía generada por el sistema hibridado. La carga medioambiental debe tener también en cuenta la adición de equipo específico para la hibridación, tales como el quemador de combustible.

Con respecto a los parámetros utilizados para evaluar la ganancia del sistema hibridado, se han calculado los siguientes indicadores:

- Horas equivalentes de operación. La utilización de hibridación supone una ganancia significativa al respecto. Si se considera como base la utilización solo solar, la hibridación con gas natural supone un incremento de 20% de horas de operación, mientras que este valor se incrementa hasta el 112% en el caso del biogás. Como utilización media por día, esto significa que si la instalación solo solar funciona 4.9 horas al día a plena capacidad, este valor se incrementaría a 6.0 horas para gas natural y a 10.5 horas para biogás.
- Factor de capacidad, considerado como la relación entre la energía de salida calculada respecto a la máxima alcanzable en el caso de que la instalación funcionase durante todo el día a plena potencia.
  - Factor de capacidad funcionamiento solo solar: 19%
  - Factor de capacidad para hibridación con gas natural: 23%
  - Factor de capacidad para hibridación con biogás: 40%

#### 4.2.4 Aplicación de almacenamiento térmico

Otra forma de afrontar la indisponibilidad transitoria del recurso solar es utilizar sistemas de almacenamiento térmico como energía auxiliar para el suministro de electricidad continua y constante. Así, el almacenamiento térmico permite adaptar la demanda energética con la generación, de forma que la energía almacenada en el sistema en etapas de exceso de energía recibida se libera en los momentos en que ésta es necesaria. Por supuesto, para que pueda suceder esta liberación de energía, el sistema de almacenamiento se ha debido cargar previamente por radiación excedente durante las horas previas de funcionamiento. Si asumimos que el sistema de almacenamiento tiene un límite superior de  $50 \text{ W.h/m}^2$  [84][85][98] y tenemos en cuenta además la cantidad de horas sin recurso solar durante el día completo, se hace evidente que el sistema no será capaz de asegurar funcionamiento continuo. Se calcula entonces el porcentaje de la energía necesaria para el funcionamiento continuo. Si se plantea el funcionamiento continuo, el resto de la energía debe ser suministrada por hibridación, respetando siempre los límites establecidos por las regulaciones pertinentes. Con respecto a la hibridación que se utiliza principalmente en los momentos iniciales del día, el almacenamiento térmico se utilizará cuando el sol provea menor energía, por ejemplo, al anochecer, momento en el cual el sistema de almacenamiento estará cargado a su máxima capacidad. Por supuesto, si durante el día se ha producido momentos de nubes, el sistema de almacenamiento térmico puede utilizarse también en los transitorios.

En particular, para el caso estudiado donde el valor nominal de radiación se ha establecido en  $800 \text{ W/m}^2$ , el análisis da como resultado que el potencial de recuperación de energía es prácticamente despreciable en el caso de que el sistema opere con potencia variable. En concreto, se obtiene una ganancia de un 2% respecto a la energía eléctrica generada. Por lo tanto, en el presente estudio no se ha considerado la implementación de un sistema de almacenamiento térmico para los análisis posteriores.

En todo caso, cabe señalar que un sistema de almacenamiento térmico podría ser interesante en alguno de los siguientes casos:

- Para un sistema que opera a potencia fija. En este caso, el sistema de disco Stirling no aprovecha la energía procedente de radiación con valor por debajo del valor nominal, Por lo tanto, esta energía puede almacenarse en el sistema. Sin embargo, la limitación del mismo establecida en  $50 \text{ W.h/m}^2$ , hace que la ganancia se vea limitada por factores inherentes al funcionamiento del material para almacenamiento térmico, cuyo peso y volumen están limitados en el sistema de disco Stirling, por tratarse de un sistema que debe ser ubicado en el motor mismo, es decir, soportado su peso por el sistema global. Así, la ganancia evaluada es de  $6049 \text{ kW.h}$  anuales frente a la producción de  $4675 \text{ kW.h}$  para el sistema operando con potencia constante.
- En el caso de un sistema cuya potencia nominal de funcionamiento sea inferior al límite establecido para esta instalación, de  $10 \text{ kWe}$ , podría tener un potencial interés en el caso de sistema con potencia variable. Sin embargo, el límite de capacidad de almacenamiento anteriormente referido supondrá asimismo una limitación en los beneficios obtenidos que deben ser contrastados con los costes asociados a su implementación y utilización

# 5

## PRE-DISEÑO DEL SISTEMA HIBRIDADO

*Conocido por una parte el interés en la investigación en sistemas híbridos aplicados a la tecnología de disco Stirling, mostrado en el capítulo de estado del arte, y por otra, las ventajas en la operación del sistema y viabilidad de la tecnología analizada en el capítulo de hibridación, se plantea la definición de los elementos adicionales necesarios para dicha hibridación.*

A la instalación habrá que añadir el suministro de combustible seleccionado, bien sea gas natural o biogás, un quemador para dicho combustible, un receptor híbrido que permita la transferencia de energía al fluido del motor Stirling tanto del recurso solar como de la combustión, así como otro elemento adicional que mejora la eficiencia del sistema, un precalentador de aire de combustión. El objetivo del presente capítulo es analizar las bases de las que debería partir el diseño de los componentes para el sistema híbrido. No es posible realizar un diseño detallado, para lo que se necesitaría información técnica exhaustiva de un sistema determinado, de la que no se dispone.

En cuanto al combustible, aunque la hibridación podría ser también realizada con combustibles líquidos o sólidos, se han considerado combustibles gaseosos debido a su potencial suministro en red, limpieza y menor impacto medioambiental. Las instalaciones asociadas al suministro se consideran instalaciones comunes que no serían específicas del sistema de disco Stirling, por lo que no se entrará a analizarlas. De los combustibles gaseosos, se han considerado el gas natural y el biogás, uno debido a su accesibilidad y el otro por su naturaleza de fuente energética renovable, lo que potencialmente presenta ventajas para la evaluación medioambiental del funcionamiento de la instalación en modo híbrido. Este aspecto se analiza en detalle en el capítulo siguiente, asociado al Análisis de Ciclo de Vida. La transición entre uno y otro combustible es relativamente sencilla, ya que solo requeriría de modificaciones no complicadas en el sistema de inyección de combustible [99]. En el caso, del biogás podría ser necesario un sistema de limpieza para eliminar impurezas [100].

Sí presentan particularidades específicas de su implementación en el sistema de disco Stirling el receptor y el quemador. Para el receptor se plantea una alternativa con respecto al intercambiador presente en el motor considerado de referencia para el presente trabajo, el V161 (del sistema de disco Stirling SBP referido con anterioridad), junto con las consideraciones que habría que tener en cuenta para su diseño final. En cuanto al quemador, definido para un combustible gaseoso, el punto clave de su definición será la compatibilidad de su suministro de energía con la radiación solar, de forma que permita un diseño adecuado del receptor que debe absorber ambas fuentes de energía. Es además importante la integración del sistema quemador-receptor en la instalación. Ésta presenta limitaciones geométricas debido a la disposición asociada a la absorción de radiación solar.

Se analiza también el dimensionamiento asociado a un precalentador de aire de combustión. Éste permite un aumento de eficiencia del sistema, que se ha tenido en cuenta en el análisis de operación realizado para los sistemas híbridos, con el fin de valorar el mejor escenario de mejora potencial de la instalación con suministro adicional de combustible.

## 5.1 Receptor híbrido.

El funcionamiento del sistema híbrido supone la aportación alternativa o simultánea de dos fuentes de energía, tal como se representa en la Figura 64. Uno de los puntos clave de definición del sistema es el propio receptor.

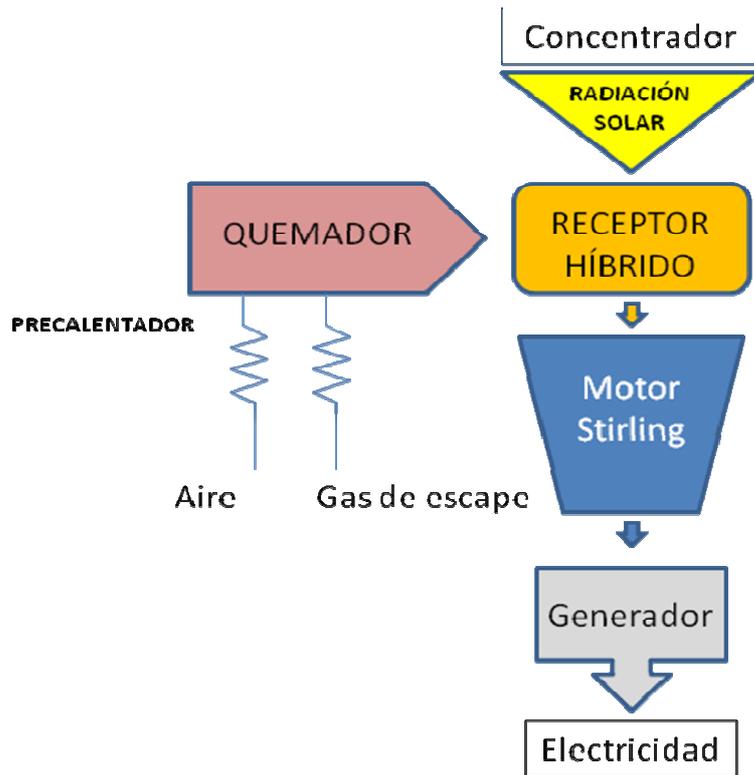


Figura 64 Esquema funcionamiento sistema disco Stirling con receptor híbrido.

En el capítulo del estado del arte se han presentado diferentes alternativas para la definición de la superficie receptora para el caso de hibridación, con alternativas de receptores de tubos directamente iluminados y de reflujo. Otra opción a estas propuestas sería la recepción solar directa sobre el cabezal del motor [101] o sobre un receptor compuesto por un bloque por cuyo interior circulase el gas del ciclo (Figura 65) donde se produciría la transferencia térmica directa al fluido de trabajo en la zona caliente del motor. Por su simplicidad y factibilidad de implementación, es la seleccionada como propuesta de diseño en el presente trabajo.

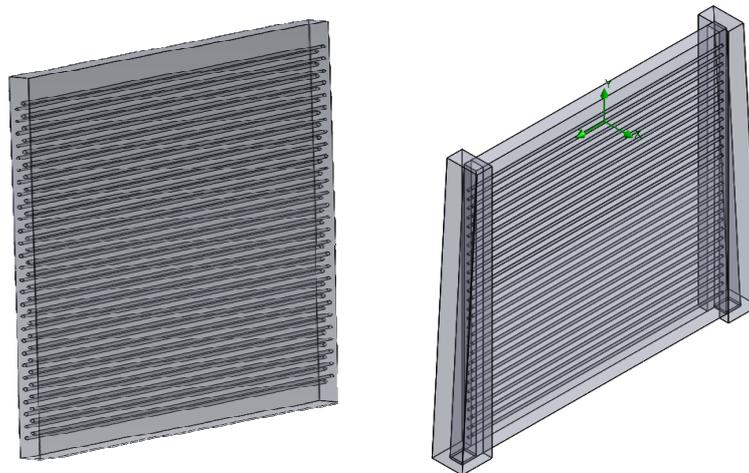


Figura 65 Esquema de un receptor compuesto por un bloque por cuyo interior circulase el fluido de trabajo.

Esta es una alternativa, de hecho, a los receptores de tubos directamente iluminados. La problemática asociada a este tipo de receptores es que la mancha solar no es uniforme sobre la superficie receptora, tal como se muestra en la Figura 66.

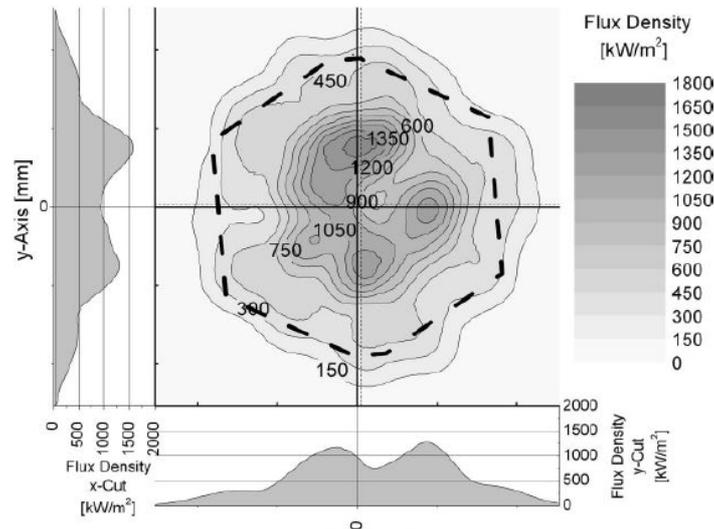


Figura 66 Distribución típica del flujo solar normalizado en el plano del receptor (densidad de flujo  $\text{kW/m}^2$  – Flux Density-) Representación ejes x-y [102].

Para solventar el problema de la distribución, se propone añadir al absorbedor una superficie difusora que reciba la radiación solar concentrada y que la distribuya homogéneamente al área de recepción del cabezal del motor. Así, ésta constituiría el receptor, ya que recibiría en primer lugar la energía solar concentrada. Debe estar integrada además de forma que no se mezcle la zona solar y la de la cámara de combustión. Esta superficie receptora debe tener la misma geometría que la parte final de la cavidad y estar unida a la superficie del cabezal. Así, proveerá la energía uniformemente. Será ésta la que deba asumir las solicitaciones asociadas al funcionamiento a alta temperatura. Como material, se propone el cobre, debido fundamentalmente a su alta conductividad térmica ( $385,9 \text{ W/m.K}$ ). Por supuesto, el diseño definitivo debería ser simulado convenientemente con el fin de asegurar que cumpla las solicitaciones mecánicas así como su cometido de difusión térmica.

Como se ha señalado previamente, el receptor debe compatibilizar ambas fuentes de energía, asegurando el aislamiento entre las zonas de recepción solar y de combustión. Esto se debe a que los gases de escape procedentes de la combustión (principalmente vapor de agua y dióxido de carbono) intervendrían de forma negativa en la captación de energía solar. Estos gases aumentan la difusión de la radiación solar, lo que supondría menor porcentaje de radiación solar directa incidente sobre la superficie receptora. En el apartado correspondiente a los quemadores se presentan posibles integraciones con el quemador, donde se presentan formas potenciales para el receptor planteado para la superficie difusora.

Los parámetros clave para el diseño de este receptor planteado serán, por un parte, las condiciones de funcionamiento que garanticen su durabilidad, y por otra parte, la integración con el sistema de disco Stirling concreto seleccionado.

En cuanto al primer punto, el principal parámetro a considerar es la alta temperatura a la que está expuesto. Recibe la radiación solar conjunta o alternativamente con la energía procedente de la combustión cuando se activa el modo híbrido. La concentración de energía solar produce temperaturas en el receptor en el rango de 600 a 900°C. En función de las características del motor y los materiales, la temperatura máxima a considerar para el receptor puede estar en torno a 800°C [101] para la radiación solar. En cuanto a la temperatura provocada por la combustión, la temperatura de llama está en el rango de 1000 a 1500°C (en función de las características de llama). Esto produce una temperatura en el receptor del mismo orden de magnitud de la concentración solar, ya que la temperatura del quemador será algo inferior a esta temperatura de llama. En la siguiente figura (Figura 67) se presenta un ejemplo de temperaturas de trabajo asociado al sistema Sandia donde se utiliza un receptor de refluo [104]. En este caso, la superficie de receptor con el sistema funcionando en modo combustión presenta una temperatura de 900°C.

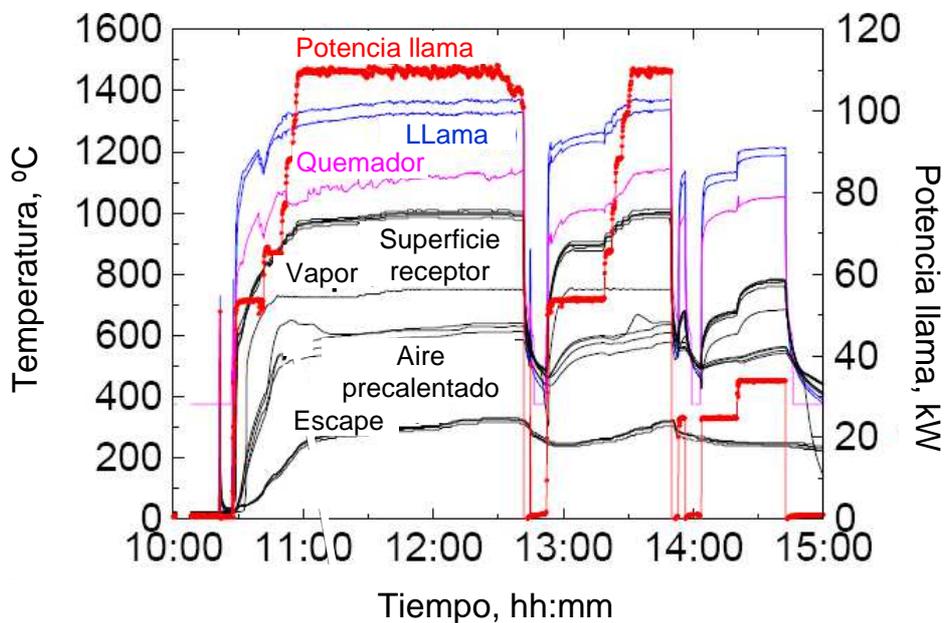


Figura 67 Distribución de temperaturas según receptor Sandia [104].

Los rangos de temperaturas y potencias de trabajo para los diferentes elementos de un receptor híbrido en un motor V161 del sistema de disco Stirling de SBP, [104] deberían estar entre los siguientes rangos:

- Potencia de llama: 100 ÷ 150 kW
- Potencia del quemador: 50 ÷ 80 kW
- Temperatura de llama: 1000 ÷ 1500°C
- Temperatura en la superficie del receptor: 700 ÷ 800°C
- Temperatura del aire precalentado: 500 ÷ 650°C
- Temperatura de los gases de escape: 200 ÷ 300°C

En cuanto a la integración del receptor, la definición del sistema de disco Stirling específico determinará cómo se va a realizar. Para la implementación del sistema híbrido en el V161 no se plantea la modificación ni del motor Stirling ni de la cavidad receptora de energía solar, ya que son elementos ya optimizados para el aprovechamiento óptimo de la energía solar. En particular, la geometría interna de la cavidad está específicamente diseñada para garantizar el máximo aprovechamiento de la radiación solar incidente, minimizando las pérdidas térmicas asociadas a la captación solar. La cavidad está fabricada en un material aislante de alta temperatura, y garantiza que prácticamente el 95% de la radiación solar incidente se refleje sobre la superficie receptora. Así, las modificaciones asociadas a la hibridación no interferirán sobre el método de operación solo solar. Con respecto al caso específico del V161 (en la siguiente imagen: Figura 68), supondría sustituirse el receptor de tubos directamente iluminados por la superficie receptora mostrada en la Figura 65.

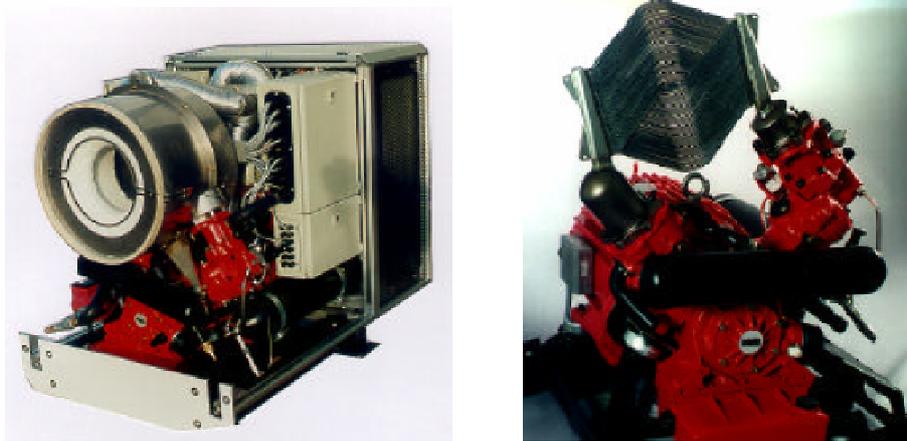


Figura 68 Fotografías motor SOLO-161 [25].

Esta superficie receptora estaría integrada en la cavidad solar, tal como se muestra en la Figura 69, pudiéndose ésta adaptarse a geometría circular, como se muestra en los diferentes modelos mostrados en el punto 5.2 de este capítulo.

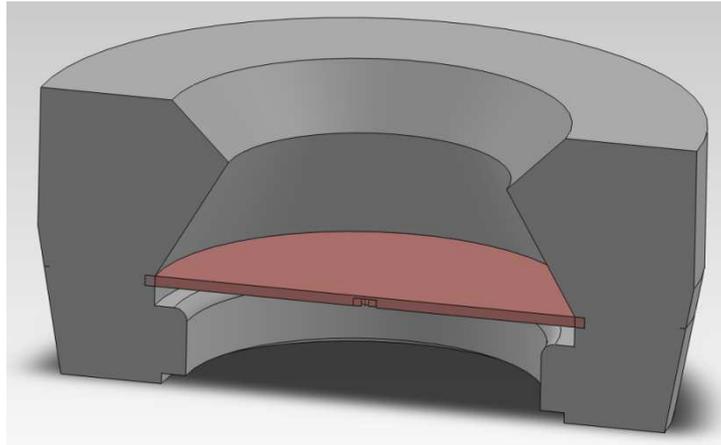


Figura 69 Sección transversal de la cavidad del receptor solar básico con la superficie receptora señalada en color rojizo.

## 5.2 Quemador de combustible

Para la definición del quemador no hay diferencias significativas en función de la utilización de gas natural o biogás. Los datos de entrada para la definición de este quemador serán el modo de combustión y la integración en el entorno seleccionado del sistema de disco Stirling.

En cuanto al modo de combustión, se propone un quemador de tipo radiante, debido a la similitud de la forma de cesión de energía con la radiación solar. Este modo de combustión no provee llama en contacto directo con la superficie receptora, así que los dos modos de funcionamiento – solar y de combustión- supondrían condiciones de trabajo similares para el receptor. Además, este tipo de quemador presenta una mayor eficiencia de cesión de la energía a dicha superficie. Otras opciones [105] serían quemadores de premezcla, quemadores para oxicomustión y quemadores de tiro natural.

Hay experiencias previas de utilización de estos quemadores para el motor Stirling [106], principalmente para cogeneración. Existen varias instalaciones de cogeneración [107][108][109] utilizando estos quemadores, que presentan un buen indicio de su factibilidad de implementación. En la Figura 70 se presenta un ejemplo de aplicación.



Figura 70 Quemador típico para aplicaciones de cogeneración con motor Stirling [110].

En particular, se conoce una aplicación de la empresa Worgas [111], en colaboración con la empresa Qnergy [112], donde se ha desarrollado un quemador específico para el motor Stirling. El quemador se muestra en la figura siguiente (Figura 71).



Figura 71 Aplicación Worgas para hibridación gas solar [111].

Los quemadores radiantes pueden ser metálicos o cerámicos. La elección de uno u otro dependerá de las limitaciones asociadas al sistema específico donde se integraría, ya que su diferencia fundamental es la factibilidad de formas geométricas diversas, menor para el caso del material cerámico.

En el caso de quemador metálico, el elemento principal que constituye un quemador radiante es la tela metálica que cubre la zona de llama. Esta malla está fabricada generalmente de acero fino, y queda incandescente al producirse la combustión en la parte interna de quemador. Así, parte de la energía liberada se cede en forma de radiación (como valor general, alrededor del 50% [113]) hacia la superficie objetivo. Por otro lado, esta malla metálica también suele ir recubierta con una capa catalítica compuesta de un material con estructura porosa (óxido de

aluminio), cuyos poros se encuentran parcialmente rellenos con algún tipo de catalizador, por ejemplo, paladio [114]. Como beneficio añadido, este montaje provoca una reducción en la temperatura de la zona de llama evitando así, casi por completo, la formación de  $\text{NO}_x$ . Los procesos de fabricación de estos quemadores permiten realizar diferentes geometrías, lo que facilitaría la integración en el entorno a analizar del disco Stirling.

La tecnología que utiliza una matriz cerámica porosa [115][116] permite alcanzar temperaturas mayores de utilización (en torno a los  $1200^\circ\text{C}$ ), además de evitar el problema de corrosión con material metálico. La desventaja de la utilización del material cerámico es, como se ha referido anteriormente, la limitación en cuanto a las geometrías factibles con los procesos de fabricación asociados, lo que dificultaría la integración del quemador.

En cuanto a la adaptación de la cesión de energía, el quemador radiante provee un amplio rango de potencias admisibles. Así, este tipo de quemador puede proveer energía en relación a la cantidad de combustible suministrado, incluso cambiando del modo radiante a modo de llama azul (Figura 72), que aunque menos eficiente energéticamente, supondría una mayor densidad de potencia para el quemador. Esta posibilidad de graduación del quemador hace que su operación sea similar a la propia de la radiación solar y que, por lo tanto, presente un alto potencial para ser utilizada como su complemento.

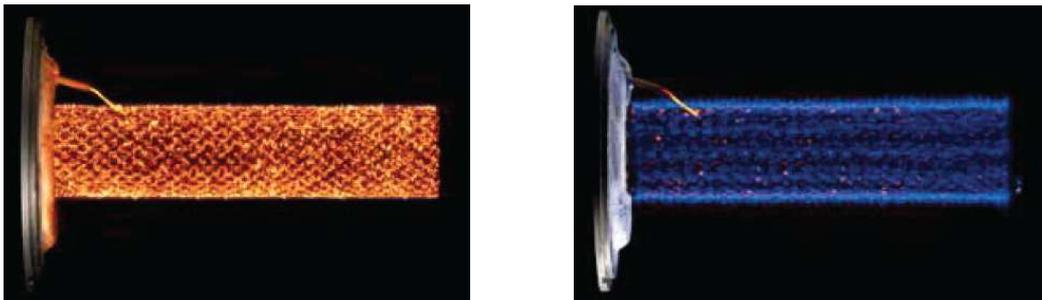


Figura 72 Quemador radiante cilíndrico en sus dos modos de operación: Izqda. Modo radiante. Drcha. Modo llama azul [110].

Un rango habitual de densidades de potencia alcanzables por este tipo de quemadores se encontraría entre 1 y  $25 \text{ kW/dm}^2$ .

En cuanto al segundo aspecto a considerar como datos de entrada para la definición del quemador, referido a la integración con el receptor y la cavidad, las opciones geométricas con el sistema de referencia seleccionado son las siguientes:

- **Quemador cilíndrico perimetral**

La adaptación a este quemador requeriría dotar de un espesor determinado a la superficie receptora, de forma que se asegure la transferencia adecuada con una densidad de potencia factible del quemador, tal como se muestra en la Figura 73.

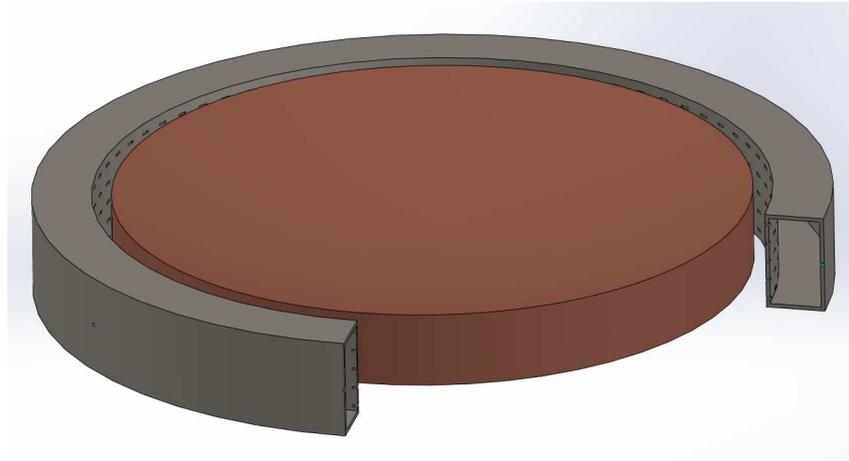


Figura 73 Modelo del receptor híbrido con quemador cilíndrico perimetral.

Con respecto a la integración con la cavidad, ésta debería actuar como elemento de aislamiento entre la superficie receptora de la radiación solar (frontal) y la de la zona de combustión (lateral). Este cierre debería ser objeto de un diseño específico dadas las dilataciones térmicas que podrían producirse. Además, es necesario proveer los adecuados sistemas de alimentación de la mezcla de aire-combustible y de escape de los gases de combustión. Una alternativa sería la colocación radial de estos conductos, pudiéndose realizar tantas divisiones en la circunferencia como sean necesarias para garantizar un funcionamiento homogéneo [104], como en el caso del sistema Sandia [104], tal como se indica en la figura siguiente (Figura 74).

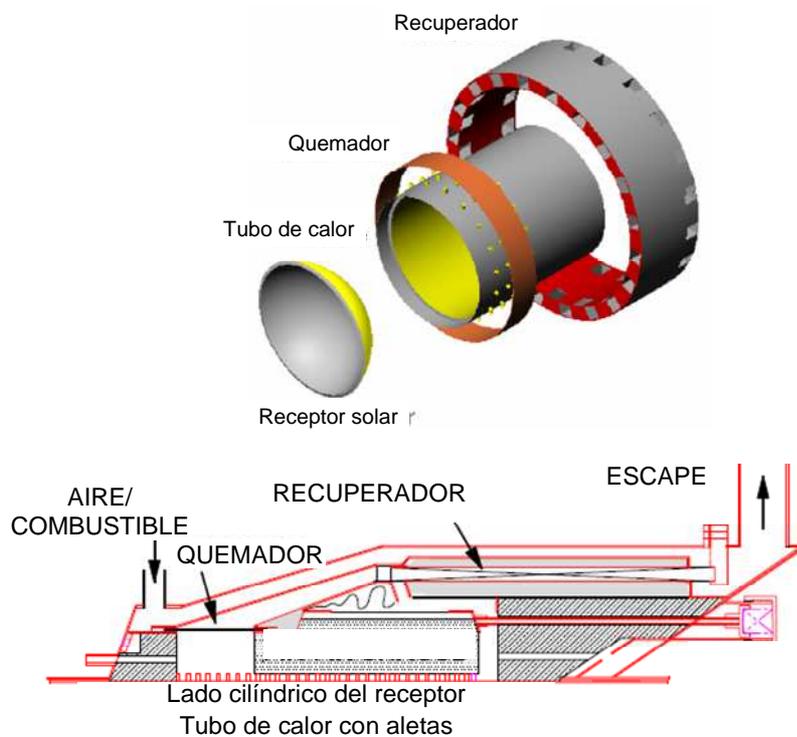


Figura 74 Esquema de adaptación de un quemador con indicación de canales de entrada y salida de aire / gases. Sistema Sandia [104].

Con respecto a la integración del receptor con el quemador, pueden plantearse también alternativas de diseño del receptor. En particular se han analizado para el caso del quemador cilíndrico perimetral, tal como se muestra a continuación:

- Receptor con perfil cóncavo

Con respecto al diseño presentado en la Figura 73, se propone un perfil parabólico de forma que la superficie receptora sigue teniendo el espesor necesario para garantizar el área de recepción de la combustión, pero disminuyendo este espesor en la zona central, ya que no sería necesaria para la función de captación solar (Figura 75). Por supuesto, este perfil debería ser validado también con las simulaciones térmicas adecuadas. Previsiblemente, el perfil supondría una mejora en la captación solar ya que posibilitaría una incidencia más perpendicular de los rayos reflejados por el concentrador de la instalación.

