

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**INGENIERÍA INDUSTRIAL  
PROYECTO FIN DE CARRERA**

**ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE DISCO PARABÓLICO CON  
MOTOR STIRLING.**

**Alumno: Jorge Losada San José  
Tutor: Pedro A. Rodríguez Aumente**

**Marzo 2009**

## **JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

En los últimos años, el consumo mundial de energía ha aumentado de manera espectacular. Determinados factores relacionados con los combustibles fósiles, como la subida de los precios del crudo, la inestabilidad de los mercados, los problemas geopolíticos y el enorme consumo por parte de los mercados emergentes han generado una crisis energética global.

A este problema debemos añadir las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que en su mayor parte, derivan de la quema de combustibles fósiles para la producción de energía. En la actualidad, la opinión pública mundial ha centrado el debate en el problema del cambio climático.

Teniendo en consideración la situación descrita anteriormente, los países energéticamente dependientes del exterior, como lo son los de la Unión Europea, y muy concretamente España, se han visto obligados a modificar sus políticas energéticas. Así, las nuevas políticas energéticas se plantean sobre tres objetivos fundamentales:

- conseguir una mayor independencia en el ámbito energético
- hacer un uso eficiente de la energía
- reducir al mínimo el impacto medioambiental

La mejora de las técnicas de quema de carbón y el nuevo despegue de la energía nuclear, junto con el desarrollo de otras nuevas técnicas tratan de lograr la consecución de los objetivos anteriormente mencionados. En este camino, las energías renovables han de jugar un papel muy destacado, ya que ni emiten gases de efecto invernadero y ni se agotan.

Entre las distintas tecnologías renovables disponibles en España, se destacan dos en la actualidad: la energía eólica y la energía solar. Aprovechando la energía del viento y del sol respectivamente, estas dos tecnologías se han convertido en la punta de lanza del desarrollo sostenible en nuestro país. Centrándonos en la energía solar, el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, clasifica los distintos tipos de aplicaciones que utilizan la energía solar en tres grupos:

- energía solar térmica
- energía solar termoeléctrica
- energía solar fotovoltaica

Analizando las inversiones en energía solar encontramos que la mayor parte de ellas han ido dirigidas a la instalación de estaciones fotovoltaicas, cuyos rendimientos energéticos oscilan entre el 10 % y el 15 %, mientras que por otro lado encontramos inversiones más reducidas en la generación eléctrica basada en instalaciones solares térmicas de alta temperatura, que estando en su mayor parte en fase de desarrollo de prototipos, presentan rendimientos mayores que los sistemas fotovoltaicos.

Entre los sistemas térmicos de alta temperatura encontramos los sistemas disco parabólico, que en su variante con motor Stirling obtienen rendimientos que llegan hasta picos del 30%, estando su valor promedio, por encima del 20 %. Estos discos parabólicos han evolucionado tanto en Europa como en EE.UU. hacia la construcción de unidades autónomas conectadas a motores Stirling situados en el foco, con potencias de 7-25 kW. Los sistemas disco-Stirling presentan una alta eficiencia en la conversión de la radiación solar en energía eléctrica, de entre el 25-30% en condiciones nominales de operación. Además, se pueden conseguir relaciones de concentración superiores a 3000, lo que permite alcanzar temperaturas entre 650

y 800 °C y eficiencias nominales en los motores Stirling entre 30-40%, lo que podría convertir a este sistema de generación eléctrica en uno de los que obtengan un mayor éxito en el futuro.

Debido a ello, el presente documento analiza su viabilidad en el ámbito energético, económico y socio-ambiental y trata de concluir si el sistema disco Stirling es realmente una alternativa de futuro.

## ÍNDICE

### **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

<b>1.0 Sistemas de producción de energía</b> .....	2
<b>2.0 Energías fósiles</b> .....	2
2.1 El petróleo .....	2
2.2 El gas natural .....	3
2.3 El carbón .....	3
<b>3.0 La energía nuclear</b> .....	4
<b>4.0 Consumo y reservas</b> .....	4
<b>5.0 Energías renovables</b> .....	4
5.1 Energía solar .....	5
5.2 Energía hidráulica .....	8
5.3 Energía eólica .....	8
5.4 Biomasa.....	9
5.5 Biocombustibles .....	9
5.6 Cogeneración.....	9
5.6 Otras energías.....	10

### **CAPÍTULO II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.**

<b>1.0 Historia de los sistemas disco stirling</b> .....	12
<b>2.0 Descripción del sistema</b> .....	13
<b>3.0 Componentes del sistema</b> .....	14
3.1 Concentradores.....	14
3.2 Receptor .....	16
3.3 Equipos auxiliares .....	18
3.4 Motores.....	19

### **CAPÍTULO III. ASPECTOS OPERATIVOS. EFICIENCIA DEL SISTEMA.**

<b>1.0 Análisis detallado del sistema en operación</b> .....	23
1.1 Análisis del sistema. Mediciones de interés.....	23
1.2 Medición de la energía solar recibida. ....	24
1.3 Sistema de medición del flujo incidente. ....	24
1.4 Sistema de medida de la energía absorbida por el refrigerante .....	24
1.5 Sistema de medición eléctrico.....	24
1.6 Medición de la distribución de flujo. ....	24
1.7 Medida de la energía del sistema. ....	26
1.8 Balance de energía del sistema.....	27
1.9 Eficiencia de los componentes.....	28
1.10 Conclusiones.....	28
<b>2.0 Modelo térmico del sistema disco Stirling.</b> .....	29
2.1 Introducción.....	29
2.2 Resumen del método. ....	29
2.3 Descripción del sistema a modelar. ....	30
2.4 Modelización del receptor. ....	30
2.5 Resultados. Comparación con medidas experimentales.....	31
2.6 Conclusiones del modelo.....	33
<b>3.0 Experiencia en España. Prototipo EuroDish (Proyecto EnviroDish)</b> .....	34
3.1 La instalación de Sevilla.....	34
3.2 Resultados de operación.....	34
3.3 Resultados anuales.....	35
3.4 Conclusiones.....	36
<b>4.0 Experiencia global con sistemas disco motor.</b> .....	37

### **CAPÍTULO IV. ACTUACIONES DEL SISTEMA.**

<b>1.0 Actuaciones del sistema</b> .....	39
<b>2.0 Actuaciones del prototipo EuroDish</b> .....	39
2.1 Comportamiento del sistema.....	40
2.2 Comportamiento del motor.....	40
<b>3.0 Actuaciones de cada sistema</b> .....	42

## **CAPÍTULO V. CONSIDERACIONES DE DISEÑO.**

<b>1.0 Consideraciones de diseño</b> .....	46
<b>2.0 Relación distancia focal / diámetro</b> .....	47
<b>3.0 Análisis de un motor Stirling en aplicaciones solares. Consideraciones de diseño</b> ... 49	49
3.1 El motor Stirling como sistema generador .....	50
3.2 El motor SOLO V161.....	50
3.3 Pérdidas en el motor Stirling .....	53
<b>4.0 El mecanismo de yugo</b> .....	55
4.1 Concepto de diseño .....	56
<b>5.0 Análisis y diseño de concentradores</b> .....	57
5.1 Concentradores. Características y tipos .....	57
5.2 Diseño del concentrador. Aspectos de diseño.....	58
<b>6.0 Análisis del receptor. Corrosión en receptores de reflujo heat pipe</b> .....	60
<b>7.0 Sistema de control de seguimiento</b> .....	62
<b>8.0 Costes, barreras y desarrollos actuales</b> .....	62