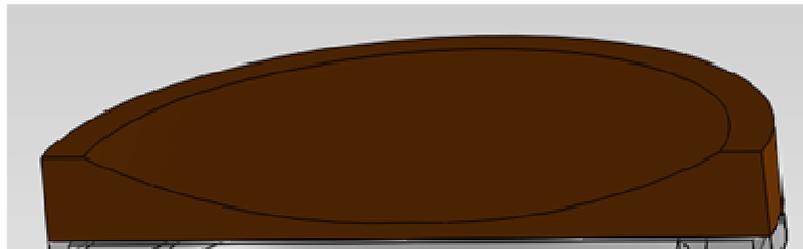


Figura 75 Modelo del receptor híbrido con perfil cóncavo para quemador cilíndrico perimetral.

- Receptor con perfil bicóncavo

Una alternativa al diseño anterior, sería tener también un perfil cóncavo para la recepción de la energía de combustión. Permitiría reducir la cantidad de material y aumentar la superficie receptora. Esta geometría podría utilizarse también para diseñar la zona de cierre entre zonas de recepción.

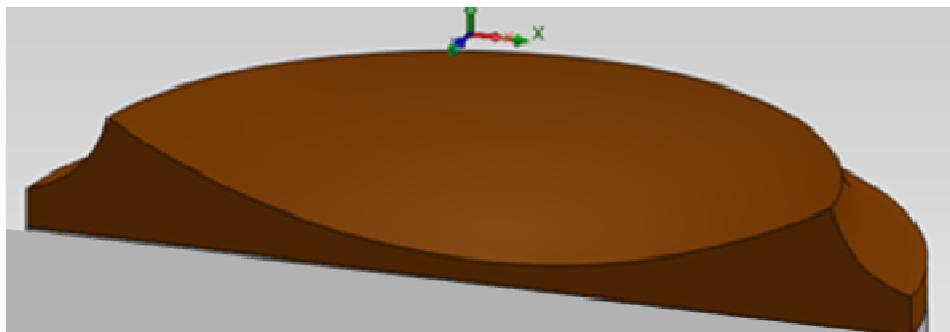


Figura 76 Modelo del receptor híbrido con perfil bicóncavo para quemador cilíndrico perimetral.

- **Quemador anular central**

Otra posible solución sería realizar el aporte de energía de la combustión desde la zona superior (Figura 77). Este caso requeriría aumentar la superficie receptora para aislar las dos zonas de recepción. El diseño específico de esta opción podría ser complicado.

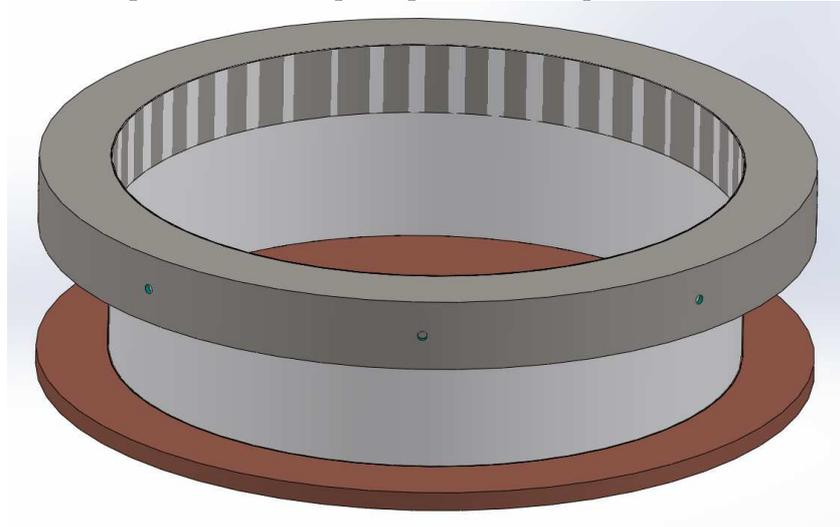


Figura 77 Modelo del receptor híbrido con quemador anular cenital.

- **Quemador anular contracenital**

Como la opción anterior se prevé complicada para aislar las zonas de recepción, se propone también la colocación del quemador en la zona inferior de la superficie receptora (Figura 78). Requiere igualmente aumentar la superficie radialmente.

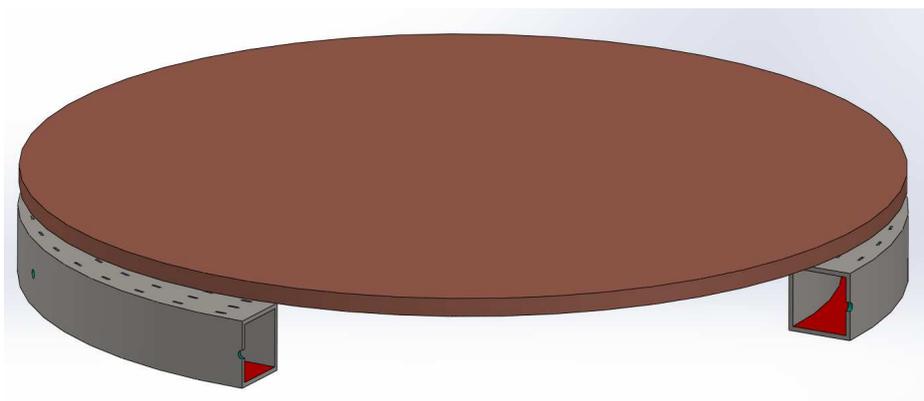


Figura 78 Modelo del receptor híbrido con quemador anular contracenital.

El quemador se utilizaría integrado en el sistema de suministro de combustible, cuya estructura básica se muestra en la figura siguiente. Los principales componentes del mismo son los

siguientes [117][118]: quemador, sistema de control, regulador, válvula de gas, cámara de premezcla, salidas de gases de escape y sistema de impulsión.

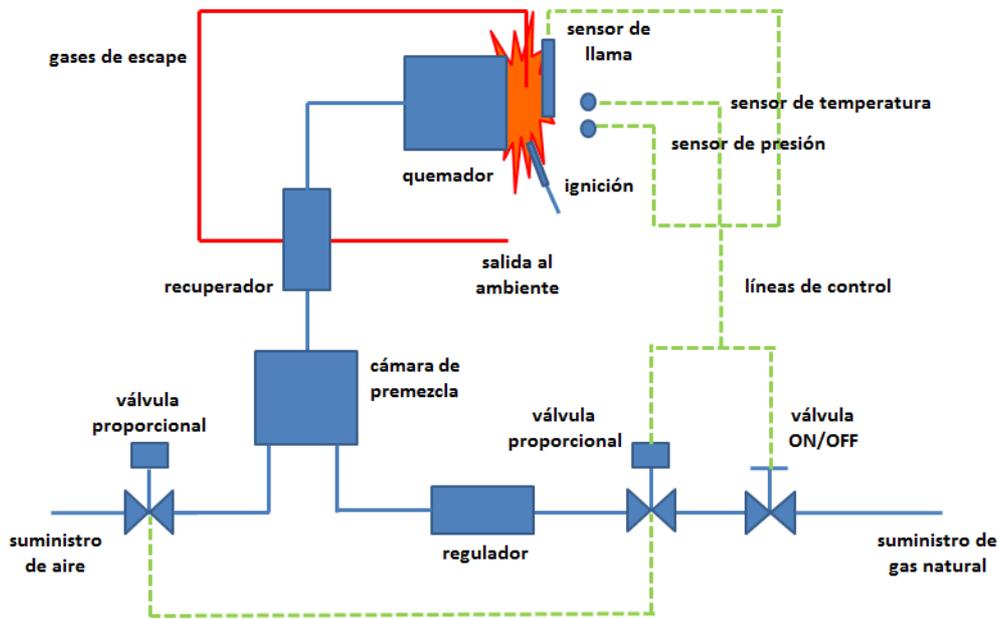


Figura 79 Esquema básico de un sistema de combustión convencional de combustible gaseoso (ejemplo con gas natural).

A modo de ejemplo, se ha realizado el dimensionamiento asociado a un quemador en el sistema de disco Stirling de referencia. Con el fin de determinar la superficie necesaria de quemador a integrar en el sistema híbrido, es necesario calcular la potencia nominal del quemador a instalar. Los datos de entrada para el cálculo, en el caso del sistema de referencia, son los siguientes:

- Potencia nominal de la instalación: 10 kW<sub>e</sub> (valor de diseño)
- Rendimiento del motor: 35%, valor nominal máximo
- Pérdidas térmicas en la cavidad y receptor: 20% (estimación [119][120])
- Rendimiento del quemador: 50% (información de fabricantes [121]).

Para la estimación de integración de quemador puede asumirse el cálculo simplificado, tomando los valores anteriores como funcionamiento nominal.

El consumo de combustible gaseoso (en kW<sub>t</sub>) será calculado como:

$$\text{Potencia nominal instalación} / (\eta_{\text{motor}} * \eta_{\text{cavidad-receptor}} * \eta_{\text{quemador}})$$

La potencia a suministrar por el quemador será: Consumo combustible (kW<sub>t</sub>) \*  $\eta_{\text{quemador}}$

Este valor fija la densidad de potencia necesaria si se considera junto con el área de intercambio disponible. Como en el caso de la integración con el receptor híbrido el valor de superficie está limitado, debe asumirse un valor típico de densidad de potencia, con el fin de calcular la superficie necesaria y utilizar este dato para diseñar la integración correspondiente. El valor de densidad de potencia viene asimismo determinado por el funcionamiento del quemador, con el fin de garantizar las temperaturas y estabilidad de llama adecuadas al mismo.

Hay que tener además en cuenta que la relación de áreas entre la superficie receptora y la de emisión ha de ser de al menos 3:1 [113][121], para asegurar que el total de la radiación emitida es recibida.

Por lo tanto, la densidad de potencia necesaria se calculará de la forma siguiente:

$$\text{Densidad potencia (kW/dm}^2\text{)} = \text{Potencia quemador} / (\text{Área recepción}/3)$$

La geometría y adaptación del quemador al elemento receptor debe garantizar que la densidad de potencia obtenida en el cálculo anterior está dentro de los rangos normales de funcionamiento para quemadores radiantes.

Las adaptaciones del quemador serán realizadas con el fin de maximizar el área de emisión, para que el valor de densidad de potencia sea factible [101] para el modo solo combustión. Evidentemente, cuando se utiliza el sistema de combustión conjuntamente con la radiación solar, se deberá realizar la regulación correspondiente con el fin de suministrar exclusivamente la potencia complementaria necesaria.

Los valores de diseño a tener en cuenta para un receptor híbrido en un motor V161 del sistema de disco Stirling de SBP, son:

- Potencia eléctrica de salida: 10 kW<sub>e</sub>
- Potencia del quemador: 71,4 kW
- Rendimiento del quemador: 50%
- Potencia térmica en el receptor: 35,7 kW
- Densidad de potencia máxima: 25 kW/dm<sup>2</sup>
- Densidad de potencia de la instalación: 15 kW/dm<sup>2</sup>
- Área del quemador de 2,38 dm<sup>2</sup>
- Área de recepción necesaria: 7,14 dm<sup>2</sup>

### 5.3 Precalentador de aire

Los datos de entrada fundamentales para el diseño del precalentador de aire son las condiciones de operación, que determinan su función, así como el aspecto de la integración que ya se ha presentado para el resto de componentes.

En cuanto a su función, el uso de un precalentador de aire para aumentar la temperatura de la mezcla aire combustible que pasa al quemador es una forma de optimizar la combustión. Una mayor temperatura de la mezcla implica una combustión más eficiente. Si el precalentamiento se realiza con el calor residual evacuado por los gases de escape (con un valor en torno al 50% de la energía introducida al quemador), resulta en una mejora de la eficiencia global del sistema. Como estimación de la mejora potencial que podría esperarse, hay ciertos estudios teóricos [105] que muestran que un rendimiento alrededor del 60%, que produciría una temperatura de los gases de escape de unos 800°C, podría ser incrementado hasta el valor de 70% o 75% con una capacidad de recuperación de entre el 20% y el 30%. Por supuesto, el valor exacto de incremento del rendimiento del quemador, dependerá del caso específico y del quemador utilizado. En todo caso, el uso de precalentadores de aire en otras aplicaciones de motor Stirling, tales como propulsión de máquinas y vehículos, es una práctica habitual. El esquema siguiente (Figura 80) muestra el ciclo termodinámico a considerar para el diseño del recuperador.

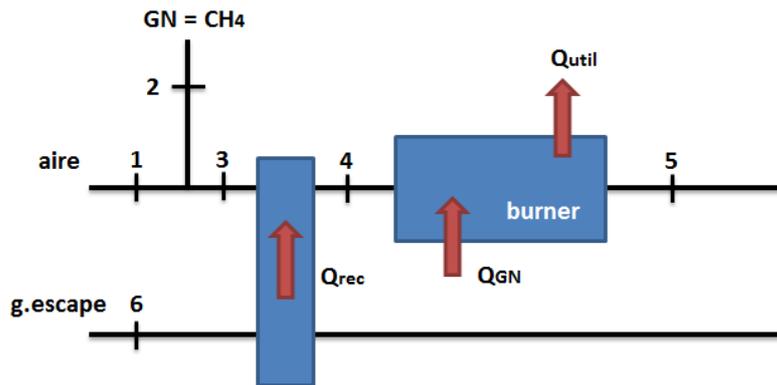


Figura 80 Esquema del ciclo termodinámico del proceso de combustión con recuperación de calor.

El dimensionado del recuperador deberá hacerse conociendo las siguientes variables de funcionamiento, que constituyen los datos de entrada:

- Caudal de la mezcla aire/combustible y caudal de gases de escape.
- Temperatura de la corriente de gases.
- Calor suministrado por el quemador y calor recuperado.
- Característica del intercambiador necesario (UA).

- Rendimiento total alcanzado.

En cuanto al diseño del intercambiador, deberá considerarse el valor de UA necesario. Esto determinará la tecnología a utilizar y el dimensionado del mismo.

El rendimiento del recuperador ha de determinarse teniendo en cuenta la limitación en la temperatura de aire de entrada al quemador. El hecho de que la mezcla aire combustible no deba sobrepasar la temperatura propia de auto-ignición en función de las condiciones de operación, hace que no puedan alcanzarse los valores máximos de rendimiento global del sistema. De hecho, como valor general, puede tomarse una temperatura máxima de 450°C para la temperatura del aire después de ser calentado en el recuperador desde temperatura ambiente. Teniendo en cuenta que la temperatura de entrada del gas de escape estará en torno a los citados 800°C, el rendimiento requerido del recuperador puede ser calculado. En el presente trabajo se han seleccionado los valores citados para el dimensionamiento a modo de ejemplo del intercambiador. En general, los valores estarán en un rango de 700 a 900°C para el gas de escape a la salida del quemador, y de 400 a 600°C para el aire precalentado en el recuperador. En particular, en el caso de Sandia, previamente presentado en este capítulo (Figura 67), el valor de gas de escape está en torno a 700°C y el precalentamiento en torno a 500°C.

El dimensionamiento del intercambiador debe tener en cuenta también la integración en el motor, para lo que se requerirá una alta compacidad debido al espacio limitado en la instalación. A este respecto, se selecciona la tecnología de intercambiador de calor de placas y aletas (Figura 81). La resistencia térmica asociada a los flujos de fluidos en estado gaseoso es elevada, por lo que aumentar el área de transferencia mediante aletas será uno de los puntos clave en cuanto a la compacidad de la solución. Si además, estas aletas pueden proveer turbulencia el intercambio térmico será también incrementado. En este último caso, debe tenerse en cuenta el balance con la pérdida de carga asociado a este incremento, ya que un valor excesivo afectaría también la permeabilidad del circuito de entrada del aire al quemador, lo que podría menoscabar la potencia del mismo. La limitación en pérdida de carga determinará el tipo de perturbador a utilizar, ya que en función de su geometría se favorecerá más o menos la turbulencia. Los tipos básicos de aletas serían el tipo ondulado o tipo “offset” (Figura 82). El tipo “offset” provee una mayor turbulencia y por lo tanto una mejora en la transferencia térmica, pero a su vez, un incremento en la pérdida de carga. A su vez, este tipo de perturbador es muy sensible al ensuciamiento, por lo que tendría limitaciones para su uso en el lado de circulación de los gases de escape, en función de las características de los mismos [122].

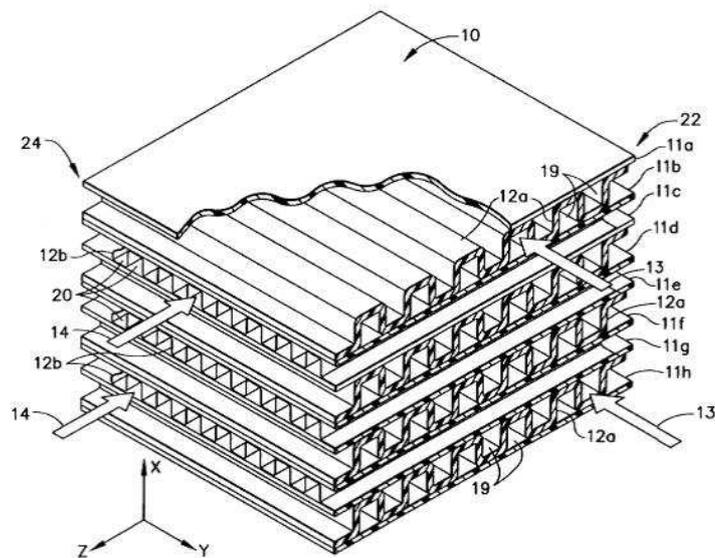


Figura 81 Imágenes de una configuración habitual del núcleo de un intercambiador compacto de placas planas gas/gas [122].

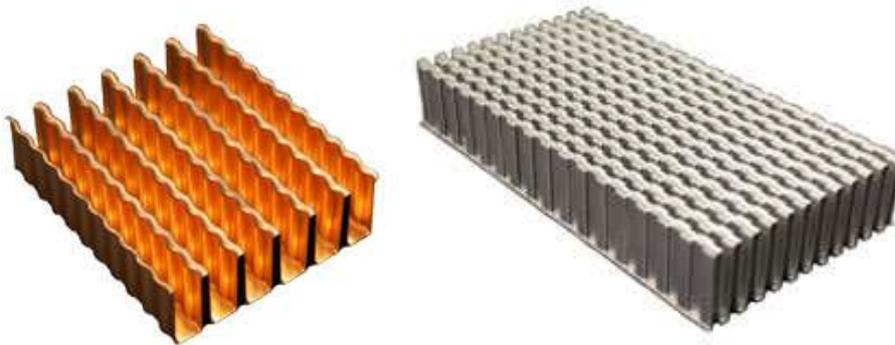


Figura 82 Drcha. Perturbador tipo ruffled & herringbone. Izqda. Perturbador tipo offset [123].

En cuanto a la integración del recuperador en el sistema, podría realizarse por módulos repartidos anularmente de acuerdo a la disposición del quemador y las entradas y salidas definidas de aire y gas de escape. Estos módulos estarían formados por placas planas integradas en un entorno rectangular, de forma que se garantice la factibilidad y viabilidad económica de la solución propuesta. Deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos [101]:

- Un menor número de módulos de intercambio simplifica el entramado de tuberías y redes de distribución necesarias.
- Un menor volumen total interfiere en menor medida en la captación de energía solar al proyectar un efecto de sombra menor.

- Una menor pérdida de carga en el núcleo de intercambio repercute en una menor necesidad de potencia de impulsión para el ventilador.

Por lo tanto, la alternativa de mayor interés podría ser la de utilizar un solo módulo de precalentamiento. Desde luego, será la opción más sencilla desde el punto de vista constructivo y de coste, pero el diseño final variará en función del sistema de disco Stirling donde debe integrarse esta solución.

El diseño debe estar basado en aplicaciones conocidas, de forma que esto permita la selección de proveedores que deban realizar unas mínimas inversiones y que aprovechen además las capacidades productivas y el conocimiento del producto existentes. El material de fabricación determina la búsqueda de proveedores. En particular, para esta aplicación se propone la utilización de acero inoxidable, debido a su resistencia a altas temperaturas y a la corrosión. Una aplicación similar en el campo de automoción sería el intercambiador de recuperación de gases de escape (EGRC: Exhaust Gas Recirculation Cooler). Para esta aplicación, existen en el mercado intercambiadores de placas o tubos con aletas en el lado gas, a los que habría que incorporar aletas en el circuito complementario.

Los métodos de cálculo propuestos para este intercambiador de calor serían los presentados en la referencia [124][125]. La correlación a utilizar para el intercambio térmico sería la de Wieting, que demuestra tener una buena aproximación a los valores experimentales obtenidos para este tipo de configuración de intercambiador con fluido gaseoso.

Para el caso particular analizado, puede realizar un pre-dimensionamiento, a modo de ejemplo, que tendrá en cuenta los siguientes parámetros:

- Caudal aire y gases de escape.: determinado a partir del consumo de combustible. Para el caso del gas natural, supone un valor de  $1,8 \text{ dm}^3/\text{s}$  - $1,2 \text{ g/s}$ - (teniendo en cuenta los  $71,4 \text{ kWt}$  aportados por el combustible y la capacidad calorífica del mismo de  $38 \text{ MJ/m}^3$ ). La relación aire-combustible marca el caudal trasegado por el intercambiador de calor. Con un dosado de 20, supondría un caudal de aire de  $24 \text{ g/s}$ , por lo tanto un caudal total de  $25,2 \text{ g/s}$ .
- Temperatura ambiente:  $20^\circ\text{C}$
- Parámetro objetivo: temperatura salida del aire/combustible  $450^\circ\text{C}$ . Este valor se ha definido por seguridad para evitar auto-ignición de la mezcla aire-combustible antes de la ignición provocada en el quemador. En este intercambiador podría calentarse también el aire por separado, pero se ha considerado la mezcla aire/combustible debido a que, en caso contrario, afecta a la estabilidad de llama (información suministrada por un fabricante de quemadores –Bekaert-).

Para la realización del cálculo se ha seleccionado una aplicación ya existente desarrollada en el programa informático EES [101]. Con las premisas presentadas anteriormente, el cálculo resulta en un intercambiador de dimensiones  $57*50*200 \text{ mm}$ , para garantizar una temperatura de salida

de la mezcla aire-combustible de 450°C. Esto supone una eficiencia del intercambiador del 38% (potencia recuperada de los gases de escape: 9,91 kW).

A modo de síntesis, se presentan las características principales de los componentes asociados a la hibridación del sistema de disco Stirling elegido como referencia (Tabla 21).

Tabla 21 Síntesis de parámetros de diseño para los elementos del sistema híbrido

<i>Componente</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<b>Receptor</b>	Temperatura máxima material	800°C
	Área de recepción para energía combustión	7,14 dm <sup>2</sup>
	Potencia térmica receptor	35,7 kW
<b>Quemador</b>	Área del quemador	2,38 dm <sup>2</sup>
	Potencia del quemador	71,4 kW
	Densidad de potencia	15 kW/dm <sup>2</sup>
	Rendimiento del quemador	50%
<b>Pre-calentador aire</b>	Temperatura salida aire/combustible	450°C
	Caudal aire	24 g/s
	Temperatura entrada combustión	700°C
	Potencia intercambiada	9,91 kW
	Rendimiento	38%



# 6

## IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

*La creciente conciencia medioambiental junto con las cada vez más estrictas regulaciones establecidas para reducir el impacto ambiental determina la necesidad de definir herramientas que permitan el cálculo de las cargas medioambientales asociadas al diseño de productos y procesos [126].*

La aplicación de estas herramientas a los sistemas de suministro energético es fundamental para determinar qué tecnologías deben privilegiarse respecto a otras. Por supuesto, si consideramos el conjunto de energías renovables frente a las fuentes de energía convencionales, la evaluación de las primeras será favorable respecto al consumo de combustibles fósiles [127]. La aplicación de la herramienta será pues de especial interés para discriminar entre las distintas energías renovables. Entre las tecnologías utilizadas para el aprovechamiento de las fuentes de energía renovables, tales como el sol, el viento y la biomasa, existen algunas de ellas en fase madura pero la mayoría de ellas están en fase de desarrollo y demostración, debido fundamentalmente a la relativa reciente implantación respecto a las tecnologías de aprovechamiento de combustibles fósiles. El uso de una herramienta de evaluación de impacto medioambiental puede servir para apoyar la inversión en determinadas tecnologías, de forma que se favorezca su desarrollo gracias fundamentalmente a medidas de apoyo gubernamentales. Si las políticas regionales, estatales y mundiales tienen como objetivo la sostenibilidad medioambiental y la disminución de la dependencia de combustibles como el petróleo con altas implicaciones estratégicas entre países, las decisiones de inversión económica pueden regirse por índices de impacto medioambiental. Estas inversiones económicas supondrán un coste elevado, el asociado a labores de investigación y desarrollo, pero tendrán su recuperación en forma de disminución de contaminación y consumo de combustibles fósiles.

En este sentido, en la presente tesis se ha seleccionado una herramienta de evaluación de impacto medioambiental, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). El objetivo de su aplicación es establecer la comparativa del sistema de disco Stirling con otro sistema de aprovechamiento solar, la fotovoltaica, así como analizar el interés de la hibridación aplicada al sistema de disco Stirling mediante la utilización de combustibles.

En cuanto a la comparativa con un sistema fotovoltaico, se ha seleccionado éste porque se ha considerado que es el sistema de aprovechamiento solar que podría tener condiciones de implantación similares a una unidad de disco Stirling aislada. Es decir, no se ha considerado la utilización para grandes centrales de generación eléctrica, sino que la utilización principal se ha tomado para sistemas de generación distribuida. Es en este tipo de utilización donde las tecnologías de aprovechamiento solar podrían tener un mayor potencial, indicado también para su utilización en zonas aisladas en países en fase de desarrollo. Es precisamente en estos países donde normalmente el recurso solar es más abundante. Por lo tanto, los problemas de aprovisionamiento de combustibles podrían solucionarse con la utilización de tecnologías de aprovechamiento solar. Por supuesto, será interesante incentivar aquellas con un menor impacto medioambiental.

En cuanto a la aplicación de hibridación, ésta supone un aumento en el tiempo de utilización de la instalación al eliminar la dependencia exclusiva del recurso solar, pero supone también la implementación de equipos adicionales al sistema propio de disco Stirling, además de un consumo asociado a los combustibles utilizados. Es por tanto interesante determinar el impacto ambiental de esta hibridación. Asimismo debe determinarse cuál es el combustible más interesante a utilizar en el sistema hibridado. En particular, para la instalación asociada utilizada para generación distribuida, puede ser de especial interés la utilización de biomasa o combustibles extraídos de la misma, como el biogás. La localización asociada a sistemas de generación distribuida en zonas aisladas, de origen rural en su mayoría, puede facilitar el acceso a determinados aprovisionamientos de biomasa.

En el presente capítulo se presenta una introducción al ACV, donde se analiza también el programa informático utilizado, así como la selección de métodos de evaluación de impacto. Se describe la aplicación de esta herramienta al sistema seleccionado, incluyendo la descripción del

sistema de disco Stirling mismo, así como el fotovoltaico de referencia y el sistema hibrido. Posteriormente se presentan los resultados obtenidos, que permiten realizar las comparativas de evaluación que se han introducido previamente. Además del criterio propiamente medioambiental, evaluado mediante los resultados de aplicación de la herramienta del ACV, existen otros criterios que merece la pena evaluar, tales como la energía necesaria para la construcción de una instalación y el “pay-back” energético. Finalmente se realiza la interpretación de resultados.

## 6.1 Análisis de ciclo de vida

### 6.1.1 Definición y fases de ACV

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) consiste en la investigación y evaluación de los impactos medioambientales que un determinado producto o servicio causa o necesita para su existencia. La terminología inglesa se refiere a: “Life Cycle Assessment” o “Life Cycle Analysis” (LCA), “ecobalance” y “cradle-to-grave analysis” (análisis de la cuna a la tumba). El ACV es una herramienta que provee una perspectiva comprensible de las cargas medioambientales. Tiene además el potencial de cumplir con la necesidad de una herramienta adecuada para el diseño de sistemas de suministro energético [126].

El objetivo del ACV es cuantificar las cargas medioambientales, estableciendo el espectro completo de daños medioambientales y sociales asignables a productos y servicios. Si se analiza en base comparativa para distintos sistemas se puede utilizar con el fin de seleccionar el menos gravoso. El ACV es un proceso objetivo que evalúa las cargas medioambientales asociadas con un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando el uso de materiales y energía junto con las emisiones al medio ambiente. El ACV contempla el proceso completo de fabricación y utilización del producto o servicio, cubriendo tanto los materiales utilizados como los procesos tecnológicos requeridos para ello. Así, incluye los impactos resultantes de la extracción de materias primas, proceso de fabricación, transporte o distribución del producto al consumidor, el uso mismo del producto y su deshecho o recuperación después de su vida útil.

El ACV se puede utilizar para conseguir los siguientes objetivos [128][129]:

- Dar una perspectiva lo más completa posible de las interacciones de una actividad con el medioambiente.
- Identificar los impactos medioambientales más importantes y las etapas o ‘puntos calientes’ del ciclo de vida que contribuyen a esos impactos.
- Comparar impactos medioambientales de productos, procesos o actividades alternativas.
- Contribuir al entendimiento general y naturaleza interdependiente de las consecuencias ambientales de las actividades humanas.
- Tomar decisiones de mercado con información de los efectos ambientales de esas actividades e identificar oportunidades para las mejoras ambientales.

El procedimiento para llevar a cabo el ACV es parte de las normas de gestión medioambiental ISO 14000 [130]:

- ISO 14040. Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Marco de referencia.
- ISO 14041. Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida. Definición de la finalidad y el campo y análisis de inventarios.
- ISO 14042. Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida. Evaluación del impacto del ciclo de vida.
- ISO 14043. Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida. Interpretación del ciclo de vida.

De acuerdo con estas normas, el ACV se realiza de acuerdo a cuatro fases bien diferenciadas:

- Objetivo y alcance del análisis, incluyendo la definición de la unidad funcional y los límites del sistema a los que se refiere dicho análisis. Debe incluir también la descripción del método aplicado para la evaluación de los impactos, así como la selección de categorías de impacto que son analizadas.
- Inventario con la recogida de datos y la modelización de sistemas. Abarca todos los datos medioambientales y técnicos para todos los procesos y materiales contemplados dentro de los límites del sistema de la unidad funcional definida. Se definen entradas, tales como materiales y energía, y salidas, tales como emisiones a la atmósfera, al aire o residuos sólidos. El resultado de esta fase es un inventario detallado de entradas y salidas como flujos elementales, de los que se puede extraer un primer análisis. En los programas informáticos específicos para la realización de ACV se incluyen bases de datos con gran cantidad de información de forma que se pueden seleccionar aquellas que mejor se ajusten al producto o servicio a analizar.
- Análisis de impacto del ciclo de vida, que evalúa la contribución de este ciclo de vida a las categorías de impacto definidas (tales como calentamiento global, acidificación,..). El primer paso de este análisis es la caracterización, donde se calculan los impactos potenciales. El segundo paso es la normalización, que proporciona la base para comparar entre sí diferentes tipos de categorías de impacto, de forma que adquieren las mismas unidades. El tercer y último paso es la ponderación, donde se asigna un factor de ponderación a cada una de las categorías de impacto en función de su importancia relativa. Este último paso no se realiza en todos los métodos de evaluación y además no está permitido por la norma ISO 14042 para comparaciones entre productos. Sin embargo, al ser una herramienta a disposición del usuario en los programas informáticos de ACV queda como una opción de análisis.
- Interpretación de los resultados. Se analizan las contribuciones más importantes, así como las incertidumbres y sensibilidad de los resultados, dando lugar a las conclusiones del ACV.