## **CAPÍTULO VI. VIABILIDAD ECONÓMICA DEL SISTEMA.**

<b>1.0 Viabilidad económica del sistema disco Stirling</b> .....	64
1.1 Costes del sistema.....	64
1.2 Ingresos del sistema.....	64
<b>2.0 Costes orientativos en instalaciones generadoras de energía eléctrica</b> .....	64
2.1 Coste de adquisición.....	64
2.2 Costes de operación y mantenimiento.....	66
2.3 Coste por energía producida.....	67
2.4 Coste de la electricidad.....	68
2.5 Comparación entre los distintos sistemas solares de alta concentración.....	69
<b>3.0 Evolución de los costes en sistemas disco Stirling</b> .....	69
<b>4.0 Análisis de costes en sistemas disco Stirling de última generación. Barreras y desarrollos actuales</b> .....	71
4.1 Situación internacional.....	73
4.2 Principales líneas actuales de I+D.....	74
<b>5.0 Comparación de la viabilidad de un sistema disco Stirling frente a una instalación fotovoltaica</b> .....	74
5.1 Costes de cada instalación.....	74
5.2 Ingresos de cada instalación.....	75
5.3 Herramientas financieras .....	76
5.4 Resultados obtenidos.....	82

## **CAPÍTULO VII. IMPACTO AMBIENTAL DEL SISTEMA DISCO STIRLING.**

<b>1.0 Eficiencia del sistema. Comparativa con otros sistemas</b> .....	84
<b>2.0 Toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub></b> .....	86
2.1 Emisiones de los combustibles fósiles.....	86
2.2 Emisiones de CO <sub>2</sub> del mercado español.....	87
<b>3.0 Impacto de la instalación de un módulo disco Stirling</b> .....	88
3.1 Comparativa acerca del impacto de una unidad Stirling y de un módulo fotovoltaico.....	88
<b>4.0 Evaluación de Impacto Ambiental de una central solar térmica de 3'2 MW</b> .....	89
4.1 Evaluación Impacto Ambiental de una central de 3'2 MW con sistemas disco Stirling....	90
<b>5.0 Conclusiones</b> .....	97

## **CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES.**

<b>1.0 Conclusiones</b> .....	99
1.1 Energía solar. Tecnología disco Stirling.....	99
1.2 Viabilidad económica de los sistemas disco Stirling. ....	100
1.3 Evolución en el diseño de los componentes. ....	102
1.4 Impacto ambiental. ....	102

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Colector cilíndrico parabólico.....	6
Figura 2. Esquema simplificado de una planta de generación con CCP.....	6
Figura 3. Parque de helióstatos en Almería.....	7
Figura 4. Esquema de funcionamiento de un parque de helióstatos.....	7
Figura 5. Sistema disco Stirling.....	8
Figura 6. Disco Stirling, sistema esquemático. La combinación de cuatro unidades de 25 kW mostrada aquí es representativa de una posible aplicación de potencia.....	13
Figura 7. Elementos básicos de un sistema disco Stirling. En la imagen prototipo Eurodish. ...	14
Figura 8. Imagen de un concentrador de 8'5 metros de diámetro de SBP.....	15
Figura 9. Esquema de un concentrador con sistema de espejos de membrana estirada.....	16
Figura 10. Receptor de tubos iluminados directamente.....	17
Figura 11. Esquema que muestra el funcionamiento de un receptor solar de tubo.....	18
Figura 12. Imagen del motor Stirling V161 con receptor solar.....	19
Figura 13. Esquema que muestra el principio de funcionamiento de un Motor Stirling.....	20
Figura 14. Esquema de un sistema disco parabólico con ciclo Bryton.....	21
Figura 15. Flujo de energía en un sistema disco Stirling.....	23
Figura 16. Distribución de flujo normalizado en el plano focal.....	25
Figura 17. Distribución de flujo normalizado en el plano del absorbedor.....	25
Figura 18. Picos de flujo y mediciones en la apertura del receptor en el sistema Eurodish. ....	25
Figura 19. Porcentaje de radiación interceptada en función de la distancia al plano focal y en función del radio de la abertura.....	26
Figura 20. Metodología del modelo.....	29
Figura 21. Distribución del flujo incidente en el plano focal.....	30
Figura 22. Distribución del flujo solar incidente en el receptor.....	30
Figura 23. Sección lateral del receptor con las principales causas de pérdidas en el sistema..	31
Figura 24. Geometría y volúmenes de control del absorbedor.....	31
Figura 25. Distribución final de la energía suministrada al sistema.....	32
Figura 26. Distribución de temperaturas en el absorbedor. Subrayados los resultados del modelo.....	33
Figura 27. Potencia producida por el motor frente a dato suministrado por el modelo.....	33
Figura 28. Evolución de rendimientos en el periodo 2005-2006.....	35
Figura 29. Evolución potencia en el periodo 2005-2006.....	35
Figura 30. Evolución de la energía durante el periodo 2005-2006.....	36
Figura 31. Evolución de los tiempos de operación periodo 2005-2006.....	36
Figura 32. Actuaciones del sistema disco Stirling a lo largo de.....	39
Figura 33. Potencia neta obtenida en función de la irradiación normal directa recibida.....	40
Figura 34. Evolución de los rendimientos global del sistema y del motor.....	41
Figura 35. Datos recogidos por una unidad disco Stirling de 10 kW en Rumania.....	42
Figura 36. Destino final de la energía en un sistema disco Stirling.....	43
Figura 37. Evolución del rendimiento teórico en sistemas disco Stirling en función de la temperatura del gas de trabajo y de la relación de concentración.....	46
Figura 38. Diagrama de pérdidas y rendimientos de cada componente del sistema.....	46
Figura 39. Esquema óptico de un paraboloide de revolución.....	48
Figura 40. Ángulo límite y relación focal.....	49
Figura 41. Reflexión en el concentrador.....	49
Figura 42. Motor Stirling a nivel termodinámico entre dos focos térmicos.....	49
Figura 43. Motor SOLO V161.....	51
Figura 44. Sección motor SOLO V161.....	51
Figura 45. (a): Variación de la temperatura en función del ángulo del cigüeñal.....	52
Figura 46. Sección transversal de un motor con mecanismo de yugo.....	55
Figura 47. Derivaciones geométricas en motores de yugo.....	56
Figura 48. Tipos de concentradores. En sentido horario encontramos: concentrador multifaceteado, concentradores de única superficie y concentrador de membrana tensionada.....	57
Figura 49. Prototipo australiano ANU.....	58
Figura 50. Sistemas DISTAL I y DISTAL II.....	58
Figura 51. Principales construcciones para concentrador.....	59
Figura 52. Sistema SES. Estructura soporte. Módulos del sistema.....	60
Figura 53. Esfuerzos internos en el disco. Izquierda sin viento; derecha con viento.....	60

<i>Figura 54. Funcionamiento de un receptor de tubo de calor.</i> .....	61
<i>Figura 55. Costes de adquisición fósil/nuclear.</i> .....	65
<i>Figura 56. Coste adquisición energías renovables.</i> .....	66
<i>Figura 57. Distribución tipo costes de inversión para sistema disco Stirling.</i> .....	72
<i>Figura 58. Evolución prevista en el PER para la energía solar termoeléctrica.</i> .....	73
<i>Figura 59. Situación de los distintos sistemas de producción eléctrica en función de su eficiencia y de su coste.</i> .....	85
<i>Figura 60. Distribución de la producción peninsular.</i> .....	86
<i>Figura 61. Evolución de las emisiones de CO2 a nivel nacional.</i> .....	87
<i>Figura 62. Evolución de la potencia y del rendimiento de una unidad de 10 kW en función de la irradiación normal directa.</i> .....	100
<i>Figura 63. Evolución del coste del kW en las distintas generaciones de sistemas disco Stirling.</i> .....	101
<i>Figura 64. Comparación de la evolución del precio del kWh diesel, fotovoltaico y disco Stirling.</i> .....	101
<i>Figura 65. Evolución de los costes en tecnologías renovables.</i> .....	101