## 6.1.2 Programa informático SimaPro

Existen herramientas informáticas para la realización del ACV, que incluyen detalladas bases de datos para la realización del inventario, así como una serie de métodos de evaluación de impacto, de forma que la realización del análisis se simplifica y estandariza. En la actualidad hay disponibles en el mercado más de 40 de estas herramientas [131]. Entre las más utilizadas se encuentra el programa SimaPro, que es el utilizado en la presente tesis. La elección de este programa por parte del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza se ha basado fundamentalmente en la diversidad de bases de datos de inventario disponibles, así como en la facilidad y versatilidad de uso del paquete informático, que permite una rápida comprensión del proceso, presentando una estructuración clara y precisa.

Se ha utilizado la última versión disponible del programa seleccionado (en el momento de realización), SimaPro 7.3, para el ACV [132]. Este programa permite realizar la evaluación medioambiental de una forma sistemática y consistente, de acuerdo a la normativa. Existen varias versiones del mismo, ya que es un programa que está siendo actualizado constantemente. Como se ha mencionado anteriormente, una característica destacable del mismo es que está provisto de un número considerable de bases de datos para la realización del inventario, así como de métodos de evaluación de impacto.

La estructura de este programa se realiza en base a la normativa ISO 14040 para el ACV:

1. Definir el objeto y alcance del estudio. Basado en la ISO 14040. Principios generales.
2. Hacer un inventario de todas las emisiones y parámetros de consumo de recursos. Basado en la ISO 14041. Inventario, Objeto y Alcance.
3. Aplicar un método de evaluación de impacto a esos resultados. Basado en la ISO 14042:2006. Evaluación de Impacto.
4. Interpretar los resultados. Basado en la ISO 14043. Interpretación.

La evaluación medioambiental que se realiza en esta tesis se va a considerar de forma comparativa. El fin es determinar el potencial de la tecnología de disco Stirling, hibridada o no, en relación con la energía fotovoltaica. Así, los resultados se tendrán en cuenta fundamentalmente en base comparativa. Es por tanto recomendable utilizar la misma base de datos para la realización del inventario, ya que el uso simultáneo de diferentes bases de datos podría distorsionar esta comparación. Las consideraciones realizadas para la modelización de los sistemas han de tener los mismos criterios, lo que puede no cumplirse estrictamente para bases de datos provenientes de diferentes proveedores. Es también importante utilizar la misma versión, ya que los datos medioambientales están en continuo cambio. Estos cambios pueden deberse a consideraciones sobre datos de emisiones, materiales, efectos, impactos o variaciones tecnológicas.

Así, la base seleccionada para esta tesis es la Ecoinvent 2.2 [133], compilada en mayo de 2010. El origen de esta base viene del año 2000, siendo desarrollado por varios institutos suizos: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Swiss Federal Office y la EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research). Se combinan diferentes bases de datos de inventario, tales como la BUWAL 2050 y la ETH, de forma que su objetivo es proveer un

conjunto de datos de inventario unificados y de alta calidad. Los datos de referencia se basan fundamentalmente en situaciones de Suiza y países de Europa Occidental, por lo que la situación en España puede considerarse como similar. Esta base contiene 4100 conjuntos de datos para productos y servicios de diferentes sectores: energía, transporte, materiales de construcción, productos químicos, industrial del papel, tratamiento de residuos y sector agrícola. Contiene además procesos relacionados con las energías renovables, tales como energía fotovoltaica, eólica y cogeneración. Esto es un punto importante a considerar para su selección, ya que para la realización de la modelización del sistema fotovoltaico se ha tomado un sistema definido en la propia base de datos, lo que dota de mayor rigor al análisis. El modelo del sistema de disco Stirling se ha construido a partir de diferentes elementos de la base de datos, al no estar constituida como una tecnología en la base de datos.

### 6.1.3 Selección de los métodos de evaluación de impacto

La selección de los métodos de evaluación de impacto es un factor importante dentro de la realización del ACV, ya que los resultados del mismo van a estar expresados en función de unos indicadores propios del método de evaluación de impacto utilizado. Las diferencias entre los métodos se basan en el alcance de los aspectos medioambientales considerados y las relaciones matemáticas que cuantifican la relación causa-efecto desde las emisiones al impacto en el medioambiente (descripción del mecanismo medioambiental). Entre los que se encuentran disponibles en el programa, se han seleccionado dos: Eco-indicador 99 [134] y CML 2 [126]. Los otros métodos de evaluación disponibles son: Eco-indicador 95, CML 1992, Ecopoints 97, EDIP/UMIP 96 y EPS 2000. De entre los no seleccionados, los dos primeros no se han utilizado por tratarse de la versión anterior de los métodos seleccionados. El método Ecopoints 97 no se ha seleccionado por estar basado más en objetivos políticos que científicos, aunque su utilización puede ser interesante para contrastar precisamente ese cambio de punto de vista. El EDIP/UMIP y el EPS 2000 están más orientados al diseño de productos desde un punto de vista industrial [131]. Así, en el presente trabajo se ha profundizado en la comprensión de los dos métodos de evaluación seleccionados (anexo I). La principal diferencia entre ambos se encuentra en la selección de los indicadores de categorías que son calculados a partir del inventario. En el caso del Eco-indicador 99 se utilizan categorías de impacto, que son finalmente agrupadas en tres categorías de daño, constituyendo un método de punto final (“end-point level”, según la terminología utilizada en la ISO 14042. El método CML 2 utiliza sólo categorías de impacto, por lo que se considera un método de punto intermedio (“mid-point level”). En el anexo 1 se explica en profundidad estos métodos, presentándose en el presente documento los aspectos fundamentales:

#### ***Eco-indicador 99***

Método de evaluación de impacto de punto final, cuyas categorías de impacto (evaluación de punto medio) y categorías de daño (evaluación de punto final), son las siguientes:

Categorías de impacto (11):

- Cancerígenos (DALY)
- Orgánicos respirados (DALY)

- Inorgánicos respirados (DALY)
- Cambio climático (DALY)
- Radiación (DALY)
- Capa de ozono (DALY)
- Eco-toxicidad (PAF-m<sup>2</sup>yr)
- Acidificación / eutrofización (PDF-m<sup>2</sup>yr)
- Uso de la tierra (PDF-m<sup>2</sup>yr)
- Minerales (MJ surplus)
- Combustibles fósiles (MJ surplus)

Las unidades de las categorías de impacto están referidas a la categoría de daño en la que se engloban. Se presenta una explicación detallada de estas unidades en el anexo I, aunque aquí se describirán brevemente. Así, las relacionadas con la salud humana, se expresan en DALY, que mide la diferencia en salud debida a muertes prematuras y a la pérdida de calidad de vida en general. Un DALY es igual a un año de vida saludable perdida [126]. En cuanto a calidad del ecosistema, la ecotoxicidad se expresan en PAF-m<sup>2</sup>yr, que mide la fracción de especies afectadas cuantificando el efecto tóxico en organismos que viven en agua y tierra, y el resto de categorías de impacto asociadas se expresan en PDF-m<sup>2</sup>yr, que mide el porcentaje de especies desaparecidas debido a la carga medioambiental [126]. Se utiliza un factor de conversión para sumar estas categorías de impacto en la categoría de daño correspondiente, dividiendo los resultados de PAF por 10. Para las categorías de recursos, se utiliza MJ surplus, que considera los efectos causados por la extracción de minerales y combustibles fósiles, evaluando la energía adicional necesaria para extracción de minerales y combustibles fósiles de menor grado [126].

Categorías de daño (3):

- Salud humana (DALY)
- Calidad del ecosistema (PDF-m<sup>2</sup>yr)
- Recursos (MJ surplus)

## ***CML 2***

Método de evaluación de impacto de punto medio, cuyas categorías de impacto (10) son las siguientes:

- Agotamiento de los recursos abióticos (kg Sb eq)
- Cambio climático (kg CO<sub>2</sub> eq)
- Disminución del ozono estratosférico (kg CFC-11 eq)
- Toxicidad humana (kg 1,4-DB eq)
- Eco-toxicidad acuática del agua dulce (kg 1,4-DB eq)

- Eco-toxicidad acuática marina (kg 1,4-DB eq)
- Eco-toxicidad terrestre (kg 1,4-DB eq)
- Formación foto-oxidantes (kg C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> eq)
- Acidificación (kg SO<sub>2</sub> eq)
- Eutrofización (kg PO<sub>4</sub> eq)

Los resultados del ACV se expresan para cada método en función de los indicadores (con unidades) asociados a las categorías de impacto. Este se conoce como la caracterización, que unido a la agrupación de las categorías de impacto con sus unidades correspondientes permite la evaluación de daños. En ocasiones, este paso puede ser suficiente para comparaciones, cuando, por ejemplo, todas las categorías consideradas muestran un valor superior para un producto con respecto al comparado. Sin embargo, en muchas ocasiones interesa realizar la normalización con el fin de adimensionalizar las categorías y poder establecer comparativas entre ellas, así como relativizar su importancia. Así, en los dos métodos considerados, puede realizarse el paso de la normalización, con el fin de tener un valor relativo a un referencial dado (comunidad, persona u otros, en un tiempo determinado), de forma que permite evaluar la magnitud e importancia de los diferentes efectos asociados a las categorías de forma conjunta. En el caso del Eco-indicador 99 se realiza la normalización en base a las categorías de impacto y de daño (unidad conocida como punto Eco-indicador), mientras que en el CML 2 es solo a nivel de las categorías de impacto. En ambos casos, esto permite comparar las diferentes categorías entre sí con el fin de analizar en qué aspectos tiene mayor influencia el sistema de estudio en cuestión. Este paso permite asimismo la comparativa entre los diferentes sistemas, que en el caso de el presente trabajo, se refieren al sistema de disco Stirling y al sistema de generación fotovoltaico.

El cálculo de normalización se realiza en dos pasos:

1. Recopilación de datos de emisiones totales y consumo de recursos causados por el sistema de referencia durante un periodo determinado (normalmente un año).
2. Cálculo de las categorías de impacto y, si procede, de los indicadores de daño, mediante la utilización de los factores de caracterización y daño.

Los sistemas de referencia varían en función del método seleccionado:

- Para el Eco-indicador 99, el sistema de referencia es el daño causado por 1 ciudadano europeo medio al año, basado en datos principalmente del año 1993, con actualizaciones realizadas para las emisiones más importantes. Además, en este método, los resultados de la normalización dependen de la perspectiva seleccionada. En SimaPro el método va asociado a tres perspectivas distintas: jerárquica, igualitaria e individualista. La fase de normalización incluye estas perspectivas, ya que influyen en los procedimientos de cálculo asociados a las categorías de daño. En el presente trabajo, se ha seleccionado la perspectiva jerárquica, por tratarse de la que se considera más cercana a la comunidad científica. De hecho, se trata de una perspectiva temporal equilibrada, sobre la que existe consenso científico referente a los impactos considerados.

- En el caso del CML 2, la normalización se refiere exclusivamente al sistema de referencia, estableciéndose 4 diferentes (mundial en 1990 y 1995, Holanda en 1997 y Europa Occidental en 1995), no habiendo diferencias en función de las perspectivas sociales. Esto significa que los métodos utilizados para el cálculo de los indicadores de las categorías de impacto no están determinados por estas perspectivas. Para este trabajo, se ha seleccionado la opción de Europa Occidental de 1995, por considerarse más adecuada geográficamente y relativamente cercana en el periodo. Así, el sistema de referencia es el daño causado por Europa Occidental en el año 1995.

La normalización se utiliza también para las comparativas en los análisis de sensibilidad, donde se analiza cómo diferentes factores influyen en los resultados obtenidos en el ACV.

El siguiente paso a la normalización es la ponderación, donde se relativiza la importancia de las categorías en función de las perspectivas sociales. En la normalización, la perspectiva influye en el procedimiento de cálculo, mientras que en la ponderación la perspectiva influye a través de la evaluación de las categorías a la que se llega por la valoración de un panel de expertos. Este paso se permite en el método Eco-indicador 99, pero no en el CML 2. En el caso del Eco-indicador 99 se realiza sobre las categorías de daño normalizadas, aplicando a éstas los factores correspondientes a la perspectiva seleccionada. En el presente trabajo, se realiza esta ponderación con el fin de poder comparar las instalaciones en base a un indicador único. Aunque no esté recomendado por la norma, es un paso dentro del método considerado que, aún introduciendo un factor subjetivo, debido a la perspectiva social asumida, se considera válido en base comparativa.

Las tablas correspondientes a los factores de normalización y ponderación en función de las perspectivas, utilizados para el método Eco-indicador 99, se presentan en el anexo 1.

Los pasos descritos tras la caracterización, es decir, normalización y ponderación, son, de acuerdo a la norma ISO 14042 opcionales.

## 6.2 Aplicación al caso de estudio de ACV

El desarrollo del análisis del ciclo de vida se basa en cuatro pasos fundamentales, tal como se ha explicado previamente: definición de los objetivos y alcance, inventario, evaluación del impacto e interpretación de resultados. En este apartado se tratan la definición de objetivo y alcance, así como la realización del inventario o modelización de los sistemas implicados. Asociados al inventario, pueden extraerse resultados, que se presentarán en el siguiente capítulo.

### 6.2.1 Objetivos y alcance del ACV

El principal objetivo de la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida en esta tesis consiste en obtener una estimación o aproximación de la información ambiental del ciclo de vida de la tecnología de disco Stirling para generación energética, en dos contextos diferentes:

- Comparativa con otra tecnología de generación solar que por sus condiciones de implantación puede ser competencia con el sistema de disco Stirling: la fotovoltaica.
- Comparativa de dos alternativas de hibridación del sistema. Aunque el interés de la hibridación se basa fundamentalmente en aspectos operativos, la utilización de dos combustibles alternativos es evaluada también desde el punto de vista medioambiental.

En cuanto al alcance, la función del sistema considerada es la generación de energía eléctrica para generación distribuida. En la presente tesis no se ha considerado la aplicación de esta tecnología a medias o grandes instalaciones de disco Stirling con conexión a red eléctrica. Así, la unidad funcional seleccionada es un disco Stirling de potencia nominal 10 kW (correspondiente a la tecnología de SBP [25]).

Para la comparativa se ha seleccionado un sistema fotovoltaico correspondiente a la tecnología de silicio monocristalino. El criterio para esta selección se ha basado en que la tecnología de silicio es la más utilizada actualmente, y dentro de esta tecnología de silicio la de monocristalino presenta una buena eficiencia con un balance de coste razonable, que además se encuentra en continua reducción. Además, la selección del sistema fotovoltaico se ha visto determinada por las bases de datos disponibles en la versión utilizada del programa SimaPro. Así, se ha caracterizado una instalación de 10 kW de tecnología de silicio monocristalino.

En cuanto a la modelización del sistema de disco Stirling hibridado, se han incluido a la descripción del sistema los componentes necesarios para la realización de dicha hibridación, así como el consumo asociado de los combustibles, utilizando la información de los capítulos 4 y 5 de la presente tesis.

Para la comparación entre el sistema de disco Stirling y el sistema fotovoltaico, los límites del sistema se han establecido en la fabricación de las instalaciones, incluyendo los procesos de montaje y transporte, pero no la operación y mantenimiento. Por una parte, no se dispone de

suficiente información al respecto, y por otra, esta fase de vida en las energías renovables es, en términos generales, no significativa respecto a la fase de construcción, tal como se presenta en Varun [77]. Se ha considerado el montaje de la instalación con sus componentes, así como el tratamiento como residuo de estos componentes una vez finalizada su vida útil, considerada de 30 años para ambas instalaciones [135]. En cuanto a la comparativa establecida para los sistemas híbridos, a la fabricación de las instalaciones se ha añadido el consumo de combustible durante la operación del sistema dentro de su vida útil. No se han incluido, al igual que en la comparativa con el sistema fotovoltaico, aspectos de operación general y mantenimiento.

## 6.2.2 Modelización de los sistemas

### 6.2.2.1 Modelización del sistema de disco Stirling

Para el inventario del sistema de disco Stirling, se han definido en el programa los siguientes elementos:

- Motor
- Concentrador
- Estructura metálica
- Bancada de hormigón

Para la definición de estos elementos se ha contado en gran parte con la información recuperada en la revisión bibliográfica y con la visita a las instalaciones de Odiello, en Francia, donde se dispone de un sistema de 10 kW de SBP. Esta visita ha permitido conocer la instalación y contactar con los responsables de la misma, que han contribuido en cuanto han podido a este trabajo.

De entre los elementos anteriormente citados, el motor es el más complejo. Consta de diversos componentes. La recuperación de información al respecto ha sido difícil. De hecho, la empresa de la instalación considerada, SBP, no presenta información en el año 2013 relativo a la tecnología. Los datos se han recuperado de los disponibles de anteriores proyectos (Eurodish y Envirodish).

De la información recuperada, se han definido los siguientes componentes del motor:

- Absorbedor: 12 kg de aleación de níquel, con procesos de trabajo en frío, fundición, soldadura eléctrica lineal y proceso de soldadura en horno. Este último proceso ha sido definido como nuevo en la sección de procesos del programa por no encontrarse disponible.
- Cilindro / pistón de expansión: 200 kg de acero, con procesos de producción de trabajo en frío, forja y mecanizado.

- Elementos de conexión del motor: 100 kg de acero, proceso de producción: trabajo en frío.
- Generador eléctrico: 50 kg de acero y 50 kg de cobre, con procesos de producción de trabajo en frío y fundición.
- Regenerador: 30 kg de acero, proceso de producción: trabajo en frío.
- Cavidad cerámica: 15 kg de material cerámico.

El resto de elementos se han definido de la siguiente manera:

- Concentrador: 113,4 kg de fibra de vidrio.
- Estructura metálica: 3700 kg de acero, proceso de producción: trabajo en frío.
- Bancada de hormigón: 150 ton de hormigón. Debido a la importancia de este montaje, como se verá posteriormente, se ha modificado el valor inicialmente tomado de 240 ton, que es el suministrado por los responsables de Odiello correspondiente a su instalación. Gracias al contacto con los mismos, se ha podido tomar un valor menor que correspondería a lo realmente necesario (la instalación de Odiello, de fase experimental, está sobredimensionada).

Como se ha referido anteriormente, todos los materiales han sido seleccionados de la base de datos Ecoinvent [133]. Los materiales seleccionados están ya definidos en esta base de datos, a excepción de la aleación de níquel, para la que se ha establecido su composición y correspondiente combinación de materiales. En cuanto a los procesos, se han considerado los procesos correspondientes a la transformación de los materiales para la fabricación de los componentes. En relación a los procesos de conformado, se han seleccionado los siguientes procesos:

- Trabajo en frío (estampación y procesos de estirado) –*metal working factory operation, deep drawing, cold impact extrusion*-, forja –*hot impact extrusion*-, fundición –*casting*- y mecanizado –*metal working machine operation*-.

Se han considerado también los procesos de unión entre componentes. Al tratarse de elementos metálicos, se han incluido procesos de soldadura principalmente. Estos procesos se han considerado en aquellos componentes en los que la diversidad de piezas justifica que el peso de estos procesos sea un factor importante. Los procesos de soldadura considerados han sido:

- Soldadura eléctrica - *welding arc steel*- y soldadura en horno.

Como se ha indicado previamente, la definición de la soldadura en horno no está implementada en la base de datos Ecoinvent. Para incluirla ha sido necesario definir sub-procesos, tales como el consumo eléctrico asociado.

No se han considerado procesos de montaje y ensamblado.

Además de los procesos de producción mencionados asociados a cada material, se ha tenido en cuenta el transporte de los mismos. Se ha verificado que en los materiales utilizados que proceden de la base de datos sí está incluida una fase de transporte. De esta forma, en la descripción del disco Stirling se asume que el transporte está asociado a los materiales, pero no al conjunto. Con el fin de verificar que este transporte no supone un aporte significativo al impacto se ha realizado un análisis que lo confirma.

Para la definición completa del ciclo de vida del sistema de disco Stirling se ha tomado además un escenario de residuo, donde se ha especificado que se reciclan los materiales metálicos, el vidrio, la cerámica y los diferentes tipos de plásticos. El resto de materiales, no comprendidos en estas clasificaciones, no se reciclaría debido a que el programa no cuenta con tratamientos específicos para ellos, por lo que quedan sin especificar. En todo caso, el escenario de residuos definido cubre la mayoría de los materiales utilizados.

### 6.2.2.2 Modelización del sistema fotovoltaico

Para el sistema fotovoltaico, se ha tomado la infraestructura, ya definida en la base de datos Ecoinvent, de una instalación de 3 kW de silicio monocristalino. La selección de esta tecnología en concreto, la de silicio monocristalino se ha justificado previamente, pero en todo caso, es importante destacar que los resultados del presente estudio son respecto a esta tecnología en concreto. Los datos de emisiones de CO<sub>2</sub> pueden depender de forma significativa de esta elección [136]. Mediante la selección de un sistema ya definido en la base de datos disponible se evitan incertidumbres en la definición del proceso, dada la dificultad en la adquisición de datos que se ha tenido ya en el sistema de disco Stirling.

El inventario de este sistema incluye la construcción de las células, el panel, la instalación eléctrica, el convertidor AC/DC y la construcción del techo. El transporte y la energía necesarios en las transformaciones asociadas también están incluidos.

Para tomar la definición del sistema del programa se han tomado las siguientes consideraciones:

- Se han tomado 3,33 instalaciones, con el fin de tener los 10 kW de la unidad funcional a partir de la instalación definida de 3 kW.
- Al estar definido este sistema como transformación energética y no como material, ha sido necesario hacer una copia del sistema con el fin de extraer los materiales de la parte de transformación y pasarlos a material. De otra forma, el programa no permite el tratamiento de residuo de los materiales utilizados. Esto ha permitido utilizar el mismo escenario de residuo que el definido en el sistema de disco Stirling.

Se ha considerado el montaje en tejado, tal como está definido en la base de datos. Sobre este punto, podría añadirse una estructura metálica y hormigón para considerar las mismas condiciones de implantación que en el caso del disco Stirling, que debe ser sobre suelo. Se ha realizado un análisis de impacto del mismo, que no ha resultado significativo. En todo caso, se asume la premisa de que los paneles fotovoltaicos podrían montarse sobre tejado en la instalación para realizar la comparativa con el sistema de disco Stirling, montado en suelo sobre bancada de hormigón.

### 6.2.2.3 Modelización del sistema hibridado

La modelización del sistema hibridado añade a los componentes de la instalación del disco Stirling los siguientes elementos:

- Sistema de hibridación: constituido por el receptor híbrido, el quemador de combustible y un precalentador de aire de combustión para la optimización del proceso.
- Consumo del combustible para realizar la hibridación. Se ha considerado este consumo como suministro externo, con el fin de tener una base comparativa entre los dos combustibles considerados: gas natural y biogás. En el caso del biogás podría haber la posibilidad de incluir la modelización de un sistema de generación de biogás in-situ, lo que podría ser una alternativa interesante a la hora de considerar esta tecnología para instalaciones de generación distribuida.

La modelización de los componentes para la hibridación se ha realizado de la siguiente forma:

- Se ha asumido la utilización de un receptor híbrido de tipo directamente iluminado, de forma que no se ha considerado un aumento significativo de material o procesos especiales involucrados en su fabricación. Así, la modelización se realiza con el mismo absorbedor que en el apartado señalado anteriormente.
- Quemador de gas: 5 kg de acero, con procesos de trabajo en frío, soldadura con arco, estampación y fundición.
- Precalentador de aire: 5 kg de acero, con operaciones de trabajo en frío, soldadura con arco, estampación, fundición y soldadura en horno.
- Consumo de combustibles: se ha considerado el consumo total de combustible necesario para realizar la hibridación durante la vida útil de la instalación con los límites asociados a cada uno de ellos. Así, la información proviene del apartado 4 de la presente tesis:

- Biogás: El sistema híbrido produce una cantidad de 17389 kW.h/año (62600 MJ/año). El consumo de biogás debe tener en cuenta la eficiencia del motor y del quemador. Si se considera una eficiencia media del motor de 0,2 y de 0,5 para el quemador, el suministro de biogás debe ser 626000 MJ/año. En el caso de que se utilice un precalentador de aire, que permite aumentar la eficiencia general del quemador, el suministro de biogás necesario sería reducido a 543000 MJ/año. Considerando un valor medio de la capacidad calorífica del biogás de 23 MJ/m<sup>3</sup>, resulta un consumo de 23600 m<sup>3</sup>/año.
- Gas natural: La producción anual asociada al consumo de gas natural, con su límite correspondiente de utilización del 15%, es de 2971 kW.h/año (10700 MJ/año). Utilizando las mismas premisas que para el caso de biogás, el suministro de gas natural resulta en 107000 MJ/año. Utilizando además un precalentador de aire, y considerando una capacidad calorífica de 38 MJ/m<sup>3</sup>, el consumo de gas natural sería de 2440 m<sup>3</sup>/año.

## 6.3 Resultados

### 6.3.1 Comparativa entre sistema de disco Stirling y sistema fotovoltaico

Los resultados del Análisis de Ciclo de Vida se dividen en resultados de inventario y resultados de los métodos de evaluación de impacto. Las condiciones del cálculo, como se han referido anteriormente son la comparativa entre unidades funcionales de 10 kW de la tecnología de disco Stirling y fotovoltaica. El periodo considerado de vida útil es de 30 años. Como se ha introducido con anterioridad, se evalúa la construcción de la instalación, pero no se considera significativa la fase de operación. Para ambas instalaciones, se tiene en cuenta el reciclado de los materiales utilizados en la construcción.

#### 6.3.1.1 Inventario

El Inventario del Ciclo de Vida (ICV) o Life Cycle Inventory (LCI) da como resultado el agregado de efectos en términos de emisiones y recursos causado por todos los materiales y procesos involucrados en la definición de la instalación en cuestión. Estos efectos representan los resultados medioambientales correspondientes a diferentes categorías. En concreto, las emisiones se dividen en emisiones gaseosas, líquidas o sólidas. Por supuesto, los valores obtenidos dependen de la base de datos con la que se han definido los materiales y procesos. En el caso de estudio, la base de datos Ecoinvent ha sido la seleccionada para la definición completa de la instalación. Debido a su implicación medioambiental, se han seleccionado para el presente análisis cuatro emisiones gaseosas consideradas como las más significativas: emisiones de CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y emisiones de compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (NMVOC).

Las emisiones de CO<sub>2</sub> constituyen un factor importante debido a su contribución en el efecto invernadero o de calentamiento global. De hecho, se utiliza muy frecuentemente como base para la evaluación medioambiental. El análisis de estas emisiones servirá como base para establecer

comparaciones con estudios previos de evaluación de instalaciones de disco Stirling y fotovoltaicas, presentados en el capítulo 3 de la presente tesis. Las emisiones de CO<sub>2</sub> calculadas incluyen la emisión propia de CO<sub>2</sub> así como el CO<sub>2</sub> equivalente. De esta forma, se tiene en cuenta el efecto equivalente producido por otros gases de efecto invernadero, como el metano, el óxido nitroso, los hidrofluorocarbonos, los perfluorocarbonos y el hexafluoruro de azufre.

El resto de emisiones, aparte del CO<sub>2</sub>, se han seleccionado por su implicación en diferentes efectos medioambientales. Las emisiones de SO<sub>x</sub> son responsables de la lluvia ácida, un complejo fenómeno químico que ocurre cuando los compuestos de azufre y nitrógeno reaccionan con otras sustancias de la atmósfera. Los contaminantes producto de esta reacción son transportados por el viento y en función de la climatología estos contaminantes ácidos vuelven a la tierra en diferentes formas: húmeda (lluvia ácida, nieve o niebla) o seca (gases ácidos y polvo) [137]. El NO<sub>x</sub> es el principal componente de la niebla fotoquímica, relacionado con la degradación de la capa de ozono y que también es responsable de la lluvia ácida. Los compuestos NMVOC están formados principalmente por hidrocarburos y otros grupos químicos, tales como alcoholes, aldehídos, alcanos, aromáticos, cetonas y derivados halógenos. Estos compuestos pueden ser extremadamente peligrosos para la salud humana en función de su composición y toxicidad. Además, si se mezclan con otros contaminantes, tal como el NO<sub>x</sub>, reaccionan y forman ozono a nivel de suelo, lo que es tóxico para la salud humana y contribuye también a la niebla fotoquímica.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente han sido evaluadas mediante la aplicación de otro método de evaluación de impacto que dispone esta información de forma directa: IPCC 2007 GWP 100a. Se ha realizado también la comparación con el resultado de otro método que dispone de la misma evaluación, el IMPACT 2002+, para garantizar el valor de estas emisiones.

Los resultados de inventario comparativos entre el sistema de disco Stirling y la instalación fotovoltaica se presentan en la Tabla 22. Las emisiones gaseosas se representan en términos de kWh producidos por la instalación en cuestión. El cálculo de kWh se realiza considerando la vida útil de 30 años asumida para cada instalación.

Tabla 22 Resultados de inventario sistema Stirling y fotovoltaico.

<i>Sistema</i>	<i>Stirling</i>	<i>Fotovoltaico</i>
Dióxido de carbono (g CO <sub>2</sub> /kWh)	36.85	22.34
Dióxido de carbono equivalente (método IPCC 2007 GWP 100a) (g CO <sub>2</sub> -eq/kWh)	37.66	24.88
Óxidos de azufre (g SO <sub>x</sub> /kWh)	0.047	0.073
Óxidos de nitrógeno (g NO <sub>x</sub> /kWh)	0.050	0.048
Compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (g NMVOC/kWh)	0.012	0.025

De la tabla anterior, puede observarse que el orden de magnitud es similar para ambas instalaciones. El valor de emisiones de CO<sub>2</sub> es más favorable para la instalación fotovoltaica, aunque la diferencia no es significativa, especialmente si consideramos las incertidumbres asociadas a la descripción de los sistemas. Ligeras variaciones en la definición de los sistemas podrían dar lugar a cambios menores en la valoración que dieran balance más positivo para la instalación de disco Stirling. Por lo tanto, la conclusión principal es que la diferencia en el impacto medioambiental entre la instalación de disco Stirling y la instalación fotovoltaica no es significativa. Si comparamos estos órdenes de magnitud con el caso de otros tipos de energía (presentado en el capítulo 3 - Tabla 10-), se observa que los sistemas de combustibles fósiles estarían en el rango aproximado de 600 a 1000 g-CO<sub>2</sub>/kWh, por lo que nos encontramos claramente en un orden de magnitud significativamente inferior. En cuanto al resto de emisiones, la conclusión es similar, siendo en este caso los valores más favorables para el sistema de disco Stirling, pero también sin una diferencia clara.

Es importante evaluar si los valores obtenidos con el trabajo desarrollado corresponden con valores encontrados en la literatura conocida. En el caso del disco Stirling analizado y el sistema fotovoltaico elegido, los valores obtenidos son del mismo orden de magnitud en referencias previas, aunque con más diferencia para el caso del sistema de disco Stirling. En el caso de la instalación fotovoltaica, si se consideran valores para instalaciones de tecnología de silicio monocristalino, el valor se sitúa en 37 g-CO<sub>2</sub>-eq/kWh, con una previsible evaluación a 10 g-CO<sub>2</sub>-eq/kWh en el futuro [136]. El valor de 24,99 g-CO<sub>2</sub>-eq/kWh está en acuerdo razonable con estos valores, considerando que en este caso no se ha realizado la estimación para una central sino para una instalación aislada de 10 kW.