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Hipótesis adoptadas en el cálculo de las pérdidas no medibles experimentalmente...	27
Tabla 2. Propiedades ópticas de los materiales utilizados. ....	27
Tabla 3. Balance energético de entrada al sistema con porcentaje de error de la medida.....	27
Tabla 4. Balance energético de salida del sistema con porcentaje de error de la medida. ....	28
Tabla 5. Datos de operación del sistema.....	32
Tabla 6. Características técnicas sistema EnviroDish. ....	34
Tabla 7. Relación de parámetros evaluados.....	34
Tabla 8. Resumen experiencia con sistemas disco parabólico. ....	37
Tabla 9. Rendimiento de los componentes del sistema. ....	40
Tabla 10. Evolución del rendimiento global del sistema y del motor frente a cambios en la irradiación normal directa. ....	41
Tabla 11. Parámetros geométricos y de funcionamiento del motor.....	51
Tabla 12. Relaciones geométricas. ....	56
Tabla 13. Conceptos de diseño.....	56
Tabla 14. Datos característicos de los diferentes tipos de diseños. ....	59
Tabla 15. Coste de operación y mantenimiento en centrales renovables. ....	67
Tabla 16. Coste unitario por kWh producido.....	67
Tabla 17. Coste de la electricidad en sistemas de disponibilidad total (cent.\$/kWh). ....	68
Tabla 18. Coste de la electricidad en sistemas intermitentes (cent.\$/kWh). ....	68
Tabla 19. Costes de la electricidad con combustible fósil (euro/kWh).....	68
Tabla 20. Valores característicos de sistemas de alta concentración. ....	69
Tabla 21. Evolución de los costes en sistemas disco Stirling.....	70
Tabla 22. Cálculo del VAN en el sistema Fotovoltaico. ....	79
Tabla 23. Cálculo del VAN del sistema disco Stirling. ....	80
Tabla 24. Cálculo del VAN sistema disco Stirling comercial.....	81
Tabla 25. Periodo de recuperación de los distintos sistemas.....	82
Tabla 26. Emisiones de CO <sub>2</sub> de los distintos combustibles.....	86
Tabla 27. Valoración del impacto ambiental. ....	90
Tabla 28. Emisiones de CO <sub>2</sub> al utilizar una caldera de carbón.....	92
Tabla 29. Evaluación de Impacto Ambiental de la instalación solar con unidades disco Stirling. ....	93
Tabla 30. Evaluación de Impacto Ambiental de la instalación de una central de carbón.....	94

**CAPÍTULO I:**

**INTRODUCCIÓN.**

## **1.0 Sistemas de producción de energía<sup>1</sup>.**

En el presente capítulo se exponen las distintas tecnologías de producción de energía eléctrica de una manera general. El objetivo principal es mostrar el actual sector de la generación eléctrica, ubicando dentro de él a los sistemas solares de disco parabólico. En capítulos posteriores se realizarán análisis económicos y energéticos de las distintas alternativas existentes, con el fin de conocer si los sistemas disco Stirling son una alternativa de futuro, o si por el contrario, no lo son.

Para poder explicar el funcionamiento de cada uno de los sistemas de producción es necesario realizar una primera clasificación de dichos sistemas. En el presente documento la clasificación realizada muestra tres grandes grupos:

- 1- energías fósiles
- 2- energía nuclear
- 3- energías renovables

A continuación se profundizará en cada uno de los grupos expuestos.

### **2.0 Energías fósiles.**

Las energías fósiles proceden de restos animales y vegetales almacenados en grandes cavidades donde están sometidos a la acción de la presión y de la temperatura de las rocas. Existen tres tipos de combustibles fósiles: el petróleo, el gas natural y el carbón, cada uno con características propias que se detallarán más adelante. Este tipo de combustibles presentan una serie de problemas y de ventajas comunes. Entre las ventajas que ofrecen destacamos:

- Son combustibles de elevada calidad.
- Más baratos que el resto de las fuentes.
- Disponibilidad total (hasta agotamiento de las reservas).
- Capacidad de almacenaje.
- Fáciles de transportar.

Pero también presentan una serie de inconvenientes:

- Las reservas existentes se van reduciendo a un ritmo cada vez mayor.
- Su combustión provoca emisiones a la atmósfera que son perjudiciales para la salud y para el medio ambiente.
- A medida que se agotan aumenta su precio. Este factor económico marca el desarrollo de los países y limita su autonomía, siendo en la actualidad un factor geoestratégico muy importante.

#### **2.1 El petróleo.**

El petróleo es un compuesto químico cuya composición es bastante homogénea, siendo fundamentalmente una mezcla de hidrocarburos. En su composición química encontramos

---

<sup>1</sup> Sobre los sistemas de producción de energía existe abundante documentación. De especial interés son los "Apuntes de la asignatura Ingeniería Energética. Capítulo I" de Antonio Lecuona, el "Plan de Energías Renovables 2005-2010", el informe "RENOVALIA. Situación de las energías renovables en España. Informe final" del Ministerio de Educación y Ciencia, Marzo 2005, y las páginas del Ministerio de Industria y del Ciemat, [www.ciemat.es](http://www.ciemat.es) y [www.mityc.es](http://www.mityc.es).

carbono (84-87%), hidrógeno (11-16%), oxígeno y nitrógeno (0-7%) y azufre (0-4%). Además, su poder calorífico es elevado, en torno a 42 MJ/kg.

Dejando a un lado sus características físicas, el petróleo es un compuesto que debe refinarse antes de su uso. Tras su refinado, el mercado dispone de una serie de productos listos para su utilización como las gasolinas, el queroseno, etc.

El petróleo en la actualidad es fundamental para la economía ya que gran parte de la energía que se utiliza proviene de la combustión de sus derivados en distintos tipos de motores térmicos, ya sean motores diesel, gasolina o turbinas de diversa consideración.

## 2.2 El gas natural.

El gas natural está compuesto mayoritariamente por metano al que se le suman algunos otros hidrocarburos y partículas. Su contenido en azufre es muy pequeño, siendo su combustión más limpia que la de los derivados del petróleo. El gas natural se transporta a través de gaseoductos mediante el uso de potentes compresores. Si esto no es suficiente, el gas puede ser licuado y transportado en buques especiales.

En lo referente a su utilización distinguimos dos usos principales:

- Producción de energía.
- Producción de calor.

Su precio es dependiente del precio del petróleo, y en la actualidad se utiliza en centrales de ciclo combinado cuya eficiencia es bastante elevada, pudiendo también ser utilizado como combustible en motores alternativos.

## 2.3 El carbón.

El carbón presenta como principales ventajas ser el combustible fósil más abundante en la actualidad, estar repartido por todo el planeta y ser barato. Sin embargo, el carbón como combustible presenta como inconvenientes su difícil extracción, su difícil combustión<sup>2</sup> y su poder calorífico (inferior a los otros combustibles fósiles) de entre 8 y 30 MJ/kg. En lo referente a sus aplicaciones, el carbón se emplea de manera mayoritaria para la producción de electricidad en centrales, las cuales deben de ser de gran tamaño (típicamente del orden de cientos de megavatios) para poder rentabilizar las grandes infraestructuras necesarias y el coste de la caldera.

Los gases de la chimenea de la central deben de ser purificados antes de ser vertidos ya que poseen en suspensión partículas altamente contaminantes como los óxidos de nitrógenos o el dióxido de azufre.

Existen tres tecnologías principales para realizar la quema del carbón. En primer lugar encontramos de manera mayoritaria las centrales de combustión de carbón pulverizado, que utilizan carbón molido antes de su quema. En la actualidad está comenzando a emplearse la técnica del carbón gasificado, que a pesar de ser más costosa, resulta más limpia. Por último, existe una pequeña minoría de centrales de lecho fluidizado. En un depósito se quema carbón pulverizado, o gasificado, mezclado con caliza y en ocasiones arena, al que se le inyecta aire desde la parte inferior, quemando el carbón a baja temperatura, lo que reduce la aparición de NO<sub>x</sub>. El resto del NO<sub>x</sub> se elimina con urea en la salida de gases quemados, mientras que la caliza absorbe el SO<sub>2</sub> procedente de la combustión.

---

<sup>2</sup> Es difícil quemar carbón si se imponen restricciones a las emisiones contaminantes. A la manera "sucia" se viene haciendo desde el comienzo del desarrollo industrial de manera masiva, y muchos siglos antes para proveer de energía térmica a los hogares.

### **3.0 La energía nuclear.**

La generación de electricidad mediante el uso de combustible nuclear presenta como gran ventaja frente al uso de combustibles fósiles el hecho de que no contribuye a la contaminación atmosférica ni al efecto invernadero. Además posee como ventaja el hecho de proporcionar autonomía energética a los países que desarrollan esta tecnología.

En la actualidad las centrales de las que se dispone son de fisión nuclear. En ellas, por impacto de un neutrón, ciertos núcleos del combustible utilizado se fragmentan liberando energía térmica y otros neutrones que chocan a su vez con más núcleos, aumentando de esta manera el número de átomos implicados y la energía liberada. Es necesario, por tanto, utilizar moderadores o venenos atómicos que estabilicen la reacción en el interior del reactor. Con el calor producido por la reacción se calienta agua, con lo que se obtiene vapor que mueve unas turbinas que generan la energía eléctrica. Existen dos tipos de centrales principales en función de cómo calientan el agua de servicio:

- BWR: en este tipo de centrales el agua se calienta directamente en el reactor por lo que se aprovecha mejor el calor de la reacción, aunque presenta la posibilidad de escapes de partículas radioactivas al agua, lo que implica la necesidad de establecer controles y utilizar filtros.
- PWR: el agua que mueve las turbinas se calienta en un intercambiador con agua evaporada en la reacción que se produce en el reactor. A pesar del peor aprovechamiento energético que se realiza, la seguridad frente a escapes es mayor.

El principal problema de la energía nuclear son los residuos radioactivos que se generan en la fisión del combustible. Su radioactividad es elevada siendo estos residuos peligrosos para la salud y de una duración de miles de años<sup>3</sup>. En la actualidad se está empezando a reutilizar el combustible, lo que se calcula que podrá reducir la generación de residuos en un 96%.

### **4.0 Consumo y reservas.**

El consumo energético a nivel mundial está relacionado con el aumento de la población. Este aumento, imparable en los países en vías de desarrollo, necesita venir acompañado de un crecimiento de la producción eléctrica que garantice unas condiciones de vida mínimas. El problema es que los combustibles que se utilizan en la actualidad disminuyen sus reservas cada año, además de dañar de manera irreparable el medio ambiente. Según "BP Statistical Review of World Energy 2005", Peter Davies, Londres, se atribuye al carbón unas reservas de 160 años, al petróleo unas reservas de 40 años y al gas natural unas reservas de 60 años. Además, el uranio no ofrece reservas a largo plazo. En ciclo abierto, como se utiliza actualmente, las reservas conocidas permiten el suministro para unos 70 años al ritmo actual de consumo, circunstancia que podría cambiar si se pudiese reciclar el 96% del combustible como se explicó anteriormente.

De aquí surge la necesidad de conseguir otros sistemas de producción eléctrica, respetuosos con el medio ambiente, duraderos en el tiempo, económicamente viables a largo plazo y que permitan a los distintos países una autonomía energética total; son las energías renovables.

### **5.0 Energías renovables.**

Las energías renovables son aquellas basadas en el aprovechamiento de la energía solar y de las fuentes derivadas de la misma, cuya disponibilidad está garantizada gracias a la renovación de sus existencias propiciada por la radiación solar que alcanza a la tierra.

Las características principales de las energías renovables son:

---

<sup>3</sup> Un estricto protocolo de seguridad que involucra a todos los actores participantes en el proceso garantiza la operatividad de dichas plantas en condiciones seguras. Fallos en la robustez de dicho protocolo resultarían catastróficos para los seres vivos durante miles de años.

- Ofrecen sostenibilidad, ya que no se agotan.
- Disponibilidad variable, y a veces difícil de pronosticar, al depender de los factores climatológicos.
- Bajo impacto ambiental.
- Proporcionan a los países autosuficiencia energética y tecnológica. A pesar de que no todos los países fabrican aeroturbinas y colectores solares, estas tecnologías son más abordables por países en vías de desarrollo que las convencionales en la producción de energía.
- Actualmente no son capaces de sustituir totalmente a los combustibles fósiles.

A continuación se enumeran y se detallan los distintos tipos de energías renovables existentes.

### 5.1 Energía solar.

Como su propio nombre indica esta tecnología se basa en la utilización de la radiación solar. Clasificamos las tecnologías solares en tres categorías.

#### 5.1.1 Energía térmica de baja temperatura.

Fundamentalmente se basa en el uso de colectores planos en instalaciones para suministrar agua caliente sanitaria, con el ahorro de energía y de dinero que ello conlleva. Además pueden diseñarse instalaciones para calefacción o para la producción de frío que se situarían en temperaturas medias y en el uso de colectores especiales. Para que estos colectores sean capaces de suministrar ACS, calefacción y climatización, necesitan alcanzar temperaturas en el agua almacenada de aproximadamente 90º C.

#### 5.1.2 Energía térmica de alta temperatura<sup>4</sup>.

Puede tener dos usos principales:

- Aplicaciones industriales.
- Generación de electricidad.

Si nos centramos en la generación de electricidad encontramos tres tecnologías principales, todas basadas en la concentración de la radiación para lograr elevadas temperaturas de trabajo:

##### a) Centrales de Colectores Cilindro Parabólicos (CCP).

En este tipo de centrales se constituyen filas paralelas de colectores cilindro parabólicos compuestos cada uno de ellos por un espejo cilindro parabólico que refleja la radiación solar directa sobre un tubo receptor por el que circula un fluido. La radiación solar concentrada calienta el fluido logrando temperaturas de trabajo de hasta 400 °C. Como cualquier otro captador de concentración, los CCP solo pueden aprovechar la radiación solar directa, lo que exige que el colector vaya modificando su posición durante el día. Este movimiento se consigue mediante el giro alrededor de un eje paralelo a su línea focal. En la Figura 1 se observa un CCP típico.

---

<sup>4</sup> Al respecto véanse “Energía solar térmica de concentración. Estado actual y actores del sector.” de Juan Antonio Cabrera Jiménez, María José Cuesta Santianes y Marta Pérez Martínez, mayo 2006, y “Energía Solar Termoeléctrica” de Manuel Romero Álvarez, ambas publicaciones del Ciemat. También resulta de interés la publicación de la Junta de Andalucía “Tecnología termosolar 2008”.



Figura 1. Colector cilíndrico parabólico.

La producción de energía eléctrica en estos sistemas se basa en la evaporación de agua mediante el intercambio de calor con el fluido que circula por los tubos de los colectores. Después, el vapor de agua obtenido mueve una turbina de vapor que genera electricidad. En la Figura 2 se muestra dicho funcionamiento. Este tipo de centrales solares son en la actualidad las que presentan una mayor experiencia comercial al existir una planta de este tipo de 354 MWe en California.

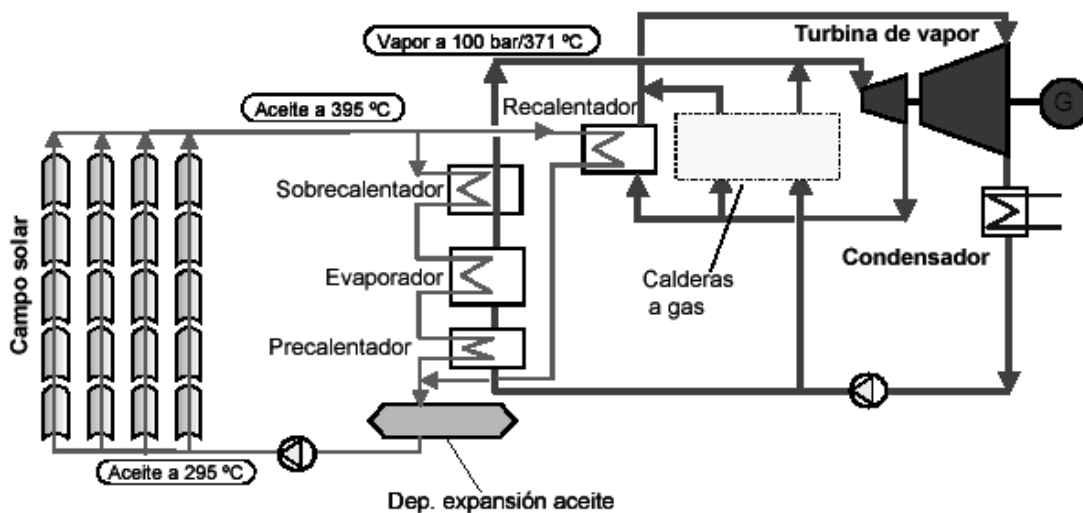


Figura 2. Esquema simplificado de una planta de generación con CCP.

b) Sistemas de receptor central con campo de helióstatos.