En el caso de la instalación de disco Stirling, solo se conoce un estudio [135] que analiza el impacto medioambiental de una instalación de potencia de 1 MW compuesta por 17 discos Stirling que alimentan a 5 motores Stirling operados con vapor. Esta definición es, pues, significativamente diferente de la instalación de generación distribuida de 10 kW tomada como referencia para el presente análisis. Además, las herramientas de evaluación para el cálculo del impacto medioambiental son también diferentes. En este caso, se obtenía un impacto de 7.3 g-CO<sub>2</sub>-eq /kWh, lo que muestra una clara diferencia con el valor obtenido de 37.06 g-CO<sub>2</sub>-eq /kWh. A pesar de esta diferencia, estos valores se encuentran en un mismo orden de magnitud, claramente alejados de los valores entre 500 y 1000 asociados a combustibles fósiles.

El análisis del inventario permite también analizar la energía invertida en la construcción de las instalaciones bajo estudio. Estos valores son calculados mediante la consideración de la energía, con origen en diversas fuentes, requerida para la producción de los diferentes componentes de las instalaciones. En este caso, se obtiene un valor de 59 GJ para la instalación de disco Stirling frente a 125 GJ para la instalación fotovoltaica. Esto sí presenta una diferencia significativa, favorable para la instalación Stirling. Para este valor no pueden establecerse comparativas con valores de la literatura, por no haberse identificado valores al respecto.

En cuanto al valor de energía por superficie de instalación, puede referirse este valor la superficie de cada instalación: 73.2 m<sup>2</sup> para la instalación fotovoltaica y 56.7 m<sup>2</sup> para el sistema de disco Stirling. Esto resulta en una evaluación de 1708 MJ/m<sup>2</sup> para el sistema fotovoltaico y 1040 MJ/m<sup>2</sup> para el disco Stirling.

La energía utilizada para la construcción de las instalaciones puede considerarse también en términos de pay-back energético (Energy Pay-Backt Time, EPBT), es decir, el tiempo en que la producción de la instalación genera la misma cantidad de energía que la utilizada en la fabricación de la instalación. Este valor resulta ser de 0,6 años para el disco Stirling frente a 1,3 años para el sistema fotovoltaico. Se considera el mismo tiempo de operación anual para cada instalación.

### 6.3.1.2 Evaluación de impacto

Como se ha explicado previamente, los modelos de daños se utilizan para convertir los resultados de inventario en resultados de categorías de impacto. El método de evaluación de impacto utilizado, el Ecoindicador-99 convierte además estas categorías de impacto en categorías de daño, lo que ayuda a la comprensión e interpretación de los resultados. En el caso de estudio, los resultados se presentan en las tres categorías de daño correspondientes al método Ecoindicador-99: salud humana (*human health*), calidad del ecosistema (*ecosystem quality*) y recursos (*resources*). El Ecoindicador-99 permite realizar además el agregado de estas tres categorías de daño en un solo indicador, que es utilizado con el fin de simplificar la comparación entre sistemas.

La utilización de otro método de evaluación de impacto permite evaluar si las conclusiones alcanzadas son independientes del método seleccionado, de forma que se realiza la verificación de la interpretación y por tanto de los resultados. En el presente estudio, se ha utilizado el método CML2.

Los resultados de la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida, utilizando el método de evaluación de impacto Ecoindicador-99 se presentan en base a las tres categorías de daño anteriormente referidas (salud humana, calidad del ecosistema y recursos) y al indicador único. La perspectiva utilizada es la jerárquica (H/H), por tratarse de la más científica de las tres posibilidades que presenta el método de evaluación de impacto. Estos resultados se analizan en base comparativa entre las dos instalaciones analizadas. Para esta comparativa, se considera que la mayor parte de los materiales se reciclan después de su disposición.

Aunque el mayor interés de la evaluación medioambiental se refiera a la comparativa entre sistemas, se presentan también los resultados para el sistema Stirling aislado.

Cabe destacar en la presentación posterior, que se han utilizado las gráficas directamente extraídas del programa SimaPro, traduciendo sobre las mismas los conceptos presentados por el programa en inglés.

En cuanto a la evaluación del sistema de disco Stirling, el resultado más interesante es el análisis de contribución, donde se reflejan los elementos y procesos que representan un mayor impacto medioambiental. El análisis de contribución puede representarse como el árbol de contribución obtenido con la aplicación del programa informático. En éste, la contribución se expresa en términos porcentuales respecto al indicador único, tal como aparece en la Figura 83.

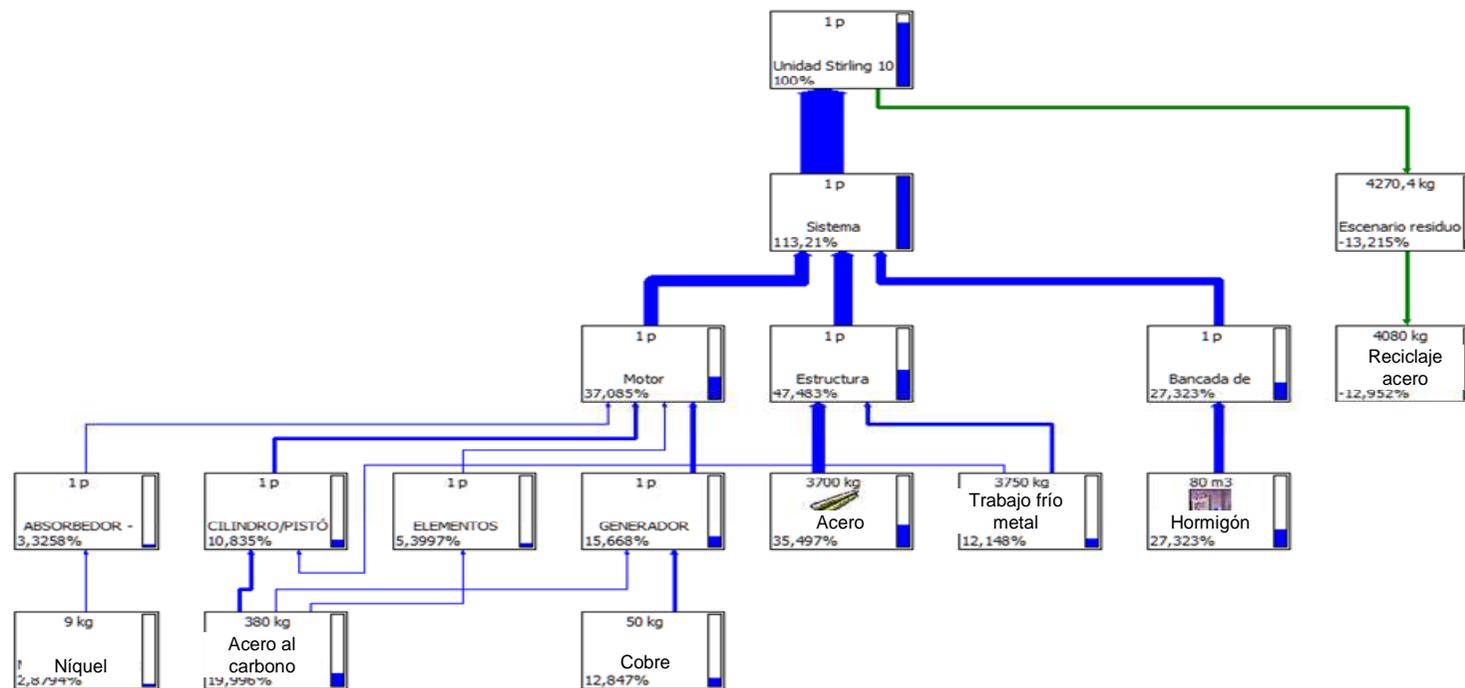


Figura 83 Árbol de contribución del sistema de disco Stirling (con un valor de corte de 2% de contribución).

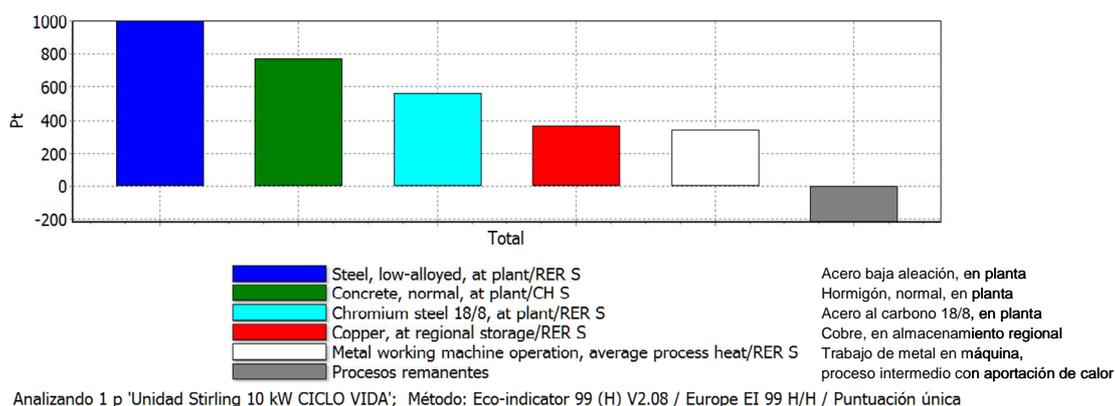


Figura 84 Análisis de contribución de disco Stirling en forma gráfica.

En la Figura 83 puede observarse que la estructura metálica representa el mayor impacto (47,48%), seguida por el motor (37,09%) y la base de hormigón (27,32%). El peso del impacto se debe principalmente a los materiales utilizados, y no a los procesos, tales como el acero para la construcción metálica (*steel, low-alloyed*). Esto se refleja en la Figura 84, donde se indica la contribución de forma gráfica basado en la evaluación de materiales y procesos. En este gráfico (y siguientes) la valoración en el eje vertical se refiere a la puntuación única a la que se traducen las categorías de daño a partir de las categorías de impacto. Esta unidad común es el punto Eco-indicador –Pt. El valor de 1 punto Eco-indicador representa 1 centésima parte de la carga ambiental anual de un ciudadano europeo medio [134].

El análisis de contribución es el primer paso para definir los análisis de sensibilidad de interés a realizar sobre la definición de la instalación. En los análisis de sensibilidad se seleccionan aquellos materiales o procesos susceptibles de tener un impacto significativo en su modificación para la evaluación medioambiental.

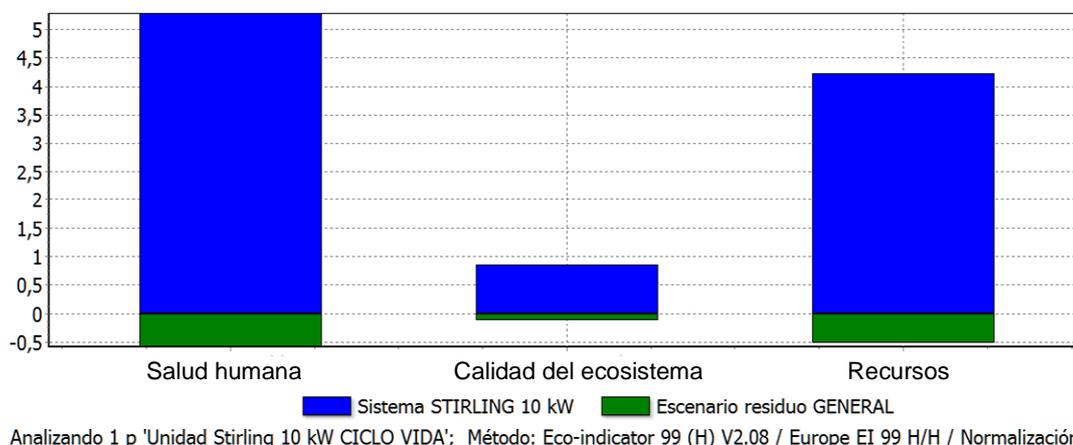


Figura 85 Normalización sistema disco Stirling.

Además de la evaluación de contribución de materiales y procesos, el principal resultado de la aplicación del ACV es la evaluación de las categorías de daño. Este resultado puede presentarse en base a la normalización, como en la Figura 85, o en base a la ponderación, como en la Figura 86. En los valores normalizados, no aparece unidad en el eje vertical, debido a que en este paso de la evaluación, el punto Eco-indicador no se ha ponderado todavía. El proceso de normalización, tal como se explica en el Anexo 1, realiza la conversión de la unidad correspondiente de categoría de daño a punto Eco-indicador, de forma que pueden compararse las tecnologías entre sí en base a cada una de las categorías de daño, pero sin embargo, todavía no pueden sumarse las contribuciones de estas categorías de daño con el fin de tener un solo indicador. Esta conversión tiene en cuenta las perspectivas referidas en dicho anexo para la adimensionalización. La ponderación añade una valoración sobre los valores normalizados, asociados también a la perspectiva correspondiente, de forma que pueden adicionarse. Como se ha referido anteriormente, se ha utilizado preferentemente la perspectiva jerárquica (H/H).

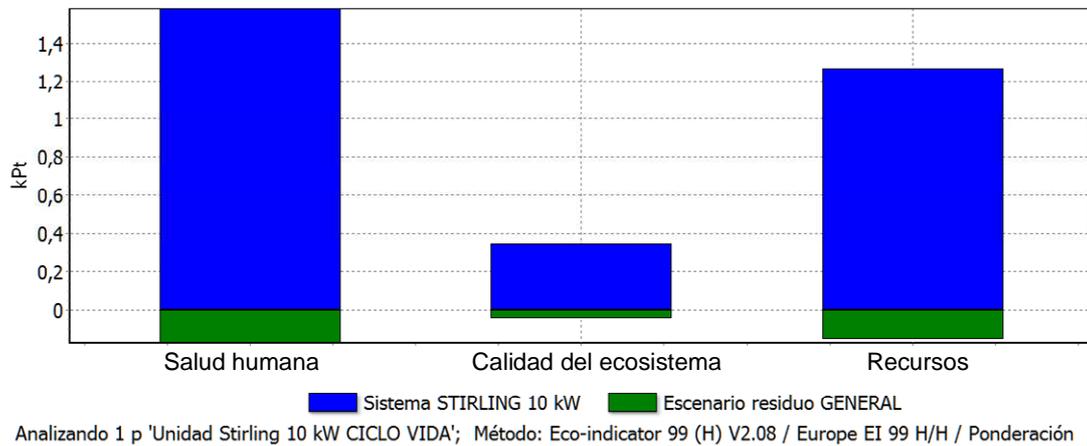


Figura 86 Ponderación categorías de daño sistema disco Stirling.

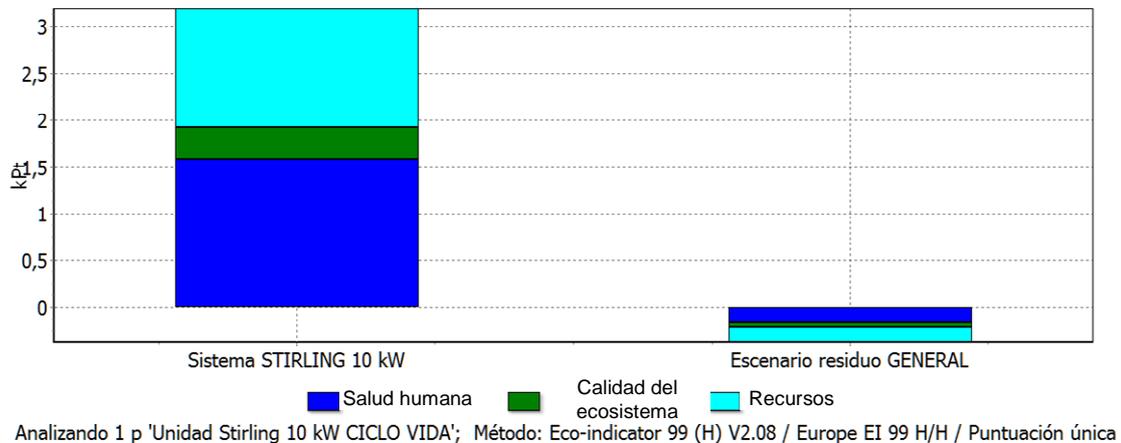


Figura 87 Puntuación única sistema de disco Stirling.

La utilización de un indicador único para todas las categorías de daño ponderadas a través de la perspectiva correspondiente, permiten la adición de las mismas, y por lo tanto, analizar el sistema con una puntuación única. Esto es relevante especialmente cuando el objetivo del ACV es realizar la comparativa de diferentes instalaciones o alternativas de realización, como en el presente estudio. La Figura 87 presenta la puntuación única asociada al sistema de disco Stirling referido, que será posteriormente comparado con las alternativas utilizadas.

A modo de ejemplo de los cálculos que el programa realiza para su evaluación, se presentan las siguientes tablas (Tabla 23, Tabla 24 y Tabla 25). En la Tabla 23 se reflejan las diferentes categorías de impacto (11), con sus unidades correspondientes. Estas categorías de impacto se traducen en categorías de daño, que son también valoradas en su unidad correspondiente, tal como se muestra en la Tabla 24. Tras la ponderación, las categorías de daño se valoran en base al punto Eco-indicador, lo que permite establecer convenientemente las comparativas (Tabla 25). Los resultados distinguen los efectos del sistema y el escenario de residuo definido. Este escenario de residuo es el que se ha definido como “Escenario residuo GENERAL”, tal como aparece en las gráficas. Las consideraciones de su definición se han explicado en el apartado anterior de modelización del sistema.

Tabla 23 Valor de categorías de impacto sistema de disco Stirling

<i>Categoría de impacto</i>	<i>Unidad</i>	<i>Total</i>	<i>Sistema STIRLING 10 kW</i>	<i>Escenario residuo GENERAL</i>
<b>Cancerígenos</b>	DALY	0,0143	0,0144	-7,69E-05
<b>Orgánicos respirados</b>	DALY	9,64E-06	1,62E-05	-6,60E-06
<b>Inorgánicos respirados</b>	DALY	0,0205	0,0246	-0,0040
<b>Cambio climático</b>	DALY	0,0062	0,0071	-0,0009
<b>Radiación</b>	DALY	0,0001	0,0001	0
<b>Capa de ozono</b>	DALY	1,50E-06	1,52E-06	-1,84E-08
<b>Eco-toxicidad</b>	PAF*m <sup>2</sup> yr	40753,60	42039,44	-1285,84
<b>Acidificación/ eutrofización</b>	PDF*m <sup>2</sup> yr	270,85	453,45	-182,60
<b>Uso de la tierra</b>	PDF*m <sup>2</sup> yr	-74,00	258,18	-332,18
<b>Minerales</b>	MJ surplus	11617,32	11886,69	-269,36
<b>Combustibles fósiles</b>	MJ surplus	16343,25	19954,54	-3611,28

Cada categoría de impacto se presenta un su unidad correspondiente. Recordando brevemente de la introducción anterior: DALY representa años de vida perdidos, PAF-m<sup>2</sup>yr la porción de especies afectadas, PDF-m<sup>2</sup>yr la porción de especies desaparecidas, y MJ surplus la energía de extracción de minerales y combustibles fósiles.

Tabla 24 Valor de categorías de daño sistema de disco Stirling

<i>Categoría de daño</i>	<i>Unidad</i>	<i>Total</i>	<i>Sistema STIRLING 10 kW</i>	<i>Escenario residuo GENERAL</i>
Salud humana	DALY	0,041	0,046	-0,005
Calidad del ecosistema	PDF*m <sup>2</sup> yr	4272,213	4915,586	-643,372
Recursos	MJ surplus	27960,581	31841,239	-3880,657

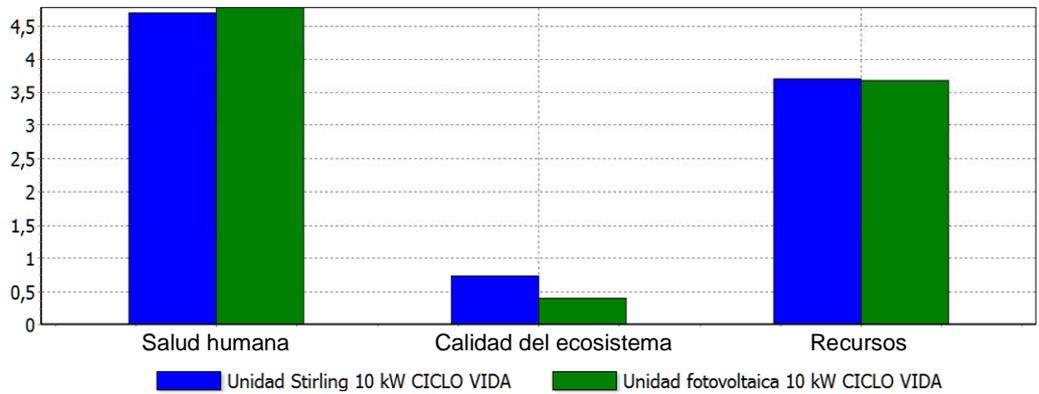
Tabla 25 Valor de categorías de daño sistema de disco Stirling - ponderación

<i>Categoría de daño</i>	<i>Unidad</i>	<i>Total</i>	<i>Sistema STIRLING 10 kW</i>	<i>Escenario residuo GENERAL</i>
<b>Total</b>	Pt	2821,742	3194,634	-372,891
Salud humana	Pt	1411,596	1585,247	-173,650
Calidad del ecosistema	Pt	298,713	343,697	-44,984
Recursos	Pt	1111,433	1265,689	-154,256

### Análisis comparativo entre sistema de disco Stirling y equivalente fotovoltaico.

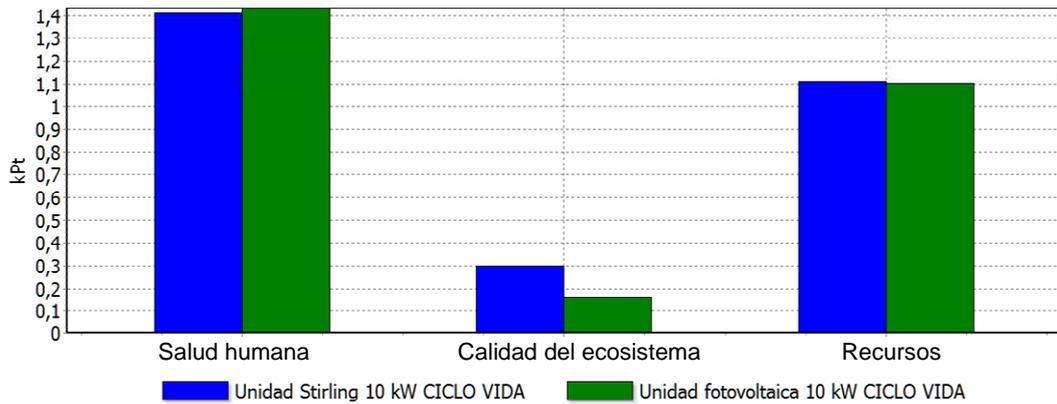
En el caso de estudio, la aplicación del ACV se realiza para evaluar las diferencias entre el sistema de disco Stirling y un sistema de referencia que podría ser implementado en similares condiciones y que utiliza la misma fuente de energía. El objetivo de esta evaluación es verificar si existen diferencias sustanciales que permitan promover, o bien desestimar, la continuación de trabajos en esta tecnología en desarrollo.

La comparativa puede realizarse en base a valores normalizados (Figura 88) o en base a valores ponderados (Figura 89). Como anteriormente se ha referido, no aparecen unidades en el eje vertical en el caso de categorías de valores normalizados. La adición de valores ponderados evaluados en base al punto Eco-indicador, permiten además presentar la comparación entre instalaciones en base a una puntuación única (Figura 90).



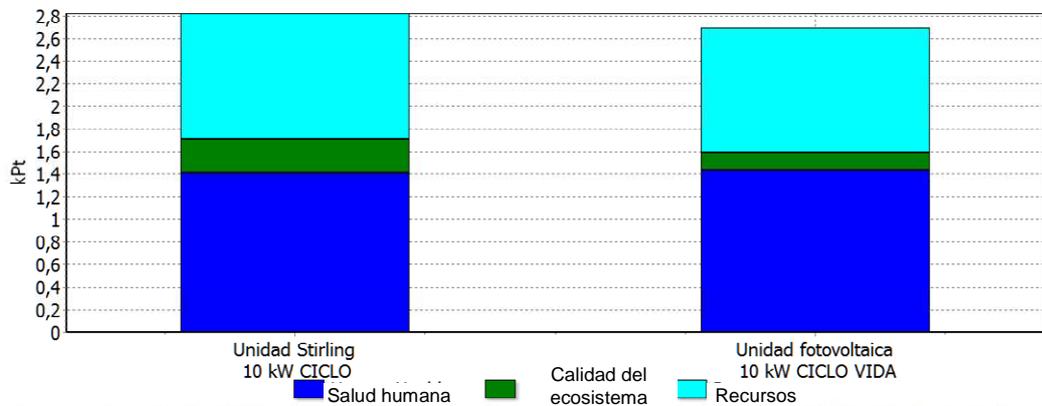
Comparando 1 p 'Unidad Stirling 10 kW CICLO VIDA' con 1 p 'Unidad fotovoltaica 10 kW CICLO VIDA'; Método: Eco-indicator 99

Figura 88 Categorías de daño normalizadas. Comparación instalación Stirling y fotovoltaica. Eco-indicador 99 H/H.



Comparando 1 p 'Unidad Stirling 10 kW CICLO VIDA' con 1 p 'Unidad fotovoltaica 10 kW CICLO VIDA'; Método: Eco-indicator 99

Figura 89 Ponderación comparación disco Stirling y fotovoltaico. Eco-indicador 99 H/H.



Comparando 1 p 'Unidad Stirling 10 kW CICLO VIDA' con 1 p 'Unidad fotovoltaica 10 kW CICLO VIDA'; Método: Eco-indicator 99

Figura 90 Indicador único. Comparación instalación Stirling y fotovoltaica. Ecoindicador 99 H/H.

Las gráficas anteriores muestran que no hay diferencias significativas entre ambas instalaciones, tanto en la valoración de puntuación única, como en la de categorías de daño separadas. Para ambas instalaciones, las categorías con mayor daño resultan en el siguiente orden: salud humana, recursos y calidad del ecosistema. Pueden evaluarse también las categorías de impacto como evaluación de nivel medio, que se presentan en las siguientes gráficas (Figura 91 y Figura 92). La Figura 91 presenta los valores comparativos, con el fin de analizar si hay diferencias significativas en diferentes categorías de impacto. Como puede observarse, sí existen diferencias apreciables. En el caso de que se priorizase el efecto de la instalación sobre alguna categoría de impacto en particular, se tendría en cuenta esta evaluación de punto medio.

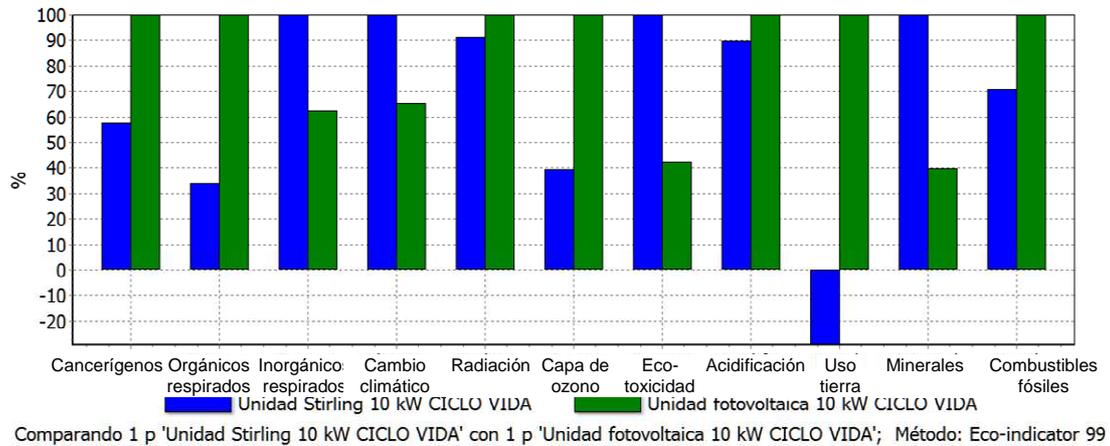


Figura 91 Categorías de impacto. Comparación instalación Stirling y fotovoltaica. Eco-indicador 99 H/H.

La normalización de los valores de las categorías de impacto resulta en la evaluación que se refleja en la Figura 92. Esto permite valorar el peso de las diferentes categorías de impacto, lo que puede ser utilizado para determinar aquellas sobre las que podría profundizarse en base a objetivos concretos.

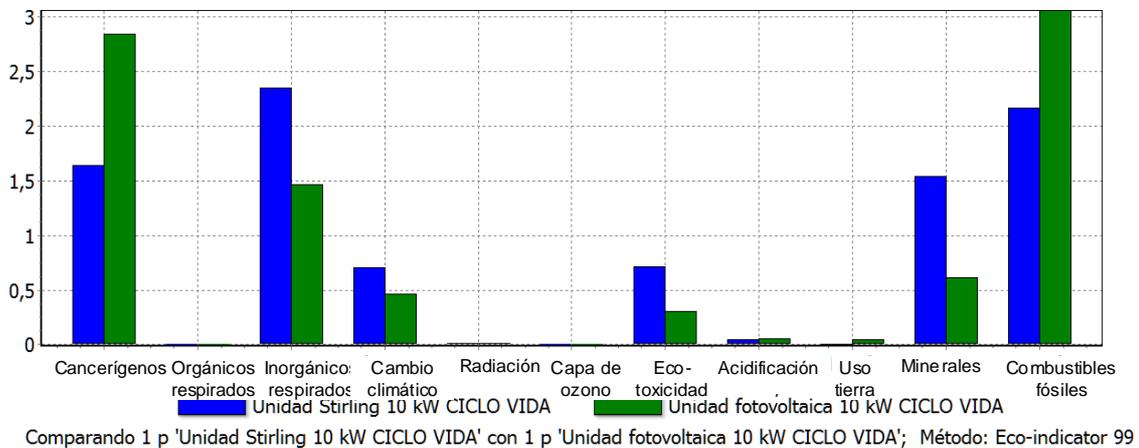


Figura 92 Categorías de impacto normalizadas. Comparación instalación Stirling y fotovoltaica. Eco-indicador 99 H/H.

### 6.3.1.2.1 Aplicación de un método de evaluación de impacto alternativo.

El método de evaluación de impacto CML 2 se ha utilizado también para verificar la validez de las conclusiones para la comparativa entre el disco Stirling y la instalación fotovoltaica. Esta validez se establece en base a la consistencia de los resultados obtenidos y de su independencia con respecto al método de evaluación de impacto utilizado. Los resultados de evaluación con este segundo método de evaluación de impacto se presentan en las gráficas siguientes (Figura 93 y Figura 94). Al tratarse el método CML2 de un método de evaluación de punto medio, la comparativa final se establece en base a las categorías de impacto normalizadas. Aunque en la comparación porcentual se ven diferencias no despreciables para algunas categorías de impacto (Figura 93), la comparativa de los valores normalizados indica que las diferencias no son significativas en las categorías más destacadas - ecotoxicidad acuática marina y de agua dulce- (Figura 94), de forma que la conclusión es similar a la alcanzada con el método seleccionado Eco-indicador 99.