En estos sistemas el intercambio de calor radiativo/convectivo se realiza en un intercambiador de calor ubicado encima de una torre. Los altos flujos de radiación incidente permiten trabajar a altas temperaturas, almacenando el calor recibido en fluidos de trabajo a partir de los cuales se obtiene vapor. Dicho vapor moverá turbinas a las que irán unidos generadores eléctricos que generarán la energía eléctrica que se suministrará a la red. Entre los fluidos de trabajo que pueden ser utilizados destacan determinados tipos de sales de nitratos o de sodio, aunque en la actualidad cogen fuerza el vapor de agua y el aire. Las figuras 3 y 4 muestran una central de con campo de helióstatos y su funcionamiento simplificado respectivamente.

Uno de los principales problemas de esta tecnología solar radica en que la demanda energética no coincide con la producción, por lo que el almacenamiento es necesario. Para ello se utilizan acumuladores de calor con sales como las anteriormente mencionadas. Además de regular la producción, este tipo de sistemas mejoran el funcionamiento de la instalación al reducir los transitorios. Como en la actualidad los campos de helióstatos no son rentables de por sí, podemos encontrar instalaciones híbridas de este tipo.



Figura 3. Parque de helióstatos en Almería.

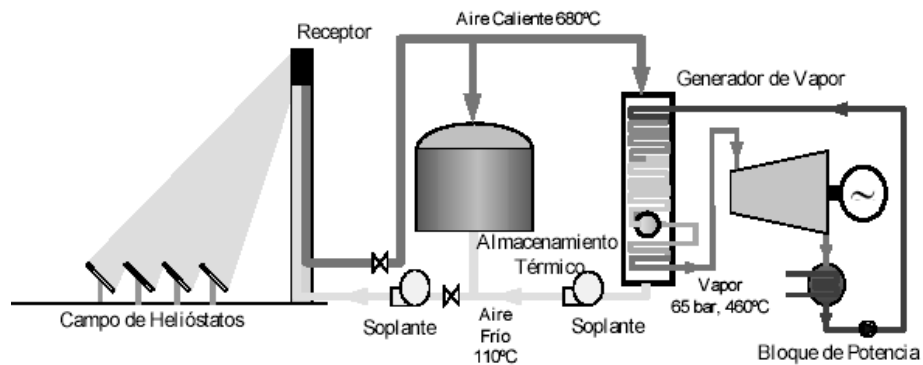


Figura 4. Esquema de funcionamiento de un parque de helióstatos.

En España existen instalaciones pioneras<sup>5</sup> como la planta TSA, de 1 MW de potencia y aire como fluido de trabajo, y la planta PS10 en San Lúcar la Mayor (Sevilla), propiedad de Abengoa. Dicha instalación usa tecnología de receptor volumétrico de aire y un sistema de almacenamiento térmico con lecho cerámico de alúmina, probados satisfactoriamente en la instalación TSA de la PSA entre 1993 y 1996. La planta cuenta con un total de 981 helióstatos de 91m<sup>2</sup> cada uno y un receptor volumétrico de aire de 41 MW y se espera que llegue a producir 22 GWh eléctricos anuales.

### c) Sistemas de disco parabólico.

Los discos parabólicos han evolucionado tanto en EEUU como en Europa hacia la construcción de unidades autónomas conectadas a motores Stirling situados en el foco. Los sistemas disco/Stirling han demostrado la mayor eficiencia de conversión de radiación solar en energía eléctrica con valores máximos del 30 % y hasta un 25 % de promedio diario en unidades de 7 a 25kW. Debido a la curvatura parabólica del concentrador y a la baja relación distancia focal/diámetro ( $f/D = 0,6$ ), se pueden conseguir altas relaciones de concentración por encima de 3.000. Esto permite alcanzar muy altas temperaturas de operación entre 650 y 800 °C, dando lugar a eficiencias en el motor Stirling del orden del 30 al 40 %. La superficie cóncava del concentrador está cubierta por espejos de vidrio de segunda superficie con su correspondiente curvatura parabólica o bien por espejos delgados o polímeros metalizados de primera superficie soportados sobre una estructura de fibra de vidrio o de membrana tensionada. Los receptores para sistemas disco/Stirling son de tipo cavidad, con una pequeña apertura y su correspondiente sistema de aislamiento. En los capítulos siguientes se detallarán al máximo todos los elementos que componen este tipo de sistemas y su funcionamiento. En la Figura 5 se puede observar una de estas unidades.

<sup>5</sup> Más información acerca de las instalaciones de colectores cilindro parabólico y de campo de helióstatos puede encontrarse en la página web del CIEMAT, [www.ciemat.es](http://www.ciemat.es)





*Figura 5. Sistema disco Stirling.*

### 5.1.3 Energía fotovoltaica.

Consiste en la transformación directa de la energía solar en energía eléctrica en los denominados paneles fotovoltaicos. Los paneles fotovoltaicos están formados por dispositivos semiconductores tipo diodo que, al recibir radiación solar, se excitan y provocan saltos electrónicos, generando una pequeña diferencia de potencial en sus extremos, con lo que se genera corriente eléctrica continua que se puede transformar en corriente alterna e inyectar en la red eléctrica, operación que es muy rentable económicamente gracias a las subvenciones del estado. Las placas fotovoltaicas se dividen en dos clases:

- Cristalinas: que a su vez se divide en dos categorías:
  - a) Monocristalinas: se componen de secciones de un único cristal de silicio (reconocibles por su forma circular o hexagonal).
  - b) Policristalinas: cuando están formadas por pequeñas partículas cristalizadas.
- Amorfas: cuando el silicio no se ha cristalizado.

En conjunto la efectividad de este tipo de sistemas no es muy elevada, rondando el 10% en aplicaciones comunes, pero como ventaja poseen una amplia experiencia comercial.

### 5.2 Energía hidráulica.

Es una tecnología muy madura cuyo rendimiento está casi completo en Europa, salvo en tamaños pequeños. Posee un impacto ambiental notable, ya que se pierden tierras fértiles, produce cambios en la hidrología, etc. Sin embargo permite controlar el cauce de los ríos evitando desbordamientos.

Para la producción de electricidad se crean o aprovechan grandes presas donde se acumula el agua, siendo su capacidad de producción muy variable, al depender de las lluvias recogidas en cada año. El agua de la presa se conduce por una tubería de manera que se hace funcionar una turbina, la cual conecta su eje a un generador eléctrico. Como el caudal con el que funcionan suele ser muy variable, las turbinas empleadas suelen ser de geometría variable para optimizar el proceso. A parte del caudal, la otra variable que definirá la eficacia del proceso será la altura de la presa, ya que todo el proceso se basa en la presión del fluido (fluidoestática del sistema).

### 5.3 Energía eólica.

Su empleo se centra mayoritariamente en la generación de electricidad. En España su capacidad instalada equivale a la producción de tres centrales nucleares, siendo numerosos los parques en los que se hayan ubicados los aerogeneradores. La potencia anual obtenida en

estos sistemas es equivalente a la que obtendrían si operasen a plena potencia durante 91 días (aproximadamente un 25% del tiempo de un año).

La energía eólica es competitiva en la actualidad frente a otras fuentes de energía, habiendo experimentado un crecimiento muy grande durante los últimos años en Europa, y más concretamente en España.

La producción de energía con el viento depende mucho de la localización, pues la tecnología de las aeroturbinas de gran tamaño para conexión a red está muy optimizada. Actualmente en Europa se considera rentable un parque eólico que llegue a producir el equivalente a 2000 h/año a potencia nominal de las aeroturbinas, lo que significa un factor de utilización del 23%.

#### 5.4 Biomasa.

Es la única fuente de energía renovable que no resulta gratuita ni instantánea. Requiere de un ciclo que como mínimo requiere un año (plantación, cultivo, recolección, tratamiento, transporte, distribución y conversión). Sin embargo, no sufre la intermitencia del resto de las energías renovables<sup>6</sup>. La biomasa es materia vegetal que fija la energía solar por fotosíntesis y por materia animal. La eficiencia media de conversión de radiación solar a biomasa de los vegetales está entre 0'5 y 2'5%. A pesar del bajo valor, la extensión es muy grande, por lo que las reservas son importantes.

Mediante su combustión se genera vapor de agua que mueve una turbina con un generador acoplado a su eje, siendo una combustión de la que se obtiene en principio agua y CO<sub>2</sub> como únicos productos.

#### 5.5 Biocombustibles.

Su origen se encuentra en la biomasa. Generalmente se reserva este nombre para los que son líquidos, aunque también existen en estado sólido y gaseoso. En estado sólido presentan el inconveniente de que su transporte resulta caro debido a su baja densidad, lo que origina la necesidad de tratar estos materiales compactándolos para hacer su transporte más económico. En estado líquido encontramos el alcohol metílico o metanol y el alcohol etílico, ambos producidos por la fermentación húmeda de la biomasa azucarada. Por regla general se utilizan para mejorar el índice de octanaje de las gasolinas, o añadiéndoselos al diesel para formar biodiesel. Mientras que los biocombustibles sólidos se utilizan en calderas para producir vapor de agua, los biocombustibles líquidos pueden ser utilizados en máquinas térmicas, lo que ha suscitado un gran interés por estos nuevos tipos de combustible, aunque rodeado de una gran polémica debido a la utilización de grandes cantidades de cultivos, válidos para la alimentación humana como la soja y el girasol, en su fabricación.

#### 5.6 Cogeneración.<sup>7</sup>

La cogeneración es una tecnología basada en la producción simultánea de energía eléctrica y de calor útil. Sustituyendo las calderas utilizadas para producir calor por un motor, se puede obtener energía térmica, además de energía eléctrica para uso local o para su venta al mercado.

En lo referente a las características del sistema, se destaca como su mayor inconveniente que el motor produce electricidad y calor en proporción fija, mientras que el consumo de ambas no tiene porque estar en esa proporción. En el lado opuesto, encontramos como principales ventajas la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente, la mejora de la eficiencia de los procesos energéticos y el suministro asegurado a zonas aisladas de la red.

---

<sup>6</sup> No obstante está sometida a la climatología a lo largo de la etapa de crecimiento de la planta, modificándose con ello la magnitud de la cosecha.

<sup>7</sup> Véanse los apuntes de la asignatura "Instalaciones fluidotérmicas" de Pedro Rodríguez Aumente.

## 5.7 Otras energías.

### - Energía geotérmica.

Como consecuencia del calor existente en el núcleo de la tierra y de los procesos tectónicos que ocurren entre placas, la superficie terrestre manifiesta un flujo calorífico de  $50 \text{ W/m}^2$ , lo que corresponde a un gradiente de  $3^\circ\text{C}$  cada 100 metros de profundidad. La capacidad de aprovechar este flujo está limitada a ciertas partes del planeta, siendo dos las formas principales:

- a) *Geotérmica profunda*: se inyecta agua en zonas en las que las rocas estén muy calientes, normalmente próximas al magma de manera que se genera vapor aprovechable.
- b) *Geotérmica superficial*: de uso reciente, aprovecha la temperatura superficial como foco frío o caliente para máquinas térmicas en función de las necesidades existentes. Una variante es utilizar el suelo como depósito de energía térmica.

### - Energía oceánica.

Comprende diversos tipos de energía, en lugares muy concretos. Se clasifica en:

#### a) *Energía de las olas.*

En lugares donde las mareas son de elevada amplitud, lo que permite accionar turbinas especiales. Plantas piloto en Portugal, Inglaterra, Japón y España.

#### b) *Energía del gradiente térmico marino.*

Explotable en los mares tropicales. Aún por demostrar su viabilidad. Se basa en la condensación en la superficie y la evaporación a cierta profundidad de una sustancia especial que acciona una turbina.

#### c) *Energía de las corrientes marinas.*

La elevada densidad del agua hace que con velocidades muy pequeñas las corrientes marinas sean capaces de accionar turbinas.

En el presente capítulo se han expuesto de manera clara las formas actuales de generación eléctrica, sus riesgos e inconvenientes, y los motivos que justifican la necesidad de cambiarlas, junto con sus posibles alternativas. Una vez ubicada la parcela correspondiente a la energía solar, en los próximos capítulos se desarrollará detenidamente la tecnología disco Stirling y todas sus consideraciones de funcionamiento y de diseño. Así, posteriormente se realizará un análisis comparativo con el resto de los sistemas, viendo que ventajas e inconvenientes presenta la tecnología disco Stirling.

## **CAPÍTULO II:**

### **DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.**

## **1.0 Historia de los sistemas disco Stirling.**

La tecnología de los sistemas disco-motor es la más antigua de las tecnologías solares y se remonta a 1800, cuando varias empresas demostraron la posibilidad de desarrollar sistemas solares basados en los ciclos de Rankine y de Stirling. La tecnología moderna fue desarrollada en la década de 1970 y a principios de 1980 por las compañías United Stirling AB, Advanco Corporation, McDonnell Douglas Aerospace Corporation (MDA), NASA's Jet Propulsion Laboratory, y el DOE. Esta tecnología se basaba en la utilización de tubos de iluminación directa y en pesadas estructuras de elevado coste.

En las últimas décadas, los sistemas disco parabólico han evolucionado tanto en Europa como en EE.UU. hacia la construcción de unidades autónomas conectadas a motores Stirling situados en el foco, con potencias de 7-25 kW. Los sistemas disco Stirling presentan una alta eficiencia en la conversión de la radiación solar en energía eléctrica, entre 25-30%, en condiciones nominales de operación. Además, se pueden conseguir relaciones de concentración superiores a 3.000, lo que permite alcanzar temperaturas entre 650 y 800°C y eficiencias nominales en los motores Stirling entre 30-40%.

La experiencia operacional con sistemas disco Stirling se circunscribe a unas pocas unidades ensayadas fundamentalmente en EE.UU., Europa y Australia, y, aquí en España en la Plataforma Solar de Almería. La primera generación de discos estuvo formada por configuraciones faceteadas de vidrio/metal, que se caracterizaron por unas altas concentraciones ( $C=3.000$ ) y excelentes resultados, pero a precios muy elevados (estimaciones por encima de 300 Euro/m<sup>2</sup> para grandes producciones) y estructuras muy pesadas. El disco Vanguard fue operado en Rancho Mairage (California) en el desierto de Mojave durante un periodo de 18 meses (Febrero 1984-Julio 1985) y llevaba un motor/generador de 25 kW de United Stirling AB. El gas de trabajo era hidrógeno y la temperatura de 720°C. Posteriormente, entre 1984-1988, McDonnell Douglas desarrolló un disco con la misma tecnología pero con algunas mejoras. Se construyeron seis unidades de 25 kW que operaron varias compañías eléctricas. Transferida a Boeing, la licencia de la tecnología la posee el consorcio SES, que desde 1988 está relanzando su aplicación con la denominación de disco SES/Boeing. El nuevo prototipo ha acumulado más de 8.000 horas de operación.

A principios de 2006, se aprobó en California el proyecto Stirling Energy Systems of Arizona 2 (SES 2). Este proyecto podría tratarse de la primera instalación de envergadura de discos Stirling en el mundo. La planta de 300 MW y un total de 12000 discos reflectores con receptores de hidrógeno, se ubicará en el desierto de Imperial Valley. Cabe esperar que este proyecto marque el despegue del mercado para las turbinas Stirling. Además, hay que reseñar otros desarrollos en EE.UU. involucrando a empresas como LaJet, Solar Kinetics, SAIC, Acurex y WG.