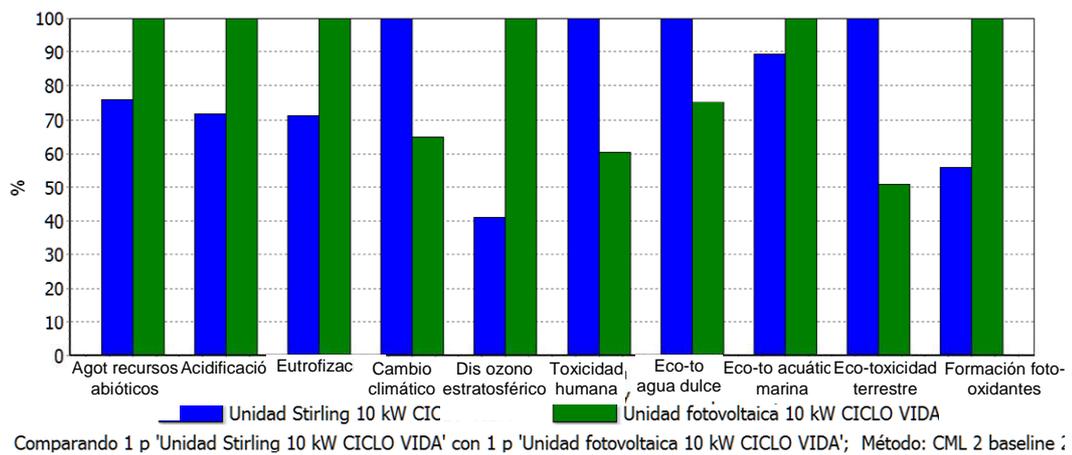


Figura 93 Categorías de impacto. Comparativa disco Stirling y fotovoltaica. CML2.

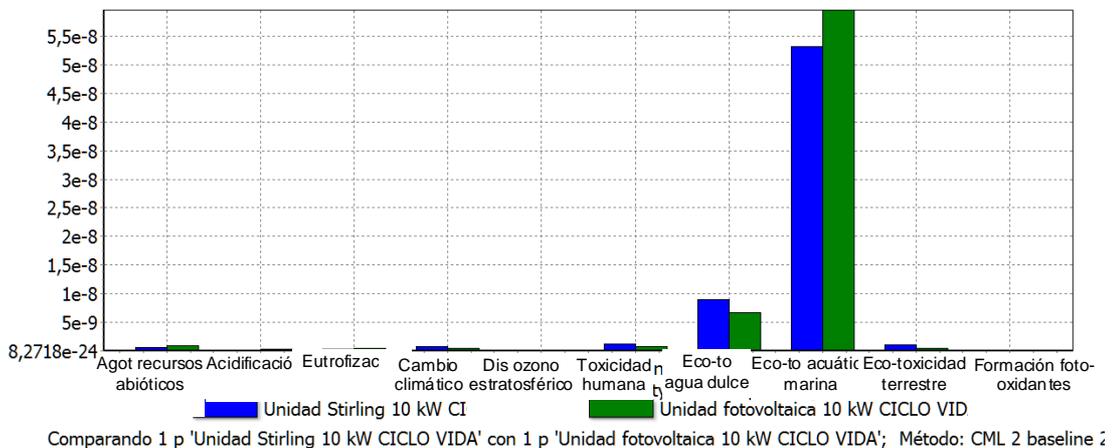


Figura 94 Categorías de impacto normalizadas. Comparativa disco Stirling y fotovoltaica. CML2.

Las siguientes tablas (Tabla 26 y Tabla 27) muestran los valores referidos a las gráficas anteriores.

Tabla 26 Categorías de impacto. Comparativa disco Stirling y fotovoltaica. CML2

<i>Categoría de impacto</i>	<i>Unidad</i>	<i>Unidad Stirling 10 kW CICLO VIDA</i>	<i>Unidad fotovoltaica 10 kW CICLO VIDA</i>
<b>Agotamiento recursos abióticos</b>	kg Sb eq	102,75	135,35
<b>Acidificación</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	65,71	91,73
<b>Eutrofización</b>	kg PO <sub>4</sub> --- eq	43,77	61,42
<b>Cambio climático</b>	kg CO <sub>2</sub> eq	29630,51	19176,59
<b>Disminución ozono estratosférico</b>	kg CFC-11 eq	0,0014	0,0034
<b>Toxicidad humana</b>	kg 1,4-DB eq	70234,32	42457,15
<b>Eco-toxicidad acuática agua dulce</b>	kg 1,4-DB eq	18346,49	13785,38
<b>Eco-toxicidad acuática marina</b>	kg 1,4-DB eq	27291301,16	30545665,91
<b>Eco-toxicidad terrestre</b>	kg 1,4-DB eq	268,37	136,57
<b>Formación foto-oxidantes</b>	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	3,13	5,60

Tabla 27 Categorías de impacto normalizadas. Comparativa disco Stirling y fotovoltaica. CML2.

<i>Categoría de impacto</i>	<i>Unidad Stirling 10 kW CICLO VIDA</i>	<i>Unidad fotovoltaica 10 kW CICLO VIDA</i>
Agotamiento recursos abióticos	6,56E-10	8,64E-10
Acidificación	2,04E-10	2,85E-10
Eutrofización	3,30E-10	4,64E-10
Cambio climático	7,14E-10	4,62E-10
Disminución ozono estratosférico	2,77E-12	6,73E-12
Toxicidad humana	1,22E-09	7,43E-10
Eco-toxicidad acuática agua dulce	8,98E-09	6,75E-09
Eco-toxicidad acuática marina	5,32E-08	5,95E-08
Eco-toxicidad terrestre	9,98E-10	5,08E-10
Formación foto-oxidantes	3,25E-11	5,82E-11

### 6.3.1.2.2 Evaluación del impacto de la perspectiva.

Es también interesante verificar si las conclusiones alcanzadas son independientes de la perspectiva utilizada. Aunque se ha justificado el uso de la perspectiva jerárquica, se ha comprobado con las otras dos perspectivas si el análisis es similar.

**Perspectiva E – Igualitaria:** la comparativa se refleja en la Figura 95. En este caso, existen ligeras diferencias en cuanto al balance entre categorías de daño, pero en todo caso, la

comparación entre ambas instalaciones lleva a la misma conclusión que con la perspectiva jerárquica (H/H).

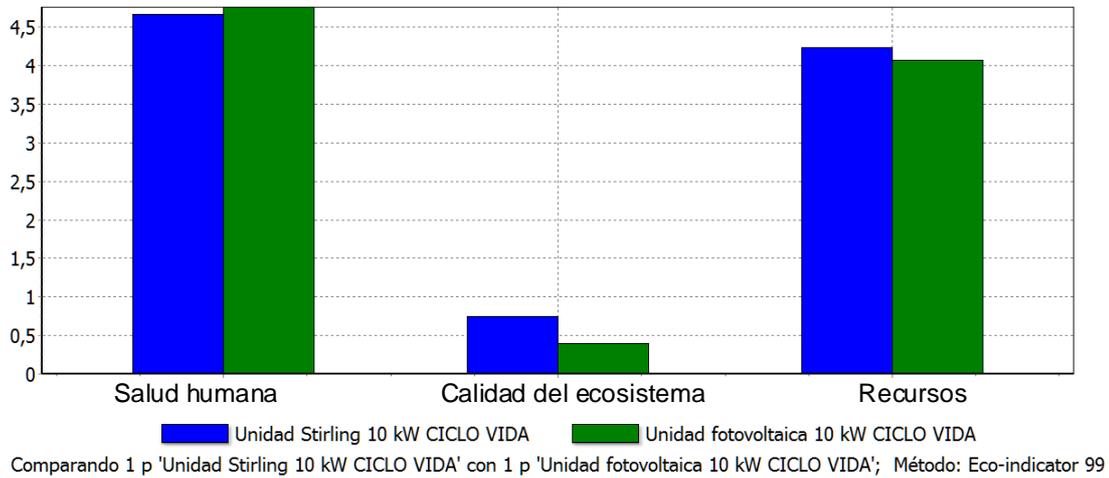


Figura 95 Categorías de daño normalizadas. Comparación instalación Stirling y fotovoltaica. Eco-indicador 99 E/E.

**Perspectiva I – Individualista:** en este caso la diferencia sí es significativa en la categoría recursos (Figura 96). La principal diferencia de esta perspectiva respecto a las dos anteriores es que en este caso se asume que los combustibles fósiles serán fácilmente sustituibles. Es por ese motivo que considera exclusivamente los minerales, de donde vendría la diferencia entre ambos sistemas. Esta perspectiva no se ha seleccionado ya que expone una situación que parece poco sensata en la situación actual, donde se asume que el agotamiento de los combustibles fósiles es una realidad.

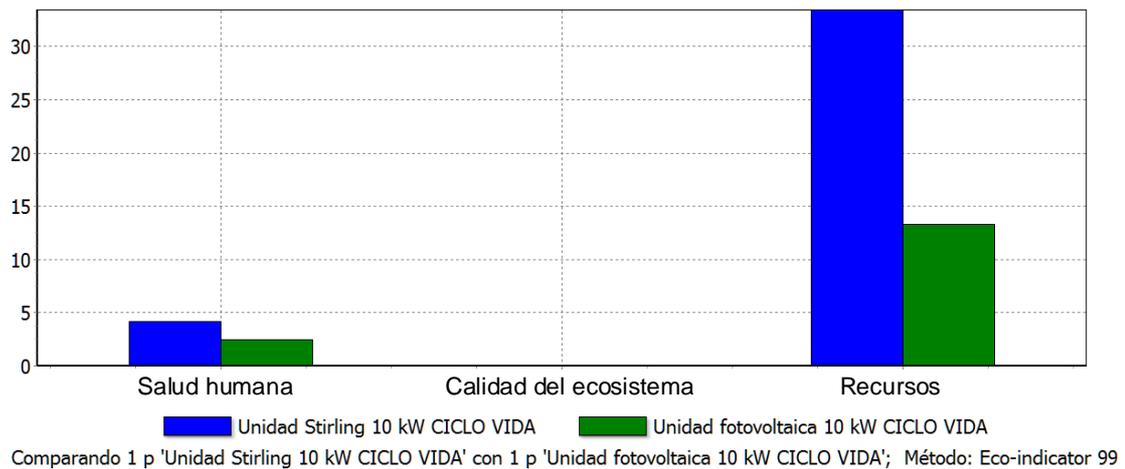


Figura 96 Categorías de daño normalizadas. Comparación instalación Stirling y fotovoltaica. Eco-indicador 99 I/I.

### 6.3.1.2.3 Estudios de sensibilidad

El análisis de sensibilidad refleja el efecto en la evaluación de los resultados del ACV de potenciales modificaciones en la descripción de las instalaciones. Para ello, se centra por una parte en la factibilidad técnica de dicha modificación, así como en el peso que la modificación puede tener en base al análisis de contribución realizado.

#### Cantidad de hormigón.

En el caso de la instalación de disco Stirling, la primera modificación factible a plantearse sería variar la cantidad de hormigón utilizada en la base. Aunque el porcentaje de contribución no es el mayor, parece ser el elemento más sobredimensionado de la instalación, de acuerdo a la información provista por los responsables de Odiello [139]. La siguiente Figura 97 muestra el impacto debido a la modificación del hormigón desde el valor actual (150 ton) a 0 ton, con un valor intermedio de 75 ton en base a las categorías de daño. Como puede verse, la comparativa se realiza en base al indicador único, presentándose en diferentes colores la contribución de cada una de las categorías de daño ponderadas. El resultado muestra que el balance ligeramente favorable de la instalación fotovoltaica frente a la definición original del sistema de disco Stirling puede invertirse en el caso de que la cantidad de hormigón pueda reducirse. Por lo tanto, es importante determinar la base de hormigón necesaria, sin recurrir al sobredimensionamiento. Es importante también señalar en este punto que la comparativa de los sistemas Stirling y fotovoltaico se basan en el sistema Stirling asentado en una base de hormigón y el fotovoltaico montado en tejado. Podría valorarse el montaje del sistema fotovoltaico sobre estructura de hormigón para realizar una comparativa semejante, sin embargo, no representaría la utilización lógica para generación distribuida. En todo caso, el sistema fotovoltaico sí incluye la construcción específica del tejado para soportar la estructura correspondiente.

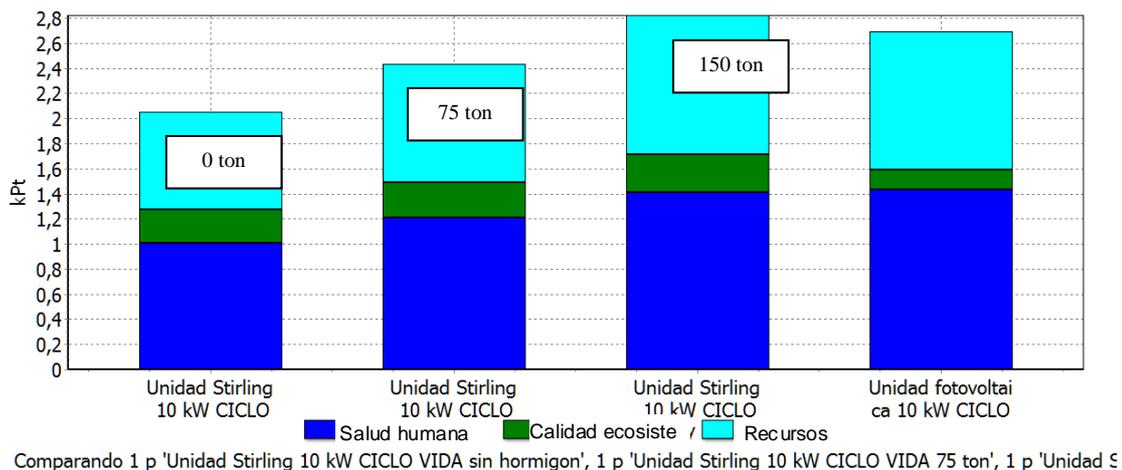


Figura 97 Estudio sensibilidad – cantidad hormigón. Valoración categorías de daño ponderadas. Método Eco-Indicador 99 H/H.

Este análisis puede también realizarse en base a las categorías de impacto, tal como se muestra en las Figura 98 y Figura 99. En la Figura 98 se muestra, al igual que en el caso anterior en base

al indicador único, pero en este caso los códigos de colores corresponden a las categorías de impacto ponderadas. En el caso de la Figura 99, se presentan las categorías de impacto normalizadas. Este análisis sobre categorías de impacto permitiría discernir aspectos más particulares y de detalle.

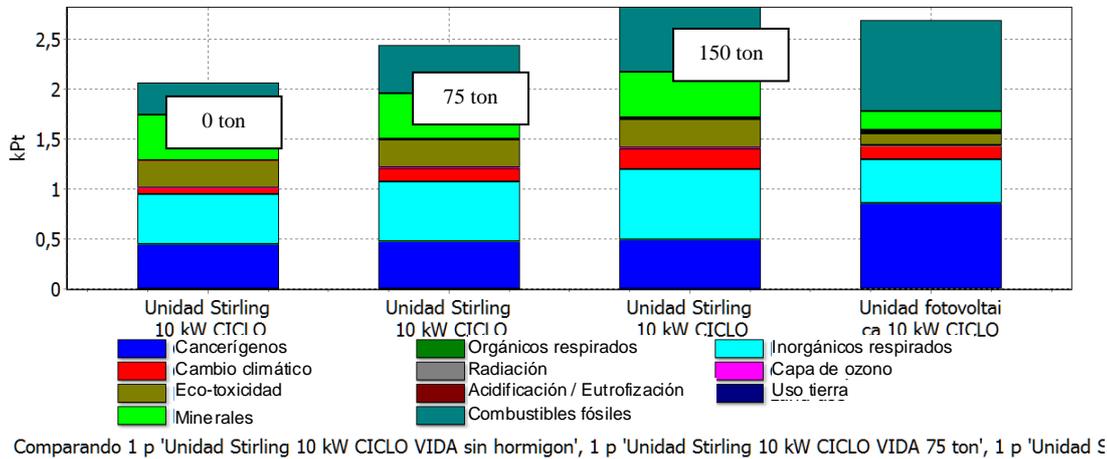


Figura 98 Estudio sensibilidad – cantidad hormigón. Valoración categorías de impacto ponderadas. Método Eco-Indicador 99 H/H.

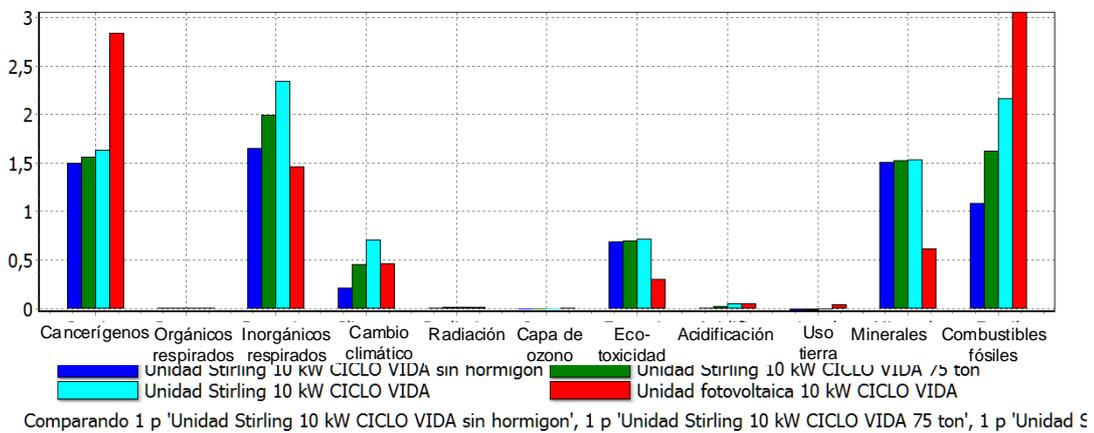
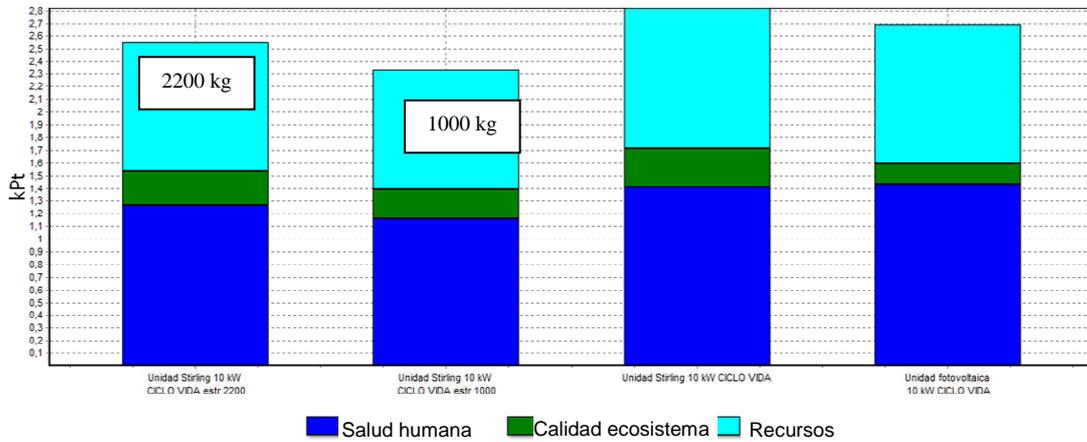


Figura 99 Análisis de sensibilidad para la contribución del hormigón. Método Eco-Indicador 99 H/H.

### Peso estructura.

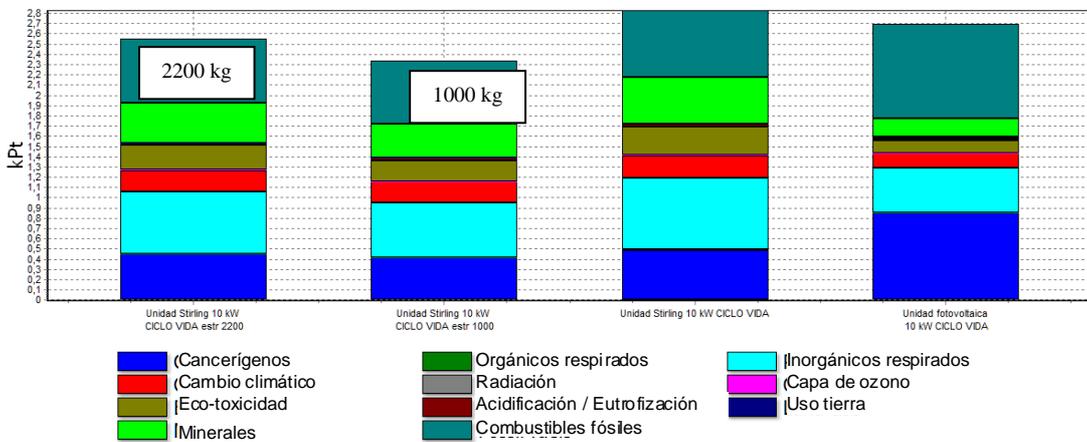
Se valora una reducción en el peso de la estructura (inicialmente de 3700 kg), debido al hecho de que es el factor más relevante en el análisis de contribución. Se realiza el análisis con 2200 kg y con 1000 kg con el fin de verificar la disminución en el impacto en las diferentes categorías, tanto de daño (Figura 100) como en las de impacto (Figura 101 y Figura 102). Se observa que la reducción del peso de la estructura podría resultar en un valor inferior en la evaluación medioambiental, convirtiendo una ligera diferencia desfavorable para la tecnología

de disco Stirling en favorable. Al igual que en el caso anterior, es necesario fijar la estructura estrictamente necesaria para el sistema, lo que supone un análisis de optimización de la resistencia de la misma.



Comparando 1 p 'Unidad Stirling 10 kW CICLO VIDA estr 2200 kg', 1 p 'Unidad Stirling 10 kW CICLO VIDA estr 1000 kg', 1 p 'Uni

Figura 100 Análisis de sensibilidad para la contribución del peso de la estructura. Método Eco-Indicador 99 H/H.



Comparando 1 p 'Unidad Stirling 10 kW CICLO VIDA estr 2200 kg', 1 p 'Unidad Stirling 10 kW CICLO VIDA estr 1000 kg', 1 p 'Uni

Figura 101 Análisis de sensibilidad para la contribución del peso de la estructura. Método Eco-Indicador 99 H/H.

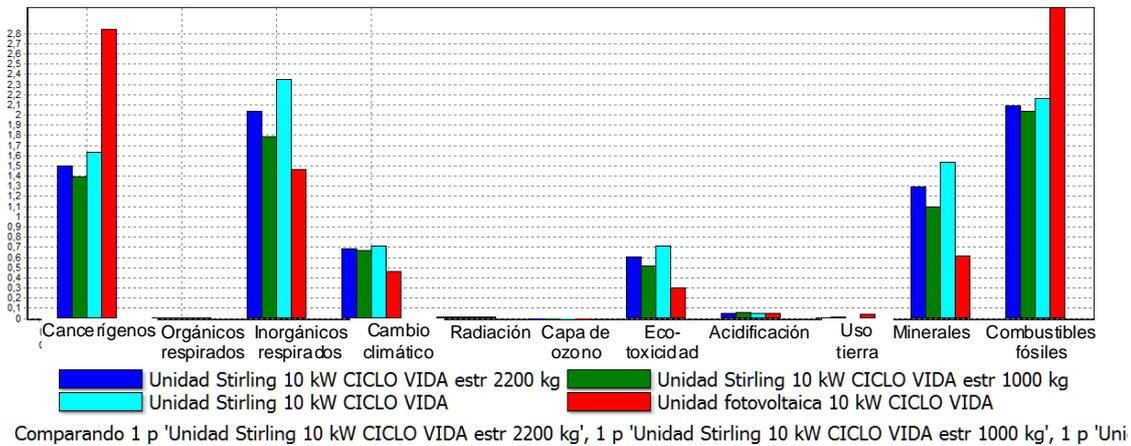


Figura 102 Análisis de sensibilidad para la contribución del peso de la estructura. Método Eco-Indicador 99 H/H.

## 6.3.2 Evaluación medioambiental de alternativas de hibridación

### 6.3.2.1 Inventario

En la evaluación anterior, se han referido las emisiones de CO<sub>2</sub> como el parámetro más significativo a la hora de comparar resultados de inventario. Es, de hecho, un valor del que se cuenta con referencias en la bibliografía para su evaluación. En el caso de instalaciones híbridadas, este parámetro estará fundamentalmente ligado al consumo de combustible, que representa un peso importante con respecto al impacto medioambiental global. Al considerar el biogás como uno de los combustibles potenciales para la hibridación, hay que realizar una serie de consideraciones respecto a la emisión de CO<sub>2</sub> asociada al mismo, ya que el propio combustible es el mayor responsable de la emisión calculada.

Cuando se utilizan métodos de evaluación de impacto, el CO<sub>2</sub> biogénico para el biogás no se considera en las evaluaciones. El carbono emitido por los combustibles fósiles se considera aparte del ciclo global del carbono, de forma que se añade a la cantidad total de carbono en circulación activa entre la atmósfera y la biosfera [140]. En cambio, el CO<sub>2</sub> que resulta de quemar biogás es absorbido como parte del ciclo de carbón biogénico, donde las plantas absorben el CO<sub>2</sub> para su crecimiento, a través de la fotosíntesis, y liberan dióxido de carbono cuando se descomponen o son incensadas. El ciclo biogénico no libera nuevo dióxido de carbono en la atmósfera, por lo que se considera carbón neutral [140]. Al respecto, existe un documento firmado por 114 científicos [141] que expresan que igualar las emisiones de carbón biogénico con las emisiones de combustibles fósiles no es consistente con el buen ejercicio de la ciencia. De hecho, esta consideración podría representar un freno para el desarrollo de instalaciones de biomasa que efectivamente reducen las emisiones, o bien hacer que plantas existentes de biomasa se conviertan a combustibles fósiles, o cesen su actividad. Así, no se ha considerado el CO<sub>2</sub> biogénico en la evaluación del sistema híbridado con biogás.

En la aplicación a los sistemas evaluados en la presente tesis, para los resultados de inventario se obtienen los siguientes resultados referidos a la producción eléctrica del sistema, tomando como anteriormente se ha citado la operación del sistema durante un periodo de vida útil de 30 años:

- 265 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh para el biogás
- 410 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh para el gas natural

Estos valores están en acuerdo con otros autores [77] en referencia a sistemas que utilizan los combustibles generados.

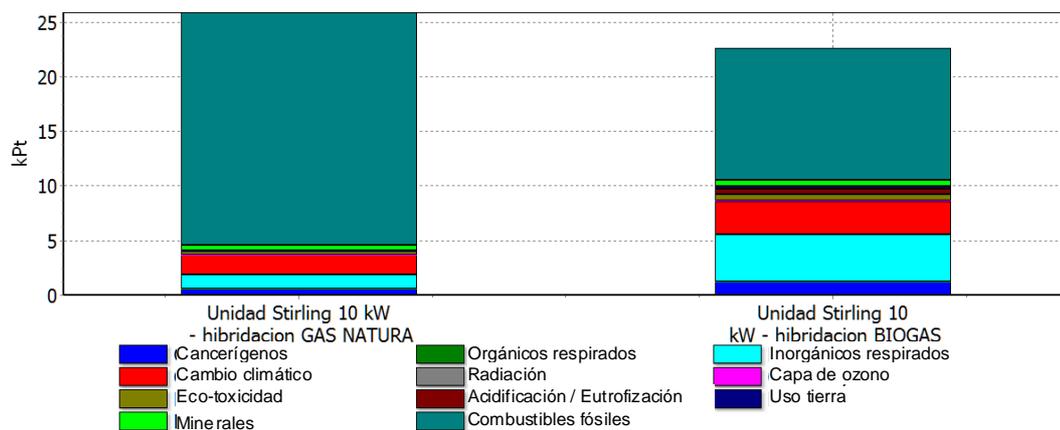
La diferencia entre el funcionamiento de ambos sistemas es considerable, por lo que en este caso se considera que la comparativa establece un balance positivo para la utilización de biogás. La hibridación con este combustible presenta, pues, ventajas respecto a la operación, tal como se ha presentado en el capítulo 4, pero también desde el punto de vista medioambiental.

Los parámetros asociados al pay-back energético o la energía de fabricación no se aplican en la comparativa a realizar en los sistemas híbridos, debido al importante peso que tienen los consumos de combustibles asociados a la hibridación.

### 6.3.2.2 Evaluación de impacto

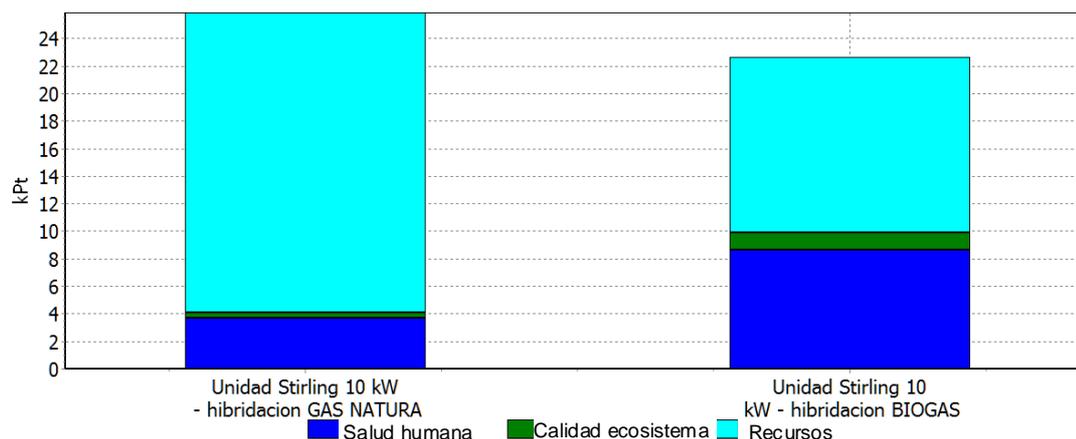
La aplicación del proceso completo del Análisis de Ciclo de Vida se realiza considerando el método de evaluación de impacto Ecoindicador-99. Como se ha señalado, se consideran de forma comparativa dos unidades de disco Stirling de 10 kW, hibridadas con gas natural y biogás durante su vida útil de 30 años. La modelización tiene en cuenta la construcción de la instalación y el consumo de combustible durante la operación. El valor del consumo de combustible se ha tomado en base anual, considerando un año tipo, tal como se ha presentado en el capítulo 4. Como ya se demostró, la principal ventaja de la aplicación de la hibridación es el incremento en energía producida total, incrementando el número de horas de operación y por lo tanto aumentando la amortización de la instalación en cuestión. La diferencia en la legislación para la utilización de combustibles de origen fósil, como el gas natural, o combustibles de biomasa, como el biogás, es decisiva para los factores operativos de la producción. El hecho de que el límite de combustible alternativo a utilizar sea de 50% para el caso del biogás, frente al 15% para el gas natural, hace que la instalación hibridada con biogás presente claras ventajas en cuanto a la operación. Sin embargo, es interesante también evaluar la diferencia en términos de cargas medioambientales. Para ello, será necesario adimensionalizar los parámetros medioambientales respecto a la producción eléctrica, al igual que se ha hecho con las emisiones de CO<sub>2</sub>.

La aplicación del método de evaluación de impacto Ecoindicador-99 H-H, resulta en un impacto mayor para el sistema hibridado con gas natural, presentado en términos del indicador único, tal como se muestra en las siguientes gráficas: valorado en categorías de impacto (Figura 103) y de daño (Figura 104).



Comparando 1 p 'Unidad Stirling 10 kW - hibridacion GAS NATURAL' con 1 p 'Unidad Stirling 10 kW - hibridacion BIOGAS'; Méto

Figura 103 Puntuación final (Eco-indicador 99 H/H) para el sistema Stirling hibridado con gas natural y biogás. Categorías de impacto.



Comparando 1 p 'Unidad Stirling 10 kW - hibridacion GAS NATURAL' con 1 p 'Unidad Stirling 10 kW - hibridacion BIOGAS'; Méto

Figura 104 Puntuación final (Eco-indicador 99 H/H) para el sistema Stirling hibridado con gas natural y biogás. Categorías de daño.

Al no ser instalaciones equivalentes respecto a la producción energética asociada, es necesario establecer una corrección mediante su adimensionalización para establecer la comparativa correcta. Así, se divide el valor del indicador único (expresado en puntos) por el valor de la energía final producida. Esto resulta en los siguientes valores:

- 21.6 Pt/kWh para el biogás y 43.5 Pt/kWh para el gas natural.

Estos valores confirman el menor impacto medioambiental del biogás.

El indicador único se obtiene como un agregado de las tres categorías de daño calculadas desde el inventario mediante la aplicación de los modelos de daño: salud humana, calidad del ecosistema y recursos. La evaluación de estas categorías de daño permite la interpretación de las diferencias entre cargas medioambientales (Figura 105). La categoría de recursos es la más significativa para ambas posibilidades de hibridación, tal como se muestra en la siguiente gráfica. En cuanto a la comparativa, presenta una puntuación mayor para el gas natural incluso considerando que el límite de utilización del 15% respecto al 50% del biogás supone una cantidad consumida significativamente menor.

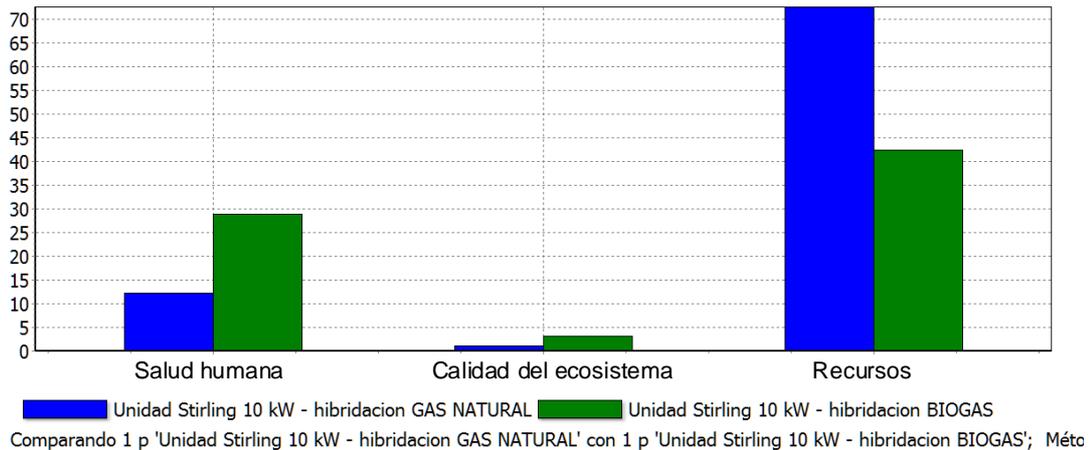


Figura 105 Desglose del impacto medioambiental en categorías de daño para el sistema Stirling hibridado con gas natural y biogás. Método Eco-Indicador 99 H/H.

La evaluación de categorías intermedias puede ser también analizada mediante la aplicación del método de evaluación de impacto seleccionado, tal como se muestra en la siguiente gráfica (Figura 106). El impacto del consumo de combustibles fósiles es la contribución principal que supone el alto impacto en la categoría de daño de recursos.

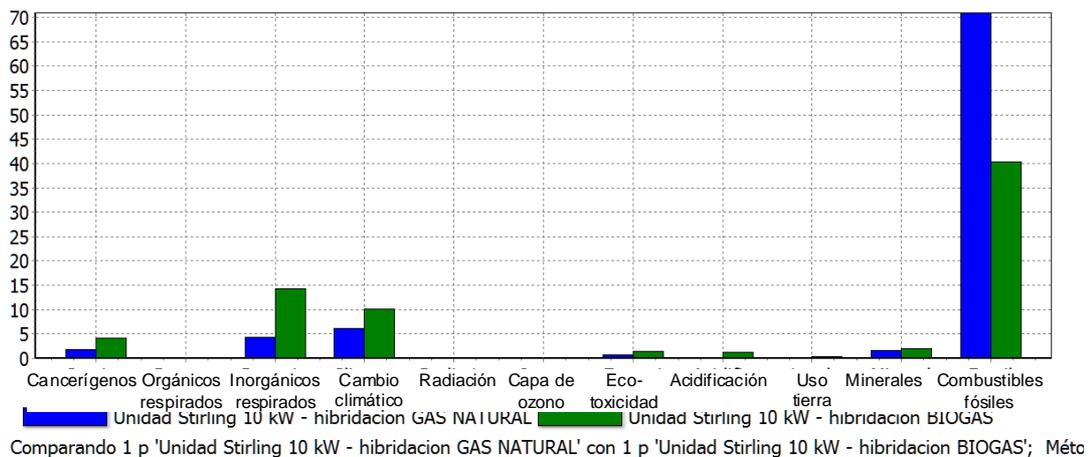


Figura 106 Caracterización de punto medio para el sistema Stirling hibridado con gas natural y biogás. Método Eco-Indicador 99 H/H.

Con respecto a los diferentes componentes y fases de operación, puede establecerse la comparativa en cuanto al indicador único. Como puede verse, el impacto principal se debe al consumo de combustible, lo que se refleja tanto en el análisis de categorías de daño como en las categorías de impacto (Figura 107 y Figura 108 para el biogás, Figura 109 y Figura 110 para gas natural).

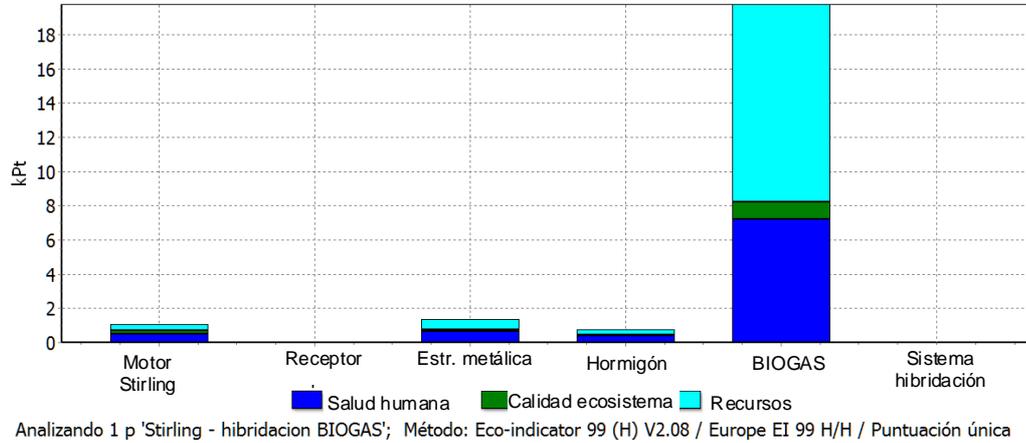


Figura 107 Puntuación única para las fases de construcción y operación del sistema hibridado con biogás. Categorías de daño. Método Eco-Indicador 99 H/H.

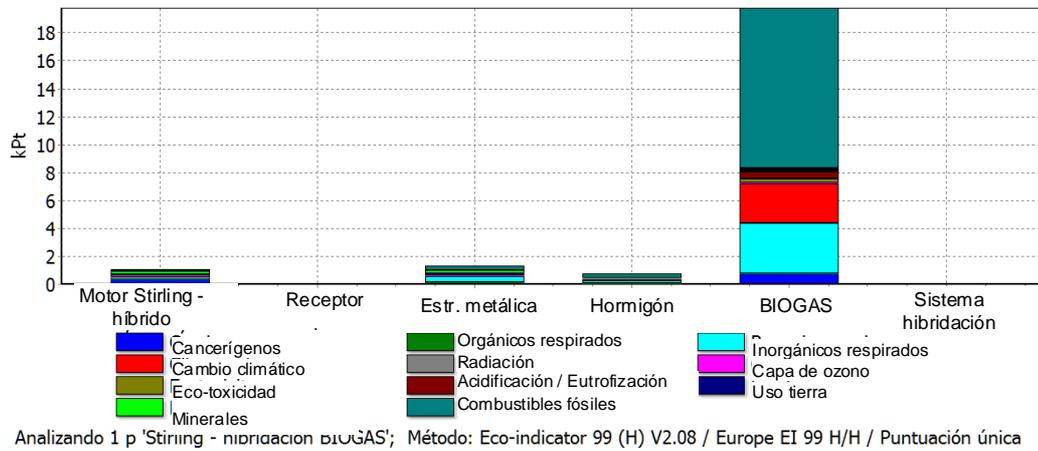
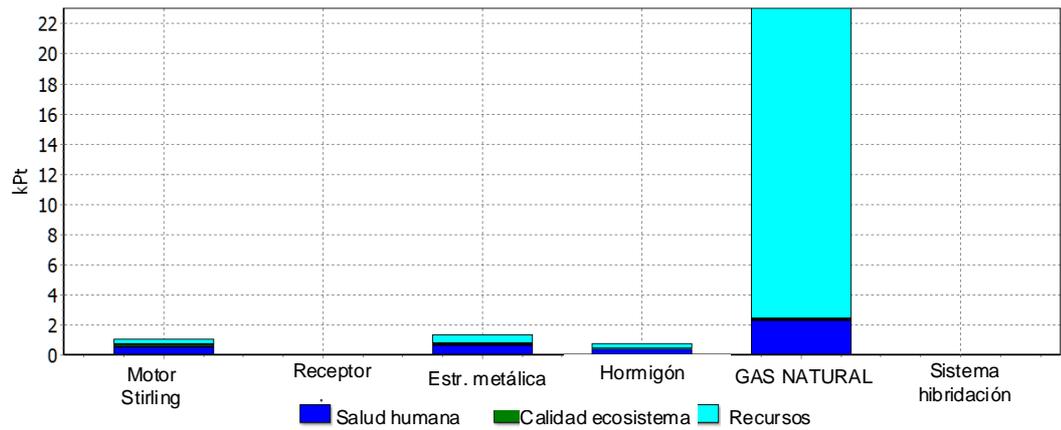
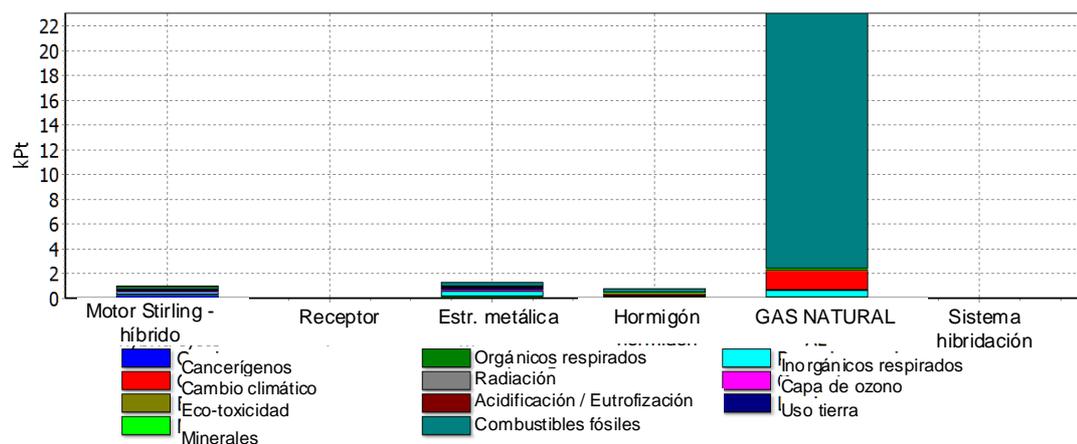


Figura 108 Puntuación única para las fases de construcción y operación del sistema hibridado con biogás. Categorías de impacto. Método Eco-Indicador 99 H/H.



Analizando 1 p 'Stirling - hibridacion GAS NATURAL'; Método: Eco-indicador 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H / Puntuación única

Figura 109 Puntuación única para las fases de construcción y operación del sistema hibridado con gas natural. Categorías de daño. Método Eco-Indicador 99 H/H.



Analizando 1 p 'Stirling - hibridacion GAS NATURAL'; Método: Eco-indicador 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H / Puntuación única

Figura 110 Puntuación única para las fases de construcción y operación del sistema hibridado con gas natural. Categorías de impacto. Método Eco-Indicador 99 H/H.

## 6.4 Conclusiones

Como se ha mencionado anteriormente, el último paso a realizar en el ACV sería la interpretación de resultados. Así, representa el cuarto paso del ACV, tras la definición de los objetivos y alcance, el inventario y la evaluación del impacto, presentadas en los apartados anteriores.

Con el fin de tener una perspectiva global, se ha introducido previamente a dicha interpretación un apartado de síntesis con el fin de resumir la información presentada previamente, englobando ambos apartados en las conclusiones del capítulo.

### 6.4.1 Síntesis

En cuanto al sistema de disco Stirling de forma aislada, se ha verificado, por una parte, cuáles son los efectos más significativos, y por otra, cuáles son los elementos con mayor impacto en el resultado total.

- En el método Eco-indicador 99, las categorías de impacto se calculan a través de sus correspondientes indicadores, pero sin embargo no se realiza ponderación a este nivel, por lo que no puede determinarse cuál es la categoría con mayor significancia relativa. La ponderación, realizada a nivel de las categorías de daño, sí permite determinar cuáles serán los aspectos de mayor importancia. Con este método y la perspectiva jerárquica, el impacto mayor se muestra en las categorías de daño Recursos y Salud humana. Resulta ligeramente más alta la de Salud humana. A ésta contribuyen los valores de emisiones asociados a las categorías de impacto (cancerígenos, orgánicos e inorgánicos respirados, cambio climático, radiación y capa de ozono). En la de recursos, contribuyen las categorías de impacto de minerales y de combustibles fósiles. La categoría con menor significancia relativa es la de Calidad del Ecosistema. En el método CML 2, sí se realiza la normalización a nivel de las categorías de impacto, por lo que deducimos que la categoría de impacto más relevante es la de eco-toxicidad acuática marina, lo que representa un daño al ecosistema.
- El análisis de la contribución de proceso permite además determinar cuáles son los aspectos que suponen una contribución mayor. En el caso de la tecnología de disco Stirling, se ha determinado que el orden de contribución es el siguiente: estructura metálica, motor y base de hormigón. En este sentido, se ha realizado un análisis de sensibilidad que permite evaluar el potencial de disminución de contribución de dos elementos susceptibles de ser modificados: la bancada de hormigón y la estructura metálica. Los resultados se han mostrado en comparación con la evaluación del sistema fotovoltaico, con el fin de analizar cómo podría reducirse el impacto ambiental del sistema de disco Stirling, de forma que resulte más ventajoso respecto al sistema fotovoltaico seleccionado.

En cuanto a la comparativa realizada con el sistema fotovoltaico analizado, los principales resultados son:

- El análisis de inventario muestra un valor favorable de la instalación fotovoltaica, pero con valores en el mismo orden de magnitud. La diferencia existente entre los 22.34 g-CO<sub>2</sub>/kWh del sistema fotovoltaico y los 36.85 g-CO<sub>2</sub>/kWh del sistema de disco Stirling representa una diferencia no significativa, especialmente dada la incertidumbre en la definición del sistema de disco Stirling. En cuanto a la evaluación de impacto, los valores obtenidos, tanto en lo referente a categorías de daño normalizadas como al indicador único, son muy similares.

En cuanto a la comparativa realizada para los sistemas híbridos con gas natural y biogás las conclusiones son las siguientes:

Del análisis anterior de potencial de utilización, la energía suministrada por el sistema híbrido con biogás es superior al de gas natural, debido a la limitación impuesta por la legislación. Se realiza el análisis, pues, por kWh de energía producida, al igual que en los casos anteriores, con el fin de evaluar la carga ambiental por unidad de energía. Cabe señalar que el impacto medioambiental en este caso se refiere fundamentalmente al consumo de combustible, ya que el impacto de la instalación en sí misma es muy inferior al impacto de este consumo.

- Se obtiene una evaluación ambiental muy similar utilizando el análisis de inventario o la evaluación de impacto. En el caso del análisis de inventario los valores obtenidos son de 265 g-CO<sub>2</sub>-eq/kWh para el biogás y de 410 g-CO<sub>2</sub>-eq/kWh, y en el caso de evaluación de impacto 21.6 Pt/kWh para el biogás y 43.5 Pt/kWh para el gas natural. Es decir, con ambas evaluaciones el impacto de la utilización del sistema híbrido con gas natural prácticamente duplica el de la instalación con biogás. Esto unido al incremento de capacidad que muestra la instalación en el caso de hibridación con biogás, inclina claramente la balanza hacia este tipo de hibridación.

## 6.4.2 Interpretación de resultados

El principal objetivo de la aplicación del ACV en la presente tesis es establecer comparaciones con criterios medioambientales. Por una parte para evaluar el potencial de la tecnología de disco Stirling frente a su potencial directa competidora, la fotovoltaica. Por otra parte para analizar alternativas de hibridación en el sistema, mediante la adición del consumo de dos combustibles diferentes por su naturaleza, de origen fósil y renovable.

Se ha utilizado un método de evaluación de impacto de punto final, como es el Eco-indicador 99, con el fin de poder establecer una comparativa en base a un indicador único. Este método es, como se ha introducido anteriormente, aceptado ampliamente para la realización de ACV. La selección de este método lleva implícita la elección de una perspectiva, de la que se ha seleccionado también la más generalmente aceptada, la jerárquica.

La conclusión de los resultados de la aplicación de esta metodología resulta en una valoración medioambiental semejante entre el sistema de disco Stirling y el sistema fotovoltaico elegido de

referencia. Por supuesto, cabría valorar la potencial evolución de ambos sistemas. En el caso de estudio, se han analizado modificaciones exclusivamente para el disco Stirling, con el fin de concretar los aspectos que podrían inclinar la balanza comparativa de forma favorable para dicho sistema. Estos aspectos se basan en dos elementos constructivos que podrían optimizarse: la cantidad de hormigón utilizada en la base y el peso de la estructura de soporte. En todo caso, los resultados son de magnitud similar y por lo tanto puede entenderse que son dos tecnologías semejantes desde el punto de vista medioambiental.

Sí cabría preguntarse la diferencia entre ambas tecnologías en caso de interesar un aspecto concreto de impacto medioambiental. En este caso, habría que analizar en profundidad la cadena de cálculo en el aspecto concreto con el fin de detectar el origen del mismo. Para esta evaluación se considera que sería mejor analizar las categorías de impacto, ya que son más fácilmente comprensibles y tienen una relación directa con el análisis de inventario. No es el objeto de la presente tesis profundizar en estos aspectos, pero sí cabe reflexionar sobre la implicación en aspectos particulares. En concreto, en la comparación entre el sistema de disco Stirling y el sistema fotovoltaico, en el método Eco-indicador 99 se muestran como más importantes la salud humana y los recursos, lo que proviene del impacto de las categorías de impacto siguientes: cancerígenos, inorgánicos respirados, minerales y combustibles fósiles. En este caso, la eco-toxicidad muestra un impacto bajo (aunque no despreciable) respecto al resto de categorías de impacto. En cambio, en la aplicación del método CML 2, la normalización de las categorías de impacto muestra un valor significativamente mayor para el caso de eco-toxicidad acuática marina. Esto se debe a la diferencia en selección de criterios medioambientales, de ahí la importancia de consensuar los aspectos de interés para un análisis más detallado.

En cuanto a la aplicación de la hibridación, la diferencia viene dada por la naturaleza de los dos combustibles considerados: gas natural, de origen fósil, y biogás, de origen renovable. Las instalaciones para la utilización de ambos combustibles son semejantes, por lo tanto, la conclusión del análisis medioambiental viene dado exclusivamente por el combustible. Como era previsible, el impacto es menor para la utilización del biogás. Con la legislación actual, además la instalación hibridada con este combustible presenta mayor capacidad, ya que el límite para la utilización porcentual del combustible es mayor. En todo caso, si la legislación fuese modificada, seguiría siendo más óptimo desde el punto de vista medioambiental la hibridación con biogás. Una línea potencial de trabajo sería la producción simultánea de biogás en la propia instalación.





## CONCLUSIONES

*En este apartado se presenta una síntesis de los resultados obtenidos durante la realización de la presente tesis, así como las aportaciones que dichos resultados han permitido alcanzar.*

Al igual que el propio nombre de la tesis indica, las conclusiones tratan sobre las perspectivas de desarrollo de la tecnología, incidiendo sobre los aspectos operativos y de diseño, en especial para un sistema híbrido de generación eléctrica de disco Stirling. El análisis medioambiental permite además valorar el interés de dicho desarrollo frente a otras tecnologías de energías renovables con condiciones de implementación similares.

Esta tesis pretende sentar las bases para analizar el potencial de la tecnología de disco Stirling. Ahora bien, existen aspectos no abarcados por la misma, especialmente debido a la no disponibilidad de análisis sobre una instalación en particular. La optimización de una instalación específica es uno de los puntos que se señalan, entre otros, relativos a las perspectivas futuras para la continuación del trabajo desarrollado.

## 7.1 Síntesis

Como paso previo a analizar las perspectivas de desarrollo de la tecnología, se ha realizado una búsqueda exhaustiva sobre el **estado del arte**, tanto para conocer las actividades de investigación como el estado de implementación. En este sentido, se ha identificado que las principales líneas de investigación se centran en la aplicación de la hibridación con la aplicación de un quemador con el fin de mejorar la operación del sistema. Sin embargo, no se han encontrado trabajos que valoren de forma cuantitativa esta ganancia en operación teniendo en cuenta las limitaciones impuestas por las regulaciones. Si existen, en cambio, informaciones relativas al diseño del receptor híbrido, uno de los componentes fundamentales del sistema debido a la complejidad de recibir alternativa o complementariamente la energía solar y la energía procedente de la combustión. Aunque los proyectos asociados al diseño del receptor híbrido no cubren otros componentes auxiliares al sistema de hibridación. Así, la primera conclusión del estudio del estado del arte ha sido centrar el desarrollo de la tesis sobre estos dos aspectos, que se detallan en el análisis de operación del sistema híbrido y en alternativas para el pre-diseño de dicho sistema.

En el estado del arte también se registran los casos de implementación. Aunque hasta ahora esta tecnología se ha utilizado básicamente en fase de demostración, se están construyendo instalaciones a nivel industrial (hasta 75 MWe). De la información analizada, se han identificado cuatro compañías que suministran estos sistemas comercialmente. Es particularmente interesante el desarrollo que se está realizando en EEUU e Israel. El apoyo a las tecnologías termosolares en estos países podría deberse a una estrategia estatal para su independencia energética.

Por otra parte, se ha querido incidir en la evaluación medioambiental de la tecnología. Debido a que es difícil defender el interés económico para la dotación de recursos en investigación y desarrollo para las energías renovables en el entorno actual, se pretende defender el interés de la tecnología en bases a criterios más amplios que la propia rentabilidad. Por supuesto, el objetivo final será que la tecnología sea competitiva, pero no será posible sin una inversión previa para su desarrollo, que puede apoyarse en una buena evaluación medioambiental. Por este motivo se ha realizado una búsqueda sobre los trabajos conocidos de evaluación ambiental. En este sentido, la información relacionada con el propio sistema de disco Stirling es muy limitada, lo que justifica la aplicación de esta evaluación en la presente tesis. En todo caso, la revisión de la información disponible ha permitido analizar los métodos utilizados para la evaluación energética, así como valores de referencia de los indicadores para su posterior comparación con la evaluación realizada.

En cuanto al **análisis de operación**, la aplicación de la hibridación presenta claras ventajas. Conocida la limitación de regulación para la utilización de hibridación en instalaciones solares en España, se ha valorado la utilización de dos combustibles gaseosos: gas natural y biogás. La principal ventaja se valora en la utilización media por día, que es de 6 horas para hibridación con gas natural y 10.5 horas para hibridación con biogás, frente a las 4.9 horas del funcionamiento solo solar. El hecho de que la regulación permita una mayor proporción para el consumo del biogás hace que se ponga de manifiesto el interés de la utilización de este combustible para determinar el factor de utilización de la instalación, que está relacionado con la recuperación de la inversión para la fabricación de la instalación. Aún con esta ventaja, el factor de capacidad, entendido como la energía de salida frente a la máxima alcanzable por el sistema funcionando las 24 horas, es del 40%. Es decir, si las limitaciones para la aplicación de hibridación se relajasen podrían mejorarse aún más las condiciones operativas. En el análisis de operación, se ha considerado también la potencial aplicación de almacenamiento térmico, introducida también en el estudio del arte previo. Sin embargo, la limitación asociada a la colocación del sistema de almacenamiento sobre el sistema hace que la capacidad de aprovechamiento sea residual.

En el capítulo de **prediseño del sistema hibridado**, se han analizado diferentes aspectos a tener en cuenta para la definición de los principales componentes a implementar: receptor, quemador y pre-calentador de aire. El diseño debería hacerse sobre una instalación concreta, así que, en este caso, se han establecido las líneas a seguir para realizar este trabajo de detalle, tomando como referencia una instalación determinada. En cuanto al receptor, se propone una superficie difusora a integrar en la cavidad solar, que podría adoptar diferentes formas en función del diseño del quemador. La superficie de la zona de receptor para energía de combustión y la del quemador se calculan en base a la instalación de referencia seleccionada, conociendo los criterios de diseño del quemador. También para el pre-calentador se realiza un dimensionamiento tipo, basado en el diseño de intercambiadores de calor.

Para la **evaluación medioambiental** se ha utilizado el Análisis de Ciclo de Vida. En el estado del arte se ha identificado que la mayor parte de comparaciones se basan exclusivamente en los gramos de CO<sub>2</sub> emitidos por las tecnologías. Sin embargo, el Análisis de Ciclo de Vida añade una perspectiva más amplia para el análisis, y más rigurosa, ya que tiene en cuenta muchos más aspectos. Las emisiones de CO<sub>2</sub> se han utilizado para evaluar el rango respecto a estudios anteriores. El principal objetivo de la aplicación del ACV en esta tesis es la realización de una evaluación comparativa. El fin es determinar cuál es el impacto medioambiental de esta tecnología frente a su más directa competidora, la fotovoltaica, en condiciones de instalación similares, así como evaluar las alternativas de hibridación. El análisis, tanto de emisiones de CO<sub>2</sub> como de los indicadores propios de la aplicación del ACV, muestra un nivel similar con respecto a un sistema fotovoltaico. En la comparativa entre las alternativas de hibridación, se muestra como más favorable medioambientalmente la utilización de biogás.

## 7.2 Contribución

Las contribuciones más significativas del trabajo realizado se detallan a continuación:

- Recopilación de información con el fin de tener una perspectiva lo más amplia posible del estado de desarrollo de la tecnología. Se ha identificado que hay información disponible, pero no hay compendios actualizados del estado del arte. Esta parte del trabajo ha quedado reflejada en la publicación de un artículo en una revista científica [142], intentado facilitar futuras búsquedas de investigadores en relación especialmente a la hibridación del sistema de disco Stirling.
- Introducción del análisis de operación para valoración de ganancia de hibridación. El programa utilizado podría implementarse para otras instalaciones y con otros condicionantes de utilización con el fin de detallar el funcionamiento de la instalación en base a unas condiciones meteorológicas determinadas. Las ganancias asociadas a la hibridación han sido difundidas [143], estableciendo una base para futuras evaluaciones. Dado el interés de esta fuente auxiliar de energía, cabe preguntarse por la posible integración con otras energías renovables, tales como la biomasa, donde el potencial de aprovechamiento es mayor. La aplicación de la tecnología de disco Stirling para generación distribuida en instalaciones donde el biogás esté disponible puede presentar el mayor potencial.
- Criterios de diseño para los elementos adicionales del sistema híbrido, en particular sienta las bases para la definición del quemador y el receptor híbrido.
- Utilización de la evaluación medioambiental mediante el ACV para determinar el interés de la tecnología. Esto es de utilidad para enfatizar el desarrollo necesario, principalmente para organismos de investigación e instituciones públicas, que impulsen la investigación necesaria para la futura industrialización. En particular, en España, para el desarrollo de empresas en el sector de la energía renovable solar. Se considera relevante haber realizado la primera publicación conocida de evaluación de ACV de la instalación de disco Stirling [144], y concretamente en comparación con la tecnología fotovoltaica para generación distribuida. Así, se difunde el potencial de la tecnología de disco Stirling, lo que pone de manifiesto el interés en su desarrollo. También la hibridación muestra un alto interés medioambiental con la integración de la utilización de biogás.

## 7.3 Perspectivas futuras

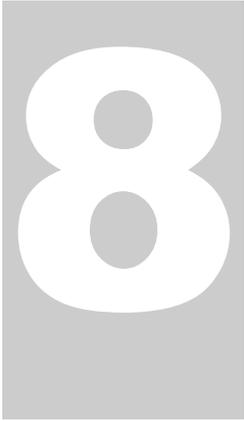
La continuación deseable para el trabajo desarrollo sería la aplicación de la metodología de análisis a una instalación física, disponiendo de toda la información necesaria. Esto significaría realizar la validación de esta metodología sobre una instalación de demostración con registro de los factores de operación y la implementación de elementos de hibridación diseñados de acuerdo a los criterios referidos.

Además, a la evaluación medioambiental realizada debería añadirse la evaluación económica, tanto para la inversión necesaria para la instalación como para la operación y mantenimiento. Sería necesario para definir las líneas de optimización que podrían hacer esta tecnología competitiva respecto a otras. Esto es particularmente importante dado la evolución prevista de reducción de costes en la industria fotovoltaica. Para esto, sería necesario disponer de datos de fabricación industrial de los componentes del disco Stirling. En este sentido, se propondría una instalación de demostración en la universidad de Zaragoza, trabajando conjuntamente con una empresa, preferiblemente española, para situar a nuestro país como un actor importante en el desarrollo de energías renovables, papel que está perdiendo debido a la situación actual. Para la definición de los componentes, se propondría trabajar para la definición serie con proveedores del sector de automoción, bien establecido en España, con el fin de aprovechar los medios productivos y los precios competitivos de este sector.

Otro aspecto que podría analizarse es la utilización de la tecnología para plantas de producción eléctrica a media y gran escala, aparte del caso de generación distribuida analizado en la presente tesis. Los criterios de optimización podrían ser diferentes, especialmente en lo relativo a la hibridación. Una posibilidad a explorar sería la producción del biogás en la propia instalación.