En Europa, los principales desarrollos se han llevado a cabo por empresas alemanas (Steinmüller; SBP y SOLO Kleinmotoren). Éstas desarrollaron seis unidades de 9-10 kW, tres de ellas ensayadas en la Plataforma Solar de Almería, con más de 30.000 horas de operación. Se trata de sistemas que conllevan una significativa reducción de costes, aunque a cambio de menores rendimientos. El motor trabaja con helio a 630°C y presenta rendimientos del 20 %, sensiblemente inferior a los planteados por Boeing/SES. El proyecto europeo EURODISH (1998-2001), con participación de empresas españolas (Inabensa, CIEMAT-PSA), mejoró los prototipos anteriores (rediseño del concentrador y motor, revisión y simplificación del sistema de seguimiento y control, utilización de hidrógeno como fluido termoportador, etc.). Se construyeron tres unidades EURODISH ensayadas en Vellore (India), Milán (Italia) y la Plataforma Solar de Almería. Posteriormente, el proyecto alemán ENVIRODISH (2002-2005), además de incorporar mejoras de los componentes del prototipo EURODISH, comenzó a preparar su introducción en el mercado. Así, en el año 2004 se construyeron tres unidades de referencia en Odeillo (Francia), Sevilla y Würzburg (Alemania). La potencia generada por las dos últimas se vende a tarifa de las redes eléctricas española y alemana.

En Australia, ya en el año 1978, el *Energy Research Center* (ERC) de la Universidad de Camberra construyó en White Cliffs una de las primeras centrales termoeléctricas del mundo, constituida por 14 discos parabólicos de 20 m<sup>2</sup> que funcionaron durante varios años. *Solar*

*Systems* convirtió la planta termoeléctrica en fotovoltaica. Posteriormente, ERC construyó y ensayó un disco parabólico de 400 m<sup>2</sup> y 50 kW. *Solar Systems* también ha construido desde entonces varios prototipos de discos parabólicos.

Los logros que se están alcanzando (hibridación, optimización de procedimientos de arranque y control, etc.) hacen prever unos costes de generación inferiores a 0.12-0.17 Euro/kWh a corto plazo. No obstante, pese al enorme potencial a largo plazo de esta tecnología, debido a sus elevadas eficiencias y su modularidad, la limitación en cuanto a su potencia unitaria (inferior a 25 kW) obstaculiza muchas aplicaciones que pretenden la producción eléctrica a gran escala. Así, tienen su aplicación más obvia en la producción de electricidad para autoconsumo en lugares aislados donde no llegue la red eléctrica (bombeo de agua en pozos, suministro de electricidad a núcleos de viviendas rurales, etc.), donde cabe esperar que puedan competir con sistemas ya comerciales como los fotovoltaicos o los generadores diesel.

## 2.0 Descripción del sistema<sup>8</sup>

Los sistemas de disco parabólico son pequeños equipos de generación de energía que convierten la energía térmica de la radiación solar en energía mecánica y luego en energía eléctrica, de la misma manera que las centrales eléctricas convencionales convierten la energía térmica de la combustión de un combustible fósil en electricidad. Como se indica en la Figura 6, los sistemas disco parabólico utilizan un conjunto de espejos para reflejar y concentrar la radiación proveniente de los rayos del sol en un receptor, con el fin de alcanzar las temperaturas necesarias para convertir eficientemente el calor en trabajo. La radiación solar concentrada es absorbida por el receptor y transferida a un motor. Esto exige que el plato siga la trayectoria del sol en dos ejes.

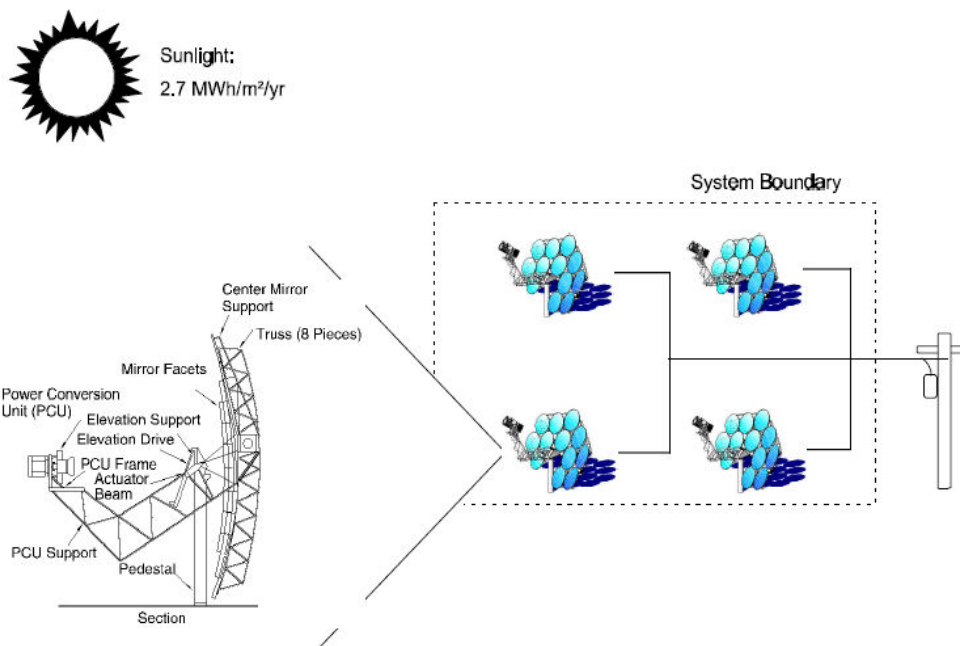


Figura 6. Disco Stirling, sistema esquemático. La combinación de cuatro unidades de 25 kW mostrada aquí es representativa de una posible aplicación de potencia.

Los sistemas disco motor se caracterizan por una gran eficacia, modularidad, funcionamiento autónomo, y una inherente capacidad híbrida (la capacidad para operar o con energía solar o

<sup>8</sup> El documento más completo al respecto es "A Compendium of Solar Dish Stirling Technology" de William B. Stine, profesor del Departamento de Energía Mecánica de la Universidad Politécnica de California. También es de interés el documento "Solar Dish Engine" del Departamento de Energía de Estados Unidos. Debe tenerse en cuenta el desfase de ambas referencias al ser documentos de mediados y finales de los noventa respectivamente. Para conocer la última generación de sistemas disco Stirling véase el documento "Progress in the european dish Stirling technology the eurodish Project" de Vittorio Brignoli, del Centro Electrotécnico Experimental de Italia (CESI).

con combustible fósil, o ambas cosas). De todas las tecnologías solares, los sistemas disco Stirling han demostrado el más alto coeficiente de conversión de energía solar a eléctrica (29,4%), y por tanto, el potencial para convertirse en una de las menos costosas fuentes de energía renovables. La modularidad del sistema le permite operar de manera individual para aplicaciones remotas, o agruparse en pequeños grupos y conectarse a la red (village power o granja). Los sistemas disco Stirling pueden funcionar también con un combustible fósil para proporcionar energía las 24 horas, conectando por ejemplo un quemador de gas al receptor. Esta tecnología se encuentra en la etapa de desarrollo y los técnicos siguen enfrentándose con desafíos en relación con los componentes más idóneos para trabajar con energía solar y con la capacidad comercial de un motor capaz de funcionar con la energía del sol. A continuación se describen los componentes del sistema disco Stirling y sus aplicaciones posibles en la actualidad.

### 3.0 Componentes del sistema.<sup>9</sup>

Básicamente un sistema disco Stirling consta de los componentes que se pueden observar en la Figura 7:

- Concentrador solar parabólico.
- Sistema de seguimiento del sol.
- Intercambiador de calor solar (Receptor).
- Motor Stirling con generador.