Hay muchos puntos abiertos e incertidumbres acerca de la evolución de esta tecnología que, aunque prometedora, tiene una gran desventaja respecto a su competencia en cuanto a grado de desarrollo. Será necesaria una vigilancia del mercado energético para analizar cómo evolucionan las aplicaciones proyectadas en la actualidad. Si estas instalaciones se demostraran como una alternativa interesante dentro del panorama energético global, el paso a la aplicación de la hibridación sería una siguiente fase del desarrollo





## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Greenpeace. *Energía Solar Térmica de Concentración*. Perspectiva mundial 2009.
- [2] Romero M., *Energía Solar Termoeléctrica*. Jornadas sobre la energía: “La energía de mañana”, Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Girona, octubre 2008.
- [3] CSP Today Global Tracker / Project tracker. <http://social.csptoday.com/tracker/projects> (acceso Marzo 2013)
- [4] Fraser P., *Stirling Dish System Performance Prediction Model*. Thesis submitted to University of Wisconsin-Madison, 2008.
- [5] Real Decreto 661/2007, 2007. Por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. <http://www.boe.es/boe/dias/2007/05/26/pdfs/A22846-22886.pdf>
- [6] Silvi C., *The work of italian solar energy pioneer Giovanni Francia (1911-1980)*, Proceedings Solar World Congress ISES, Orlando, USA, 6-12 agosto 2005.
- [7] Mouchot A., *La chaleur solaire et ses applications industrielles*. Albert Blanchar, Paris, 1980.
- [8] Nepveu F., *Production décentralisée d’électricité et de chaleur par système Parabole/Stirling :Application au système EURODISH*. Tesis Universidad de Perpignan, 2008.
- [9] National Renewable Energy Laboratory. *Cost and Performance Data for Power Generation Technologies*. February 2012.
- [10] Renewable Energy Cost Database. Excel file downloaded: “renewable cost data”. U.S. Environmental Protection Agency (acceso Marzo 2013)
- [11] BNEF. *Re-considering the Economics of Photovoltaic Power*. 2012.
- [12] CSP Today. *Spain’s Government “devastates the CSP sector*, 4 Febrero 2013.
- [13] Gener A., *Análisis de la tecnología solar de Discos Stirling: diseño y desarrollo de un dispositivo de 25kWe implementando una metodología de decisión en I+D+i*. Proyecto Fin de Carrera ETSII Universidad Politécnica de Madrid, Abril 2008.
- [14] Pitz-Paal R., Dersch J., Millow B., ECOSTAR Roadmap Document, Ed DLR, SES6-CT-2003-502578, 2005, <ftp://ftp.dlr.de/ecostar>
- [15] G. Knies (ed.), *Clean Power from Deserts – The Desertec Concept for Energy, Water and Climate Security*, Whitebook 4th Ed., DESERTEC Foundation, Hamburg, 2009, [www.desertec.org](http://www.desertec.org)
- [16] A. FERRIERE, *Les centrales solaires thermodynamiques*. PROMES-CNRS, 2006
- [17] DeMeo E.A., Galdo J.F. (1997), *Renewable Energy Technology Characterizations*, TR-109496 Topical Report, December 1997, U.S. DOE-Washington and EPRI, Palo Alto, California.
- [18] Enermodal Engineering Ltd. (1999). *Cost Reduction Study for Solar Thermal Power Plants. Final Report*. Prepared by Enermodal Engineering Ltd. in association with Marbek Resource Consultants Ltd., by contract of World Bank/GEF, Washington D.C., May 5, 1999.
- [19] REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> century). *Renewables Global Futures Report*, 2013.
- [20] Andraka C.E., *Dish Stirling development for utility-scale commercialisation*. Proceeding of the 14th SolarPACES International Symposium, Las Vegas, USA, Mars 2008
- [21] Ruiz-Hernández V., Silva-Pérez M.A., Lillo-Bravo I. (2009). *La electricidad solar térmica, tan lejos, tan cerca*. Fundación Gas Natural. ISBN: 978-84-613-0406-6.
- [22] CSP Today. *El disco Stirling contraataca*, 15 de Febrero de 2013.
- [23] U.S.\_Department\_of\_Energy. [http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/csp\\_storage\\_infinia.html](http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/csp_storage_infinia.html) (acceso Marzo 2013)
- [24] Pasculete E., Stanoui L., Macavescu M. (2001). *Experimental results at PSA facilities. Estimation of implementing dish/Stirling system in Romania. HIP Programme*. SC OVM-ICCPET SA.

- [25] Bravo Y., *Sistemas de generación tecnología disco-Stirling: revisión de estado del arte y análisis de ciclo de vida*. 6º Workshop de Tecnologías de Climatización y Eficiencia Energética en Edificios. E.T.S.I.Q. Tarragona, 2010.
- [26] Reinalter W., Ulmer S., Heller P., Rauch T., Gineste J.M., Ferriere A., Nepveu F., 2006. *Detailed performance analysis of the 10-kW CNRS-PROMES dish/Stirling system*. SolarPACES2006 A7-S7.
- [27] IEA\_SolarPACES. 2007. [http://www.solarpaces.org/CSP\\_Technology/docs/solar\\_dish.pdf](http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solar_dish.pdf).
- [28] Infinia. <http://www.infiniacorp.com/es/> (acceso Marzo 2013)
- [29] Brignoli V. (2001). *Progress in the European dish Stirling technology*. The Eurodish project. Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano (CESI).
- [30] Cleanergy AB. <http://www.cleanergy.com/> (acceso Marzo 2013)
- [31] Stine WB, Diver RB. (1994). *A compendium of solar Dish/Stirling technology*. Sandia National Laboratories.
- [32] Manzini T., Heller P., Butler B., Osborn B., Schiel W., Goldberg V., Buck R., Diver R., Andracka C., Moreno J. (2003). *Dish-Stirling Systems: An Overview of Development and Status*. Journal of Solar Energy Engineering, Volume 125, Issue 2, 135.
- [33] Innova. <http://www.innova.co.it/eng/> (acceso Marzo 2013)
- [34] HelioFocus. <http://www.heliofocus.com/category/parabolic-dish> (acceso Marzo 2013)
- [35] Proyecto Eureka 5833 Morenergy <http://www.eurekanetwork.org/project/-/id/5833> (acceso Julio 2013)
- [36] <http://www.erasolar.es/BEraSolarNet/?p=5778#sthash.H5b7X6E2.dpuf> (acceso Junio 2013)
- [37] BIOSTIRLING Project. *A cost effective and efficient approach for a new generation of Solar Dish-Stirling Plants based on storage and hybridization*. FP7-ENERGY-2012-1 / ENERGY.2012.2.5-1: Research, development and testing of solar dish systems.
- [38] Renovalia Energy. <http://www.renovalia.com/energia-termosolar-electrica/> (acceso Marzo 2013)
- [39] Cabrera J.A., Cuesta M.J., Pérez M, 2006. *Energía solar térmica de concentración. Estado actual actores del sector*. Informe Prospectiva y Vigilancia Tecnológica CIEMAT.
- [40] Williamson K., *Stirling Energy caves in against PV's falling costs*. Renewable Energy Focus. <http://www.renewableenergyfocus.com>. Octubre 2011.
- [41] United Sun Systems. <http://www.unitedsunsystems.com/> (acceso Marzo 2013)
- [42] Burch G.D., 2001. *Hybrid Renewable Energy Systems*. U.S. DOE Natural Gas / Renewable Energy Workshops.
- [43] Solar Thermal Repowering, 1980. Sandia National Laboratories & San Francisco Operations Office.
- [44] Puertas Agudo J., 2009. *Hibridación con gas natural*. Documento presentación Gas Natural (búsqueda Google).
- [45] 2010. *Energía solar termoeléctrica y biomasa: hibridación y apoyo con gas natural*. Socoin / Unión FENOSA.
- [46] Deshmukha M.K., Deshmukhb S.S., 2006. *Modelling of hybrid renewable energy systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [47] Pérez-Navarro A., Alfonso D., Álvarez C., Ibáñez F., Sánchez C., Segura I., 2010. *Hybrid biomass-wind power plant for reliable energy generation*. Renewable Energy.
- [48] Nema P., Nemab R.K., Rangnekar S., 2009, *A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [49] Cullen B., McGovern J., 2010, *Energy system feasibility study of an Otto cycle / Stirling cycle hybrid automotive engine*. Energy.
- [50] Sánchez D., Chacartegui R., Torres M., Sánchez T., 2009, *Stirling based fuel cell hybrid systems: An alternative for molten carbonate fuel cells*. Journal of Power Sources.

- [51] Ernest, W.D., 1992, *Stirling engines for hybrid electric vehicle applications*. Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, v3, p3. 167-3.177. Conversion Technologies – Electrochemical Conversions.
- [52] Eyer J., Iannucci J., 1999, *Market potential for distributed solar dish-stirling power plants operated in solar-only and solar/natural gas hybrid modes*. Power Engineering Review.
- [53] Mayette J.B., Davenport R.L., Forristall R.E., 2001, *The Salt River Project Sundish Dish-Stirling System*. Proceeding of Solar Forum 2001, Solar Energy: The Power to Choose. April 21-25 2001, Washington DC.
- [54] Laing D., Reusch M., 2001, *Hybrid sodium heat pipe receiver for dish/Stirling systems – design and test results*.
- [55] Laing D., Palsson M., 2002, *Hybrid dish/Stirling Systems: Combustor and Heat Pipe Receiver Development*. Journal of Solar Energy Engineering.
- [56] Moreno, J., Rawlinson, K., Andraka, C., Mehos, M., Bohn, M., Corey, J., 1999. *Dish/stirling hybrid receiver sub-scale tests and full-scale design*. Proceedings of the 34th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference.
- [57] Baukal C.E., 2004. *Industrial burners. Handbook*. CRC Press. ISBN 0-8493-1386-4
- [58] Cheng R.K., Yegian D.T., Miyasato M.M., Samuelsen G.S., Benson C.E., Pillizzari R., Loftus P., 2000. *Scaling and development of low-swirl burners for low-emission furnaces and boilers*. Proceedings of the Combustion Institute, Volume 28, 2000/pp. 1305-1313.
- [59] National Renewable Energy Lab, United States, 1998 *Application of radiant burner technology to hybrid dish/Stirling systems*. International Solar Energy Conference, p 87-92, Solar Engineering.
- [60] Rentech Inc, 1999. *Burner supplements solar Stirling output*. Power Engineering, v103, n5, p 46-48, 1999.
- [61] Corria M.E., Melian-Cobasa V., Silva-Lora E., 2005. *Perspectives of Stirling engines use for distributed generation in Brazil*. Energy Policy.
- [62] Podesser E., Bayera H., 2000. *Application and Economy of Biomass Stirling Engines in Austria*. World Renewable Energy Congress VI Renewables: The Energy for the 21<sup>st</sup> Century.
- [63] Podesser E., 1999. *Electricity production in rural villages with a biomass Stirling engine*. Renewable Energy.
- [64] Percival, W., Wells, D., 1986. *Hybrid solar/combustion powered receiver*. Patente norteamericana US4602614.
- [65] Bohn Mark S., Corey J., Andraka C.E., Moreno J.B., Rawlinson K.S., Mehos M., Anselmo K., 2002. *Dish/stirling hybrid-receiver*. Patente norteamericana US2002059798.
- [66] Nuñez Bootello J.P., Sosa Naranjo C., Monne Bailo C.M., Moreno Gómez F., Muñoz Rodríguez M., 2011. *Receptor cóncavo para disco Stirling y método de fabricación*. Patente internacional WO2011/151488.
- [67] Nuñez Bootello J.P., Sosa Naranjo C., Monne Bailo C.M., Moreno Gómez F., Muñoz Rodríguez M., 2012. *Receptor solar de serpentín para disco Stirling y el método de fabricación*. Patente internacional WO2012/001183.
- [68] Asselmana G.A., 1975-2003. *Thermal energy storage unit based on lithium fluoride*. Energy Conversion.
- [69] London A.L., Shah R.K., Kraus A.D., 1990. *Compact heat exchangers: a festschrift for A.L. London*.
- [70] Wiersea M., Wernera R., Grollb M., 2007. *Magnesium hybride for thermal energy storage in a small-scale solar-thermal power station*. Journal of the Less Common Metals.
- [71] Weaver S.P., 2009. *Solar thermal storage features enhance low temperature heat to electricity conversion Stirling engine*. Clean Technology Conference & Expo 2009.

- [72] Gil A., Medrano M., Martorell I., Lázaro A., Dolado P., Zalba B. Cabeza L.F., 2010. *State of the art on high temperatura termal energy storage for power generation. Concepts, materials and modellization*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 31-55.
- [73] Qiu, S., White M., Yarger D., Galbraith R., 2010. *Thermal energy storage device*. Patente mundial WO2010006319.
- [74] U.S. Department of Energy, Sunshot Initiative, 2012. [http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/csp\\_storage\\_infinia.html](http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/csp_storage_infinia.html) (acceso Enero 2014)
- [75] Sölch, R., 2008. *Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen (Engine based on Stirling hot air engine or steam engine, employs known heater type selected in accordance with solar, combustor or thermal accumulator energy source employed)*. Patente alemana DE102006061509.
- [76] Technology Roadmap / Solar photovoltaic energy, (2010). International Energy Agency.
- [77] Varun, Bhat I.K., Prakash R. (2009). *LCA of renewable energy for electricity generation systems – A review*. Journal: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13 (2009) 1067-1073.
- [78] Mohr N., Meijer A., Huijbregts M.A.J., Reijnders L. (2009). *Environmental impact of thin-film GaInP/GaAs and multicrystalline silicon solar modules*.
- [79] Stopatto A. (2008). *Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation*. Journal: Energy 33 (2008) 224-232.
- [80] Alsema E.A., Wild-Scholten M.J., Fthenakis V.M. (2006). *Environmental impacts of PV electricity generation – A critical comparison of energy supply options*. Presented at the 21<sup>st</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Desdren, Germany, 4-8 September 2006.
- [81] Kannan R., Leong K.C., Osman R., Ho H.K., Tso C.P. (2006). *Life cycle assessment study of solar PV systems: An example of a 2.7 kWp distributed solar PV system in Singapore*.
- [82] Fthenakis V.M., Kim H.C. (2010). *Photovoltaics: Life-cycle analyses*. Solar Energy (Article in press).
- [83] Cavallaro F., Ciraolo L (2006). *A Life Cycle Assessment (LCA ) of a Paraboloidal-Dish Solar Thermal Power Generation System*.
- [84] Quintana J.L., Monné C., *Análisis del potencial de aplicación de nuevas tecnologías en sistemas de captación solar térmica*. Proyecto Fin de Carrera / Universidad de Zaragoza. 2011.
- [85] Ara C., Monné C., *Análisis de viabilidad de tecnologías de apoyo energético para sistemas de disco Stirling*. Proyecto Fin de Carrera / Universidad de Zaragoza. 2011.
- [86] Real Decreto 661/2007, 2007. Por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. <http://www.boe.es/boe/dias/2007/05/26/pdfs/A22846-22886.pdf>
- [87] Vant-Hull, L.L., *Methods for estimating total flux in direct solar beam at any time*, Vol I, Proceedings of the sharing the sun solar technologies in the seventies joint conference of the International Solar Energy Society, Solar Energy Societe of Canada, 1976.
- [88] C.Rigollier, O.Bauer, L.Wald: *On the clear sky model of the ESRA (European solar radiation atlas) with respect to the heliostat method*, Solar energy vol.68, 2000
- [89] V.Passamai: *Determinación de radiación solar horaria para días claros mediante planilla de cálculo*, INENCO (Instituto de Investigación en Energías No Convencionales), 2001
- [90] C.Sánchez, D.P.Castillo, I.Mendoza: *Validation and adjustment of direct solar radiation models for the city of Bogota, from experimental data taken in the Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2000

- [91] R.Chen, E.Kang, X.Ji, J.Yang, J.Wang: *An hourly solar radiation model under actual weather and terrain conditions: A case study in Heihe river basin*, Elsevier Energy n°32, 2007
- [92] J.I.Díaz, M.Poncela, S.Sanz, J.M.Bernárdez: *Tratamiento de datos meteorológicos para instalaciones de energía solar*, CARTIF (Centro de Automatización, Robótica y Tecnologías de la Información y la Fabricación), 2002
- [93] *Eurodish-Stirling*, (GTER) Grupo de Termodinámica y Energías Renovables de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.
- [94] Geyer A, Holländer A, Aringhoff R, Nava P. *Hälfte des weltweit produzierten Solarstroms. Sonnenenergie*, 1998.
- [95] Mohr M, Svoboda P, Unger H. *Praxis solarthermischer Kraftwerke*. Springer-Verlag, 1999.
- [96] Infinia. <http://www.infiniacorp.com/es/soluciones/preguntas-mas-frecuentes/> (Septiembre 2013)
- [97] Siva Reddy V., Kaushik S.C., Tyagi S.K., 2013. *Exergetic analysis and performance evaluation of parabolic dish Stirling engine solar power plant*. International Journal of Energy Research. Volume 37, Issue 11, pages 1287–1301, September 2013
- [98] PCM Products Ltd. Product catalogue. Encapsulated solutions, 2009. <http://www.pcmproducts.net/>
- [99] AENOR: UNE 60002:1995 *Clasificación de los combustibles gaseosos en familias*. AEN/CTN 60 – Combustibles gaseosos e instalaciones y aparatos de gas, 1995.
- [100] Bravo, Y.; Monné, C.; Quintana, J.L.; Bernal, N.; Carvalho, M.; Alonso, S.; Moreno, F.; Muñoz, M.: *Hybridization applied to solar dish Stirling technology: analysis and design*. SuNEC 2012. Sun New Energy Conference. Sicily (Italy), 2012.
- [101] Quintana J.L., Monné C. *Opciones de desarrollo para un receptor híbrido en sistemas disco-Stirling*. Trabajo Fin Máster / Universidad de Zaragoza. 2012.
- [102] Reinalter, W.; Ulmer, S.; Heller, P.; Gineste, J.M.; Ferriere, A.; Nepveu, F.: *Detailed performance analysis of a 10 kW Dish Stirling system*, German Aerospace center and CNRS-PROMES laboratory report, 2008.
- [103] Bravo Y., *Sistemas de generación tecnología disco-Stirling: revisión de estado del arte y análisis de ciclo de vida*. 6° Workshop de Tecnologías de Climatización y Eficiencia Energética en Edificios. E.T.S.I.Q. Tarragona, 2010.
- [104] Andraka C.E., Moreno J.B., Rawlinson K.S., Moss T.A., Diver R.B., Cordeiro P.G., *Heat Pipe Receiver Development Progress*, SANDIA presentation (no data available)
- [105] Baukal, C.E.: *Industrial burners handbook*. CRC Press LLC, 2003.
- [106] Hargreaves, C.M.: *The Philips stirling engine*. Elsevier Science Publishers, 1991.
- [107] Infinia Corporation. Applications. MicroCHP, 2012. <http://www.infiniacorp.com/>
- [108] Microgen Engine Corporation: Applications. The microCHP appliance, 2012. <http://www.microgen-engine.com/>
- [109] BAXI: Baxi Products. Combined heat and power (CHP). Baxi ecogen - Free piston stirling engine, 2012. <http://www.baxi.co.uk/>
- [110] Polidoro Combustion systems: Metal fibre burners. Commercial catalogue, 2012.
- [111] Worgas, 2013. <http://www.worgas.com/prodotti.html?pr=cs>
- [112] Qnergy, 2013. <http://www.qnergy.com/-overview>
- [113] Worgas bruciatori srl.: DS 5 Joint development design: hybridization. Radiant burners. I session. Mostra Convegno Expocomfort (Milan, Italy) minutes meeting, 2012.
- [114] Viessmann: *Calefacción respetuosa con el medio ambiente a través de una innovadora técnica de quemadores*. Serie técnica. Técnicas de combustión para la reducción de las emisiones contaminantes, 2001.
- [115] Orkli: *A new dimensión in ceramat gas burners media*. Commercial catalogue, 2012.
- [116] Alzeta Corporation: Our product. DurathermTM, 2012. <http://www.alzeta.com/>
- [117] ROCA Radiadores: Calderas murales. Tecnología, clasificación, funcionamiento y reglamentación. Cursos de formación ROCA. Documentación, 1999.

- [118] Junkers. Bosch Thermotechnik: Guía del instalador de gas. Vademécum para el diseño de instalaciones. Cursos de formación Robert Bosch España. Documentación, 1998.
- [119] Fraser, P.R.: *Stirling dish system performance prediction model*. MSc thesis. Mechanical engineering department. University of Wisconsin-Madison, 2008.
- [120] Nepveu, F.: *Production décentralisée et de chaleur par système Parabole/Stirling: Application au système EURODISH*. MSc thesis. Université de Perpignan, 2008.
- [121] Bekaert: DS 5 Joint development design: hybridization. Radiant burners. II session. Mostra Convegno Expocomfort (Milan, Italy) minutes meeting, 2012.
- [122] Bravo Y., Luján J.M., Tiseira A., *Analysis of EGR Cooler Response for a Range of Engine Operation Conditions*, SAE 2013-01-1717. SAE congress, Detroit, April 2013.
- [123] Robinson Fin Machine Inc. Product. Plain fin & Ruffled/Herringbone fin. <http://www.robfin.com>. Acceso en Mayo 2013.
- [124] González, J.I.: *Determinación de las ecuaciones y desarrollo del programa de cálculo de transferencia de calor y pérdida de carga en intercambiadores para MACI*. Proyecto Final de Carrera. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza, 2011.
- [125] GRETh. Groupement pour la recherché sur les échangeurs termiques: TM14. Transfert de chaleur et pertes de pression dans les échangeurs a plaques et ailettes. Manuel technique, 1997.
- [126] Carvalho M. (2011). *Thermoeconomic and environmental analyses for the syntheis of polygeneration systems in the residential-commercial sector*. Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Mecánica, Centro Politécnico Superior, Universidad de Zaragoza (España).
- [127] Varun, Bhat I.K., Prakash R. (2009). *LCA of renewable energy for electricity generation systems – A review*. Journal: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13 (2009) 1067-1073.
- [128] Guinée J.B. (Ed.). (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards*. Kluwer Academic Publishers. ISBN 1-4020-0228-9 (HB) / 1-4040-0557-1 (PB).
- [129] Azapagic, A. (2002). *Life Cycle Assessment: A Tool for Identification of More Sustainable Products and Processes*, p62-85. In: Handbook of Green Chemistry and Technology (Clark, J. and D. Macquarrie, eds.), Blackwell Science, Oxford.
- [130] ISO 14040. *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, 2006.
- [131] Raluy-Rivera R.G. (2009). *Evaluación ambiental de la integración de procesos de producción de agua con sistemas de producción de energía*. Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Mecánica, Centro Politécnico Superior, Universidad de Zaragoza (España).
- [132] SIMAPRO - Life cycle assessment software. PRé Consultants. 2008.
- [133] Ecoinvent v2.2 Database. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, Switzerland, 2010.
- [134] Goedkoop M., Spriensma R. (2001). *The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment*. Methodology report. PRé Consultants (Product Ecology Consultants) B.V.
- [135] Cavallaro F., Ciraolo L (2006). *A Life Cycle Assessment (LCA ) of a Paraboloidal-Dish Solar Thermal Power Generation System*.
- [136] Fthenakis V.M., Kim H.C. (2010). *Photovoltaics: Life-cycle analyses*. Solar Energy.
- [137] EPA - U.S. Environmental Protection Agency. *Life cycle assessment: principles and practice*. Scientific Applications International Corporation (SAIC), 2006.
- [138] Stopatto A. (2008). *Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation*. Journal: Energy 33 (2008) 224-232. [52]
- [139] Guillot, 2009. Comunicación privada – instalación de disco Stirling Odiello (Francia)

- [140] Lucier A., Miner R., 2010. *Biomass Carbon Neutrality in the Context of Forest-based Fuels and Products*. National Council for Air and Stream Improvement (NCASI). May 2010. Available from the Society of American Foresters here: <http://www.eforester.org/fp/policy.cfm>
- [141] Senate, 2010 / Letter to Senate. July 2010. [http://www.safnet.org/documents/biomass\\_science\\_letter\\_SENATE7-20-10.pdf](http://www.safnet.org/documents/biomass_science_letter_SENATE7-20-10.pdf)
- [142] Monné C., Bravo Y., Alonso S., Moreno F., Muñoz M., *Developments for future implementation in Dish-Stirling technology*. Strojarstvo, Journal for Theory and Application in Mechanical Engineering, Vol. 55, N°1, Febrero 2013 / ISSN: 0562-1887.
- [143] Monné C., Bravo Y., Moreno F., Muñoz M., *Analysis of a Solar Dish Stirling System with Hybridization and Thermal Storage*. International Journal of Energy and Environmental Engineering / in phase of production (DOI: 10.1007/s40095-014-0080-x) / ISSN: 2008-9163 (print version), ISSN: 2251-6832 (electronic version)
- [144] Bravo Y., Carvalho M., Serra L. M., Monné C., Alonso S., Moreno F., Muñoz M., *Environmental evaluation of dish Stirling technology for power generation*. Solar Energy, Vol. 86, Issue 9, pág. 2811-2825 Septiembre 2012 / ISSN: 0038-092X
- [145] Bravo Y., Monné C., Bernal N., Carvalho M., Moreno F., Muñoz M., *Hybridization of Solar Dish Stirling Technology: Analysis and Design*. Environmental Progress & Sustainable Energy. Early view: Article first published online: 13 JAN 2014 | DOI: 10.1002/ep.11929 / ISSN: 1944-7450



**ANEXO:  
ECOINDICADOR 99  
CML2**

## Eco-indicador 99

### Introducción

La característica principal del Eco-indicador 99 es que se trata de un método de evaluación de impacto de punto final (“end-point method”). Esto significa que incluye un modelo de daño, de forma que las categorías de impacto intermedias, calculadas a partir del inventario y valoradas cada una en su unidad correspondiente, se agrupan en las llamadas categorías de daño. Además, en este método, cada una de éstas categorías de daño es adimensionalizada a una unidad común (punto Eco-indicador), de forma que esta adimensionalización permite comparar entre sí las categorías de daño que dependen de factores muy diversos, y también obtener una puntuación única para la valoración final del análisis de ciclo de vida de un producto. Esto se lleva a cabo en las fases de normalización y ponderación.

El modelo de daño se representa en la figura 1.

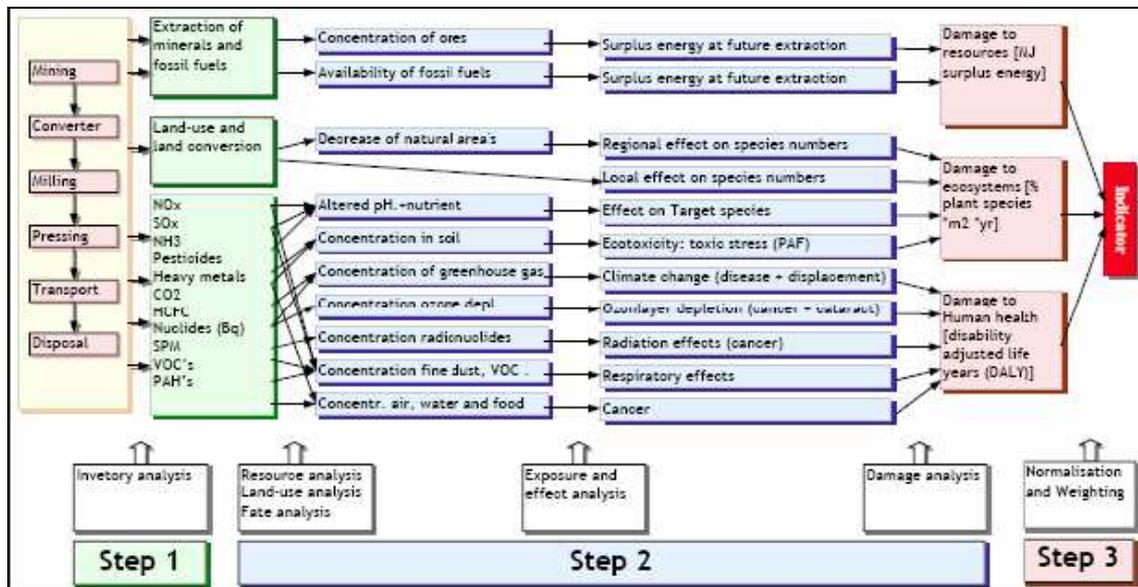


Figura 1 Representación detallada del modelo de daño [1]

En resumen, los datos del inventario se analizan mediante unos análisis de destino y de uso de la tierra, aplicando además un análisis de efectos y exposición, para calcular las categorías de impacto. Los modelos de daño permiten agrupar esta información en las categorías de daño. Finalmente, se procede a la normalización y ponderación, expresando las categorías en una unidad común (punto Eco-indicador) que permite su valoración final. La normalización y ponderación son fases no contempladas en la norma ISO 14000, que dependen de la perspectiva seleccionada, como se verá posteriormente.

## Antecedentes

El proyecto de creación de este método fue comisionado por el Dutch Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM), dentro del programa Integrated Product Policy. La consultora PRé Product Ecology Consultants lideró el proyecto, apoyada por una estructura de colaboración, que contó con expertos medioambientales del RIVM (National Institute of Public Health and the Environment) y expertos en análisis de ciclo de vida de diferentes organizaciones de Holanda y Suiza. El objetivo del proyecto fue desarrollar una actualización del método Eco-indicador 95, que fue uno de los primeros métodos desarrollados [1], previamente muy utilizado por los diseñadores de diversas compañías y organizaciones. Con respecto al Eco-indicador 99, el Eco-indicador 95 realiza un análisis que se basa fundamentalmente en las emisiones, pero no incluye conceptos como la disminución de las materias primas. Además, incluye elementos de valoración subjetivos para la cuantificación de los criterios en puntos, estableciendo como medida la distancia del valor hasta un valor objetivo (“Distance-to-Target”). Las ventajas del método desarrollado como Eco-indicador 99 se concretan en los siguientes aspectos:

- Mejora en la definición de las categorías de daño, y en el cálculo de las funciones asociadas. En el método Eco-indicador 95 se entendía que todas las curvas de daño eran lineales y partían del punto origen, estableciendo el valor en base a una valoración objetiva de distancia al objetivo. El Eco-indicador 99 las funciones de daño permiten calcular el daño producido para cada emisión o factor considerado.
- Inclusión del uso de la tierra como categoría de impacto.
- Inclusión del agotamiento de los recursos. El método Eco-indicador 95 sólo incluía como categorías de daño la salud humana y del ecosistema, calculados básicamente a través de valores de emisiones al aire y agua.
- Eliminación de la subjetividad que caracterizaba al Eco-indicador 95 en ciertos pasos de su análisis, a través de la inclusión de la Teoría de la Cultura como marco teórico, y utilizando métodos cualitativos y cuantitativos para el trabajo en términos operacionales y/o científicos.
- Descripción más detallada de los efectos e inclusión del análisis de destino, que, a través de los modelos de destino, establecen una relación entre el flujo de una sustancia y la concentración. Se utiliza para el cálculo de salud humana y del ecosistema.

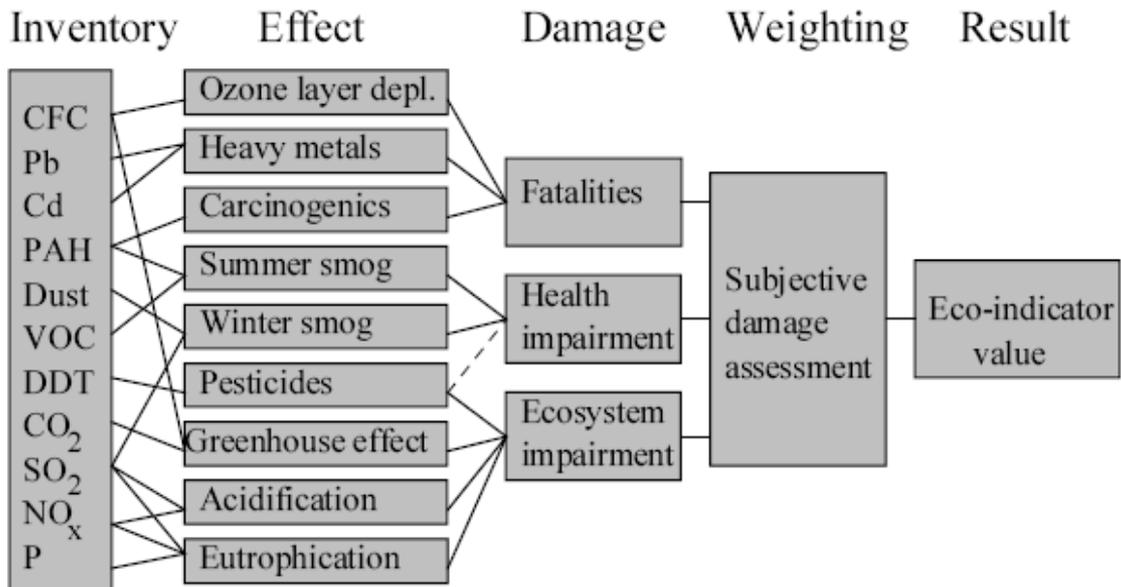


Figura 2 Representación gráfica de la metodología Eco-índice 95 [1]

### Explicación del método

En relación al enfoque sugerido en las normas ISO 14000, de abajo a arriba (“bottom-up”), el Eco-índice 99 toma el enfoque contrario, de arriba abajo (“top-down”). Esto significa que mientras en la ISO 14000 se propone el análisis de ciclo de vida como una interpretación de los resultados del inventario, en el Eco-índice 99 se comienza definiendo los resultados del análisis. De esta forma, se define cómo los diferentes problemas medioambientales se relacionan entre sí, y cómo se obtienen. Estos problemas medioambientales finales están representados por las categorías de daño, que se limitan a tres, de forma que se simplifica el proceso de ponderación entre ellos. Estas categorías de daño se calculan mediante funciones a partir de las categorías de impacto, que a su vez resultan del inventario. Las categorías de daño e impacto (con unidades) definidas son las siguientes:

#### Categorías de daño

- Salud humana (DALY)
- Calidad del ecosistema (PDF-m<sup>2</sup>yr)
- Recursos (MJ surplus)
- 

#### Categorías de impacto

- Cancerígenos (DALY)
- Orgánicos respirados (DALY)
- Inorgánicos respirados (DALY)
- Cambio climático (DALY)

- Radiación (DALY)
- Capa de ozono (DALY)
- Eco-toxicidad (PAF-m<sup>2</sup>yr)
- Acidificación / eutrofización (PDF-m<sup>2</sup>yr)
- Uso de la tierra (PDF-m<sup>2</sup>yr)
- Minerales (MJ surplus)
- Combustibles fósiles (MJ surplus)

Como se puede apreciar, cada una de estas categorías de impacto tiene sus propias unidades, de forma que cuando se combinan para calcular las categorías de daño, éstas quedan también con las unidades correspondientes. Posteriormente, y como se ha referido anteriormente, estas categorías de daño son expresadas en una unidad común: el punto Ecoindicador –Pt-. El valor de 1 punto Eco-indicador representa 1 centésima parte de la carga ambiental anual de un ciudadano europeo medio (número calculado dividiendo la carga ambiental total en Europa entre el número de habitantes). Se multiplica por 1000 como factor de escala. Esto se realiza en la fase de normalización que es dependiente de la perspectiva seleccionada.

Las perspectivas proceden del análisis realizado con la Teoría de la Cultura mencionada anteriormente. Según esta teoría, utilizada por varios autores para estudios de percepción de riesgos, la actitud de las personas puede clasificarse en cinco tipos: individualistas, igualitarios, jerárquicos, fatalistas y autonomistas. De estos, para el análisis realizado en el Eco-indicador 99 se utilizan los tres primeros, ya que los fatalistas tienden a no tener opiniones en cuanto a preferencias y los autonomistas son difíciles de predecir. Así, las perspectivas utilizadas pueden definirse de acuerdo a los siguientes criterios:

- Versión individualista (I): se incluyen sólo relaciones causa-efecto probadas, con la perspectiva a corto plazo. Los individualistas consideran cada límite como negociable si pueden aportarse pruebas. Eligen la perspectiva a corto plazo, porque los individualistas consideran que no está probado que los efectos a largo plazo no puedan ser corregidos por el progreso de la ciencia y la evolución de la sociedad. En particular, es la única perspectiva que no considera como crítico el agotamiento de los combustibles fósiles, ya que se asume que serán fácilmente sustituibles. En cuanto a los temas de salud, se utiliza una ponderación para la edad, ya que según esta perspectiva una persona es más valiosa entre los 20 y los 40 años.
- Versión jerárquica (H): se incluyen hechos respaldados por organismos científicos y políticos de reconocida competencia. Esta actitud es bastante común entre la comunidad científica y los responsables en la toma de decisiones. Un ejemplo típico es la amplia aceptación de las guías del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).
- Versión igualitaria (E): se actúa con precaución, intentado no dejar nada fuera de consideración o en duda. De hecho, se incluye cualquier sustancia en cuanto hay una mínima y clara indicación en cuanto a su efecto. Los igualitarios no aceptan los preceptos de organizaciones científicas o políticas internacionalmente reconocidas. Se utiliza la perspectiva a largo plazo, ya que se considera que los problemas futuros no pueden ser evitados y tendrán efectos catastróficos. Así, es la versión con más incertidumbre, ya que a veces han de introducirse datos donde falta el consenso.

Como consecuencia de estas versiones, no se obtendrá una única puntuación del análisis del ciclo de vida, sino que habrá tres puntuaciones diferentes en función de la perspectiva seleccionada. Esta perspectiva influye en la valoración de la normalización y de la ponderación. El usuario de la aplicación puede seleccionar la perspectiva, incluso hacer una media. Sin embargo, se recomienda utilizar la perspectiva jerárquica como método por defecto, debido a que la mayoría de los modelos trabajan de acuerdo a procesos construidos por consenso, y a que posee un punto de vista balanceado entre corto y largo plazo. Las otras dos perspectivas pueden ser utilizadas para análisis de robustez y sensibilidad de resultados.

Las perspectivas forman parte de las incertidumbres del método, ya que los modelos de análisis dependen de esta perspectiva, son necesarios determinados criterios éticos y basado en el valor asignado por la sociedad en cuanto a las sustancias a considerar, los efectos y el plazo de tiempo considerado. Otra incertidumbre, es la asociada a los datos, la llamada incertidumbre operacional, que se puede documentar con análisis estadísticos. También se habla de incertidumbre de método incompleto, que no puede ser documentada, ya que se relacionaría con daños no contemplados en el mismo.

Una de las partes fundamentales del método es la definición de las categorías de daño y sus correspondientes modelos de cálculo a partir de los datos de inventario, siendo las categorías de impacto una valoración intermedia. A continuación, se definen las categorías de daño y los procedimientos de cálculo:

#### 1. Categoría de daño: Salud humana

La salud del individuo, presente o futuro, puede ser dañada en cuanto a su duración o discapacidad por fuentes medioambientales, tales como las enfermedades infecciosas, cardiovasculares y respiratorias, cáncer como consecuencia de radiación ionizante, cáncer y daños oculares debido al agotamiento de la capa de ozono, cáncer debido a químicos tóxicos presentes en el aire, agua o comida, así como el desplazamiento impuesto por el cambio climático.

Para la medida se utiliza la unidad DALY, desarrollada por el Banco Mundial y la WHO (World Health Organization). Esta unidad expresa los años ajustados de vida por discapacidad (DALY – Disability Adjusted Life Years-).

Un ejemplo de aplicación es que el flujo de sustancias tóxicas en toneladas por año puede relacionarse a partir de los modelos de cálculo en DALY por año.

#### 2. Categoría de daño: Calidad del ecosistema

Se asume que los ecosistemas son muy complejos, siendo extremadamente difícil determinar todos los daños recibidos. Un indicador es la diversidad de especies, a través del porcentaje de especies que están amenazadas o que desaparecen de un área determinada durante un cierto tiempo. Además, se distinguen los cálculos realizados en cuanto a ecotoxicidad, acidificación y eutrofización, y uso de la tierra.

Para la ecotoxicidad se utiliza un método que determina la fracción potencialmente afectada de especies en relación a la concentración de sustancias tóxicas por encima de un determinado umbral (PAF – Potentially Affected Fraction). Cuando se libera una emisión, la concentración cambia, y por lo tanto cambia el valor de PAF. Sin embargo, se considera una presión tóxica y no un modelo de desaparición o extinción de especies.

Para la acidificación y eutrofización no se emplea el PAF, ya que se trata de un complejo mecanismo bioquímico que afecta principalmente a la presencia de las plantas en un área. Así, se habla de fracción potencialmente desaparecida (PDF – Potentially Disappeared Fraction). En realidad, el modelo compara la presencia de plantas provocada por el efecto de acidificación y eutrofización con la específica de un ecosistema sin efecto de la acción del hombre, estableciendo un objetivo de especies.

En cuanto al uso de la tierra, se utiliza también la medida PDF, pero en cuanto al total de especies y sin establecer un objetivo como en el caso anterior. El modelo de daño es complejo, y contempla cuatro diferentes modelos: efecto local de ocupación de la tierra, efecto local de cambio de uso de la tierra, efecto regional de ocupación de la tierra y efecto regional de cambio de uso de la tierra. El efecto local contempla los cambios en especies dentro del área ocupada o convertida, mientras que el efecto regional se refiere a los cambios en el área exterior.

La adición de estos efectos referidos, valorados en PAF y PDF multiplicado por área y tiempo ( $m^2.yr$ ), representa un problema para la categoría de daño calidad del ecosistema, al no ser homogéneo. Se realiza una conversión, de forma que el daño en la categoría se expresa como  $PDF.m^2.yr$ .

### 3. Categoría de daño: Recursos

En el Eco-indicador 99 se consideran recursos minerales y combustibles fósiles. El resto de consumos se relacionan con uso de la tierra, de la categoría anterior.

En el caso de recursos no renovables, se asume que hay un límite para la explotación, aunque es bastante arbitrario fijar cifras exactas al respecto. Así, el método no considera la cantidad de recursos tal cual, sino la estructura cualitativa de estos recursos, asumiendo que los recursos futuros serán más difíciles de obtener al tener menos concentración del material en cuestión. Así, se establece la necesidad energética para extraer material de un yacimiento con determinada concentración. La unidad de esta categoría es la energía añadida (“surplus energy”) en MJ por kg extraído, es decir, el incremento esperado de la energía de extracción cuando la cantidad a extraer es mayor en una determinada cantidad que la de referencia (1990).

#### 1. Procedimiento de cálculo asociado a la categoría de daño salud humana.

Los pasos fundamentales en el modelo de daño son los siguientes:

- Análisis de destino, que evalúa el destino final y el tiempo que una sustancia perdurará, en función de la naturaleza de la sustancia y del medio. Se consideran también los medios de dispersión y la degradabilidad de la sustancia. Así, se calcula la concentración en diferentes medios (aire, agua, suelo, alimentos).
- Análisis de exposición, que relaciona la concentración con la dosis que reciben los seres humanos, plantas y otras especies.
- Análisis de efecto, que relaciona la dosis con los efectos producidos en diferentes aspectos como la salud.
- Análisis de daño, que establece la relación entre los efectos en salud con la medida de años ajustados por discapacidad.

## 2. Procedimiento de cálculo asociado a la categoría de daño calidad del ecosistema.

Se consideran las emisiones que modifican la acidificación y nivel de nutrientes, a través de análisis similares a los anteriores:

- Análisis de destino.
- Análisis de efecto, que relaciona la concentración con los efectos producidos.
- Análisis de daño, que establece la relación entre los efectos en salud y la fracción potencialmente desaparecida de plantas (PDF).

La mayoría de efectos se calculan a escala europea, pero en otras emisiones como los gases de efecto invernadero que actúan sobre la capa de ozono o las sustancias radiactivas de larga duración, se considera el impacto a nivel mundial, al tener en cuenta que las emisiones se dispersan fácilmente.

También se considera el uso de la tierra en base a datos empíricos de calidad de los ecosistemas, en función del tipo y tamaño de tierra.

## 3. Procedimiento de cálculo asociado a la categoría de daño recursos.

Se lleva a cabo en dos pasos, que se aplica de forma similar para recursos minerales y combustibles fósiles.

- Análisis de recursos, de forma similar al análisis de destino que relaciona la extracción del recurso con la disminución de la concentración de dicho recurso.
- Análisis de daño, que establece la relación entre la disminución de la concentración con la energía adicional requerida para extraer el recursos en el futuro.

Los modelos explicados se aplican sobre las siguientes categorías de impacto, presentadas anteriormente, que contribuyen a las categorías de daño de la siguiente forma:

- Categorías de impacto: cancerígenos, orgánicos respirados, inorgánicos respirados, cambio climático, radiación y capa de ozono (6) → Salud humana
- Categorías de impacto: ecotoxicidad, acidificación/eutrofización y uso de la tierra (3) → Calidad del ecosistema
- Categorías de impacto: minerales y combustibles fósiles (2) → Recursos

La fase de caracterización del método se realiza en base a estas categorías de impacto:

- Cancerígenos: se consideran las sustancias ligadas a la aparición de cáncer, en base a resultados experimentales y estudios epidemiológicos. Son las mismas sustancias que en el método CML 2. El daño se expresa en DALY/kg de emisión.
- Orgánicos respirados: efectos respiratorios resultantes del ozono fotoquímico y emisiones de sustancias orgánicas al aire. El daño se expresa como DALY/kg de emisión.
- Inorgánicos respirados: efectos respiratorios asociados a emisiones tales como las partículas, CO, SO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>, nitratos y sulfatos. El daño se expresa como DALY/kg de emisión.
- Cambio climático: se basa en el modelo de caracterización desarrollado por el IPCC, y se expresa como el potencial de calentamiento global con un horizonte temporal a lo

largo de 200 años asociado a las emisiones. Se consideran gases con vida menor de 20 años, entre 20 y 100 años y superior a 100 años. El daño se expresa como DALY/kg de emisión, entendiendo que hay impacto en enfermedades y mortalidad causadas por el cambio climático.

- Radiación: evalúa la liberación de material radioactivo al medioambiente, y lo relaciona con efectos carcinógenos y hereditarios en salud. Se expresa como DALY/kg de emisión.
- Capa de ozono: se consideran los gases que contribuyen a su agotamiento, basado en diferentes estudios y fuentes. Son las mismas sustancias que en el método CML 2. El daño se expresa en DALY/kg de emisión, asociado a enfermedades producidas por el incremento de radiaciones UV.
- Ecotoxicidad: evalúa la emisión de sustancias tóxicas, principalmente metales pesados, siendo el cromo la sustancia de referencia. El daño se expresa en PAF· m<sup>2</sup>· año / kg emisión.
- Acidificación / Eutrofización: daño de la calidad del ecosistema como resultado de las emisiones de sustancias acidificantes al aire. El daño se expresa en PDF· m<sup>2</sup>· año / kg emisión.
- Uso de la tierra: evalúa los daños en la diversidad de especies asociado al uso específico o a la conversión de tierras. El daño se expresa en PDF· m<sup>2</sup>· año / kg emisión.
- Minerales: relaciona el descenso en la concentración de material con la energía necesaria para su extracción. El daño se expresa en MJ surplus.
- Combustibles fósiles: evalúa el esfuerzo relacionado con la extracción de estos combustibles en base al consumo. El daño se expresa en MJ surplus.

La normalización se realiza tras la caracterización, y se calcula sobre las categorías de daño de forma que se produce la adimensionalización. En la normalización se determina la contribución relativa de los daños calculados al daño causado por un sistema de referencia. El propósito de la normalización se puede concretar en los siguientes puntos:

- Verificación de error. Si se compara el resultado con una referencia, se puede comprobar si los resultados tienen un orden de magnitud coherente.
- Suministrar información de importancia relativa de los resultados.
- Preparación para procesos posteriores, como la ponderación.

La normalización puede realizarse a nivel de categoría de impacto o de daño. En concreto, en el Eco-indicador 99 se realiza a nivel de categoría de daño, resultando en la unidad referida anteriormente de punto Eco-indicador. Este proceso depende de la perspectiva. En la siguiente tabla pueden observarse los factores de normalización asociados a las categorías de daño del método Eco-indicador 99, en base a las diferentes perspectivas. El sistema de referencia es el daño causado por 1 ciudadano europeo medio al año, basado en datos principalmente del año 1993, con actualizaciones realizadas para las emisiones más importantes.

Tabla 1 Factores de normalización del método Eco-indicador 99.

	H/H	H/A	E/E	E/A	I/I	I/A
Salud Humana	65,1		64,7		121	
Calidad Ecosistemas	$1,95 \cdot 10^{-5}$		$1,95 \cdot 10^{-4}$		$2,22 \cdot 10^{-4}$	
Recursos	$1,19 \cdot 10^{-4}$		$1,68 \cdot 10^{-4}$		$6,68 \cdot 10^{-3}$	$6,77 \cdot 10^{-3}$

H: se refiere al conjunto de factores de peso según la perspectiva jerárquica.

E: se refiere al conjunto de factores de peso según la perspectiva igualitaria.

I: se refiere al conjunto de factores de peso según la perspectiva individualista.

A: se refiere al conjunto de factores de peso medios (average weighting set) (media del panel de expertos).

La ponderación se realiza tras la normalización, y se puede realizar también sobre las categorías de impacto o de daño. En el método Eco-indicador 99 se realiza a nivel de las categorías de daño normalizadas. Los factores de ponderación se obtienen a partir de la evaluación de un panel de expertos, de forma que estos factores están también asociados a la perspectiva seleccionada. Los factores para el método Eco-indicador 99 se presentan en la tabla 2.

Tabla 2 Factores de ponderación del método Eco-indicador 99.

	H/H	H/A	E/E	E/A	I/I	I/A
Salud Humana	300	400	300	400	550	400
Calidad Ecosistemas	400	400	500	400	250	400
Recursos	300	200	200	200	200	200

## CML 2

---

### **Introducción**

La característica principal del método CML 2 [1] es que se trata de un método de punto medio (“mid-point method”). Esto significa que se calculan las categorías de impacto, pero no se definen unas categorías de daño asociadas, en comparación con el método anteriormente presentado. La normalización se realiza sobre las categorías de impacto, de forma que éstas quedan adimensionalizadas y pueden ser comparadas entre sí.

### **Antecedentes**

Es un método elaborado por el CML (Centre of Environmental Science), Universidad de Leiden, Holanda, que resulta de la actualización del método anterior CML 1992. Para este primer método, el CML colaboró con TNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research), y el Bureau B&G (Fuels and Raw Materials Bureau). Para esta actualización, financiada por el Dutch Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM-DGM), el Ministry of Economic Affairs (EZ), el Ministry of Agriculture, Nature Management and Fisheries (LNV) y el Ministry of Transport, Public Works and Water Management (V&W). El proyecto se llevó a cabo entre 1997 y 2001 por el CML con la contribución de otros organismos relacionados con estudios medioambientales y diferentes departamentos universitarios de Holanda.

### **Explicación del método**

El método CML 2 utiliza las categorías de impacto en un nivel de punto medio, basándose en un planteamiento orientado al problema, sin llegar al punto final de evaluación del daño, como en el caso del Eco-indicador 99. Para la selección de las categorías de impacto del método y sus indicadores asociados se toma como base el trabajo desarrollado por el SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry), en el grupo de trabajo sobre el análisis de ciclo de vida. Fue esta sociedad la que primero trabajó sobre la ISO 14042 para convertir la norma en procesos operacionales, definiendo una serie de categorías de impacto correspondientes a la mejor práctica disponible. Como se ha indicado, se trata de una selección orientada al problema, relacionada directamente con los problemas medioambientales (el llamado punto medio en la cadena causa-efecto), frente al daño en sí mismo (el punto final de la cadena).

Las categorías de impacto pueden simplificarse en función de su relevancia para el análisis del ciclo de vida y la disponibilidad de métodos de caracterización adecuados. Los métodos de caracterización suponen la traducción de la categoría de impacto a un indicador numérico. Los 3 grupos de las categorías de impacto son los siguientes:

- Grupo A: Categorías de impacto base. Son aquellas categorías para las que existe un método de caracterización base y que son utilizadas en la mayor parte de los estudios de análisis de ciclo de vida.
- Grupo B: Categorías de impacto específicas del estudio. Incluye las categorías que son susceptibles de incluirse en función del objetivo y alcance del análisis de ciclo de vida en cuestión, siempre que haya datos disponibles para su evaluación y un método de caracterización base y/o alternativo.
- Grupo C: Otras categorías de impacto. Son las categorías para las que no existe un método de caracterización base, a pesar de que puedan existir métodos alternativos.

En particular, el método CML2 selecciona 10 categorías de impacto entre las del grupo A definido (en total son 11, incluyendo éstas más la ocupación de la tierra).

Las categorías de impacto son las siguientes:

- Agotamiento de los recursos abióticos
- Cambio climático
- Disminución del ozono estratosférico
- Toxicidad humana
- Eco-toxicidad acuática del agua dulce
- Eco-toxicidad acuática marina
- Eco-toxicidad terrestre
- Formación foto-oxidantes
- Acidificación
- Eutrofización

La evaluación del análisis del ciclo de vida en el nivel de punto medio, con estas categorías de impacto, permite la selección de aquellas categorías que se consideren relevantes para el estudio en cuestión. En los estudios simplificados, se cogen las categorías de impacto base (las recogidas en el programa SimaPro), aunque la guía del método CML 2 incluye directrices para la inclusión de otras categorías de impacto e indicadores para estudios más detallados.

A continuación se da información sobre cada una de estas categorías de impacto, junto con los métodos de caracterización e indicadores seleccionados en el método de evaluación CML 2. De esta forma, se puede adquirir una idea de cómo se definen las categorías de impacto de punto medio, frente a las categorías de daño que se han explicado más en detalle en el anterior método presentado, Eco-indicador 99.

#### 1. Agotamiento de los recursos abióticos

Los recursos abióticos son los recursos naturales inertes (incluyendo la energía). Es una de las categorías más controvertidas, ya que hay una amplia variedad de métodos disponibles. El método CML2 considera el factor de agotamiento abiótico, ADF (“Abiotic Depletion Factor”), determinado por la extracción de minerales y combustibles fósiles. Se expresa en la unidad de kg de antimonio equivalente / kg extracción, basándose en la concentración de las reservas y el ritmo de consumo. El alcance del indicador es global. La fórmula asociada para el cálculo es la siguiente:

$$\text{Agotamiento Recursos Abióticos} = \sum_i ADP_i \times m_i$$

\*  $m_i$  : cantidad del recurso  $i$ , expresado en kg (excepto para gas natural y energías de combustibles – expresadas en kJ).

## 2. Cambio climático

El cambio climático se define como el impacto de las emisiones humanas en las fuerzas radiativas de la atmósfera, lo que conlleva el incremento de temperatura de la capa más inferior de la misma, con efectos adversos sobre la salud del ecosistema, la salud humana y las existencias materiales. El método de caracterización es el desarrollado por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). El  $\text{CO}_2$  y otros gases de efecto invernadero ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_2$ , CFCs,...) son los considerados causantes de este efecto. Para la medida, se coge el  $\text{CO}_2$  como sustancia de referencia, expresando la contribución potencial de la sustancia al calentamiento global para un horizonte temporal de 100 años (GWP100 – Global Warming Potential), de forma que la unidad de referencia es kg  $\text{CO}_2$  equivalente / kg de emisión. El alcance del indicador es global. La fórmula expresa la adición de todos los gases que contribuyen a este efecto:

$$\text{Calentamiento Global} = \sum_i GWP_i \times m_i$$

\*  $m_i$  : cantidad de la sustancia  $i$  emitida.

## 3. Disminución del ozono estratosférico

Este efecto se refiere al adelgazamiento de la capa de ozono estratosférica como resultados de las emisiones, lo que causa que la radiación solar UV-B alcance la superficie terrestre en mayor cantidad, con implicaciones en la salud humana y animal, ecosistemas terrestres y acuáticos, y materiales y ciclos bioquímicos. El modelo de caracterización ha sido desarrollado por el WMO (“World Meteorological Organisation”). El indicador es el ODP (“Ozone Depletion Potential”), calculado en base a los hidrocarburos que contienen cloro, flúor y bromo combinados con CFCs. La referencia es el CFC-11, por lo que la unidad de medida es kg CFC-11 equivalente / kg de emisión. El alcance es global. La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$\text{Disminución Ozono Estratosférico} = \sum_i ODP_{mi} \times m_i$$

\*  $m_i$  : cantidad de la sustancia  $i$  emitida.

## 4. Toxicidad humana

Esta categoría refleja los impactos en la salud humana de las sustancias tóxicas presentes en el ambiente, que en el método CML2 no incluye la exposición en el medio de trabajo. El método de caracterización es el de USES-LCA (“European Uniform System for the Evaluation of Substances”), que incluye el análisis de destino, de exposición y de efectos de las sustancias tóxicas para un horizonte temporal definido. Se expresa como HTP (“Human Toxicity Potential”), tomando como referencia la medida kg 1,4-diclorobenceno equivalente / kg de

emisión. El alcance está determinado por el destino final de las sustancias consideradas, pudiendo variar a escala local y global. La fórmula de cálculo se expresa como:

$$\text{Toxicidad Humana} = \sum_i \sum_{ecom} HTP_{ecom_i} \times m_i$$

\* ecom: medios de emisión (aire, agua y tierra), mi la cantidad de sustancia i emitida.

#### 5. Eco-toxicidad acuática del agua dulce

Se refiere al impacto de sustancias tóxicas en los ecosistemas de agua dulce. El método de caracterización corresponde, como en el caso anterior, a USES-LCA, y son expresados en la misma unidad kg 1,4-diclorobenceno equivalente / kg de emisión. El indicador se aplica a escala global, continental, regional y local. Se expresa como FAETP (“Freshwater Aquatic Eco-Toxicity Potential”), correspondiendo con la siguiente fórmula:

$$\text{Eco-Toxicidad Acuática del Agua Dulce} = \sum_i \sum_{ecom} FAETP_{ecom_i} \times m_i$$

\* ecom: medios de emisión (aire, agua y tierra), mi la cantidad de sustancia i emitida.

#### 6. Eco-toxicidad acuática marina

Esta categoría esta referida al impacto de sustancias tóxicas en los ecosistemas marinos. El método de caracterización, así como el indicador asociado es similar al de eco-toxicidad acuática del agua dulce, expresándose como MAETP (“Marine Aquatic Eco-Toxicity Potential”).

$$\text{Eco-Toxicidad Acuática Marina} = \sum_i \sum_{ecom} MAETP_{ecom_i} \times m_i$$

\* ecom: medios de emisión (aire, agua y tierra), mi la cantidad de sustancia i emitida.

#### 7. Eco-toxicidad terrestre

De forma análoga a las categorías anteriores, se refiere al impacto de las sustancias tóxicas sobre los ecosistemas terrestres, siendo su cálculo y expresión similares, en función de TETP (“Terrestrial Aquatic Eco-Toxicity Potential”).

$$\text{Eco-Toxicidad Terrestre} = \sum_i \sum_{ecom} TAETP_{ecom_i} \times m_i$$

\* ecom: medios de emisión (aire, agua y tierra), mi la cantidad de sustancia i emitida.

## 8. Formación foto-oxidantes

La formación de foto-oxidantes es la formación de compuestos químicos reactivos, como el ozono, debido a la acción de la luz solar en ciertos contaminantes presentes en el aire. Los foto-oxidantes pueden formarse en la troposfera bajo la influencia de la luz ultravioleta, a través de la oxidación foto-química de los compuestos orgánicos volátiles y del monóxido de carbono (CO) en presencia de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Se considera que el ozono es el más importante de estos compuestos oxidados. El efecto se conoce como niebla de verano (“summer smog”), y es perjudicial tanto para la salud humana como para los ecosistemas, incluyendo cultivos. El modelo de caracterización se calcula con el modelo de trayectoria UNECE, que incluye análisis de destino, y se expresa como kg de etileno equivalente / kg de emisión. El tiempo de alcance es de 5 días y geográficamente el indicador puede ser global o local.

$$\text{Formación Foto-oxidantes} = \sum_i \text{POCP}_i \times m_i$$

\* m<sub>i</sub> : cantidad de la sustancia i emitida.

## 9. Acidificación

Este efecto tiene una amplia variedad de impactos sobre el suelo, aguas subterráneas, aguas superficiales, organismos biológicos, ecosistemas y materiales. Ejemplos son la mortalidad de los peces en lagos o la destrucción de bosques. Los contaminantes que más contribuyen a este efecto son SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y NH<sub>x</sub>. El indicador AP (“Acidification Potential”) toma el SO<sub>2</sub> como referencia, expresándose en kg de SO<sub>2</sub> equivalente / kg de emisión. El horizonte temporal es infinito y el alcance geográfico puede ser global o local. Se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\text{Acidificación} = \sum_i \text{AP}_i \times m_i$$

\* m<sub>i</sub> : cantidad de la sustancia i emitida.

## 10. Eutrofización

Ese efecto cobra los impactos potenciales asociados a niveles excesivamente elevados de macronutrientes, siendo los más importantes el nitrógeno (N) y el fósforo (P). Esto puede provocar cambios no deseables en la composición de las especies y producción elevada de biomasa en ecosistemas acuáticos y terrestres. Además, puede convertir el agua existente en no potable. Como ejemplo, el exceso de biomasa puede llevar a niveles excesivamente bajos para los ecosistemas acuáticos, debido al consumo de oxígeno de esta biomasa, lo que implicaría la eliminación de otras formas de vida. El índice NP (Nitrification Potential) está basado en el procedimiento estequiométrico de Heijungs (1992). La sustancia de referencia es el PO<sub>4</sub> y por lo tanto el NP se expresa como kg PO<sub>4</sub> equivalente/kg emisión. El espacio de tiempo es infinito, y el alcance geográfico de este indicador puede ser global y local.

$$\text{Eutrofización} = \sum_i \text{NP}_i \times m_i$$

\*  $m_i$  : cantidad de la sustancia i emitida.

### Normalización

En el caso del método CML 2 también se realiza la normalización, en este caso al nivel de categoría de impacto. La normalización se entiende como el cálculo de la magnitud de los resultados del indicador en relación a una información de referencia. La información de referencia puede estar asociada a diferentes comunidades (países o regiones), personas u otros sistemas, en un periodo de tiempo. El principal objetivo de la normalización es comprender la importancia y magnitud relativa de los resultados para cada sistema analizado, siendo un paso altamente recomendado para cualquier análisis de ciclo de vida realizado. Para el método CML 2, el programa SimaPro permite seleccionar entre cuatro conjuntos de normalización:

- Holanda, 1997
- Europa Occidental, 1995
- Mundo, 1990
- Mundo, 1995

La ponderación, aunque se presenta como paso opcional en la guía del método CML 2, no es presentada con los valores o reglas de cálculo, por lo que no aparece como una opción en el programa SimaPro.

### **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] “The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment”, (2001). Methodology Report. PRé (Product Ecology Consultants).
- [2] Guinée J.B. (Ed.). (2002). “Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards”. Kluwer Academic Publishers. ISBN 1-4020-0228-9 (HB) / 1-4040-0557-1 (PB).