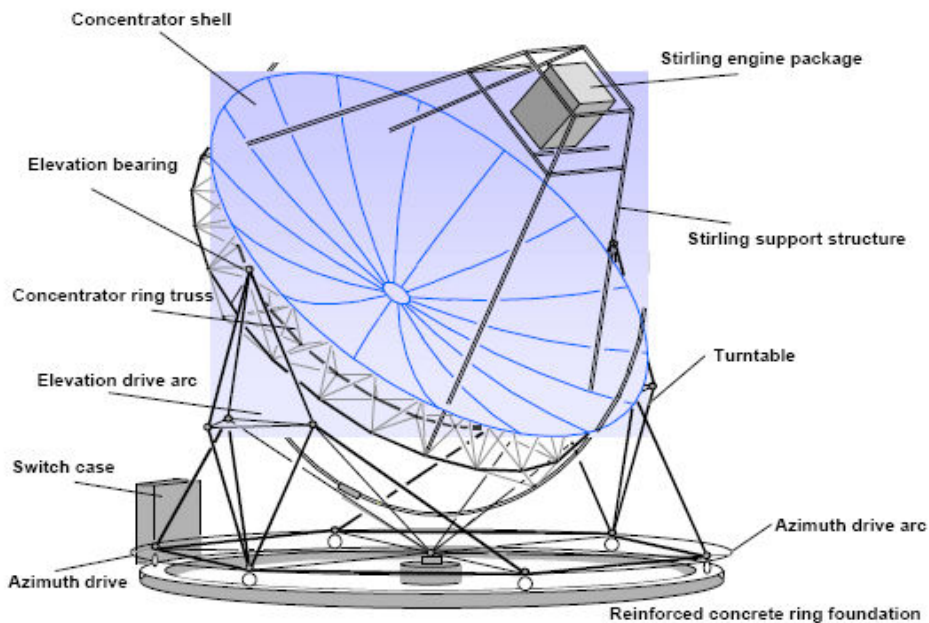


Figura 7. Elementos básicos de un sistema disco Stirling. En la imagen prototipo Eurodish.

#### 3.1 Concentradores

Los sistemas disco Stirling utilizan concentradores solares que realizan el seguimiento del sol en dos ejes. Estos concentradores poseen una superficie reflectante que, ya sea de metal, de vidrio o de plástico, refleja la radiación solar incidente en una pequeña región llamada foco, o zona focal. El tamaño del concentrador solar para los sistemas disco Stirling está determinado

<sup>9</sup> Información obtenida del documento "EuroDish-Stirling System Description" de la empresa SBP, disponible en [www.sbp.com](http://www.sbp.com).

por el motor utilizado. Con un máximo directo de irradiación solar de  $1000 \text{ W/m}^2$ , un sistema disco Stirling de 25-kW tendrá un diámetro del concentrador de aproximadamente 10 metros.

Los concentradores utilizan superficies reflectantes de diversos materiales. Por ejemplo, los concentradores utilizados por la empresa SBP se realizan con planchas de plástico reforzado y con fibra de vidrio como se observa en la Figura 8 (El concentrador de dicha figura consta de 12 segmentos reflectantes realizados con una resina de fibra de vidrio, que unidos forman un parábola casi perfecta. Para mantenerlos unidos se utilizan vigas rígidas en forma de anillo). Las superficies de reflexión más duraderas han sido espejos de plata y vidrio, similares a los espejos decorativos utilizados en el hogar. Los intentos de desarrollar a bajo coste películas reflectantes poliméricas han tenido un éxito limitado debido a su rápida degradación. Como los discos concentradores tienen longitudes focales cortas, se necesitan espejos de cristal relativamente delgados (espesor de aproximadamente 1 mm) para poder conseguir las curvaturas requeridas. Además, es deseable que el cristal posea un bajo contenido de hierro para mejorar su capacidad para reflejar la luz. Dependiendo del espesor y de los materiales que se utilicen, los espejos solares tienen rendimientos de reflexión en un rango del 90 a 94%.



*Figura 8. Imagen de un concentrador de 8'5 metros de diámetro de SBP.*

El concentrador de forma ideal es un paraboloide de revolución. Algunos concentradores solares aproximan esta forma con múltiples espejos en forma esférica sujetos mediante una estructura apropiada (Figura 9). La tendencia general en el diseño de los concentradores solares de las generaciones anteriores fue el uso de membranas-estiradas, en las que una fina membrana reflectante se extendía a través de una llanta o un aro. Una segunda membrana se utilizaba para cerrar el espacio por detrás, con lo que generando un vacío parcial en este espacio, se conseguía que la membrana que refleja la luz adoptase una forma aproximadamente esférica. La Figura 9 es un esquema de un sistema disco Stirling que utiliza este concepto.

El diseño óptico del concentrador y su precisión determinan el coeficiente de concentración. El coeficiente de concentración, que se define como flujo medio solar que atraviesa la apertura del receptor, dividido por la irradiación solar normal directa del ambiente, es típicamente más de 2000, lo cual permite obtener temperaturas de operación muy altas. Las fracciones interceptadas, que se definen como el porcentaje del flujo de energía solar reflejada a través de la apertura del receptor, son por lo general más del 85%.

El seguimiento en dos ejes se puede realizar de dos maneras: (1) seguimiento de elevación-acimutal, y (2) el seguimiento en coordenadas polares. Con seguimiento de elevación-acimutal, el plato gira en un plano paralelo a la tierra (acimut) y en otro plano perpendicular a ella (la altitud). Estos sistemas proporcionan al colector la capacidad de rotar a izquierda / derecha y arriba / abajo mediante el uso de un pequeño servomotor.

La tasa de rotación varía a lo largo del día, pero se puede calcular fácilmente. La mayoría de los sistemas disco Stirling más grandes utilizan este método de seguimiento (un programa de ordenador predice la posición del sol en cada momento). En el método de rastreo polar, el colector gira en torno a un eje paralelo al eje de rotación de la tierra. En la actualidad, su



escaso uso se da en sistemas pequeños (la orientación hacia el sol es determinada por un sensor de seguimiento).

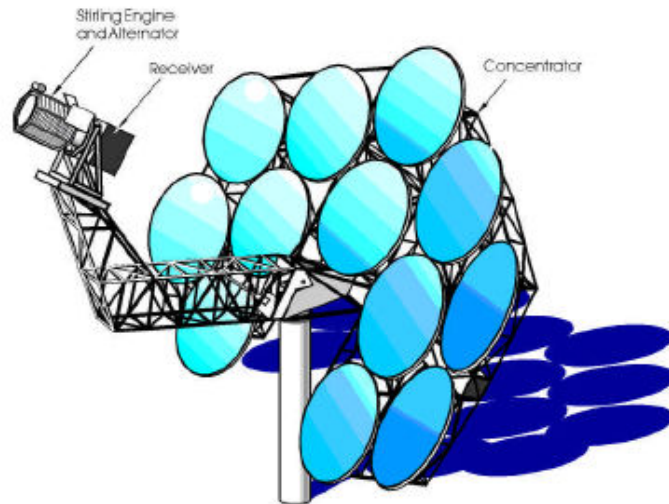


Figura 9. Esquema de un concentrador con sistema de espejos de membrana estirada.

### 3.2 Receptor<sup>10</sup>

El receptor es el enlace entre el concentrador y el motor Stirling. Tiene dos tareas fundamentales:

- Absorber la radiación solar reflejada por el concentrador.
- Transmitir esta energía absorbida al motor Stirling en forma de calor con las mínimas pérdidas.

Los receptores empleados en los discos parabólicos son receptores de cavidad (aunque el empleo de receptores externos presenta algunas ventajas para sistemas de baja temperatura), en los que la radiación concentrada entra por una apertura (situada en el foco del paraboloide) incidiendo posteriormente sobre el absorbedor. De esta forma se consiguen disminuir las pérdidas radiativas y convectivas, así como homogeneizar el flujo radiante incidente sobre el absorbedor y reducir su valor máximo.

Hay dos tipos de receptores utilizados en sistemas disco Stirling: receptores de tubos de iluminación directa (DIR) y los receptores de reflujos.

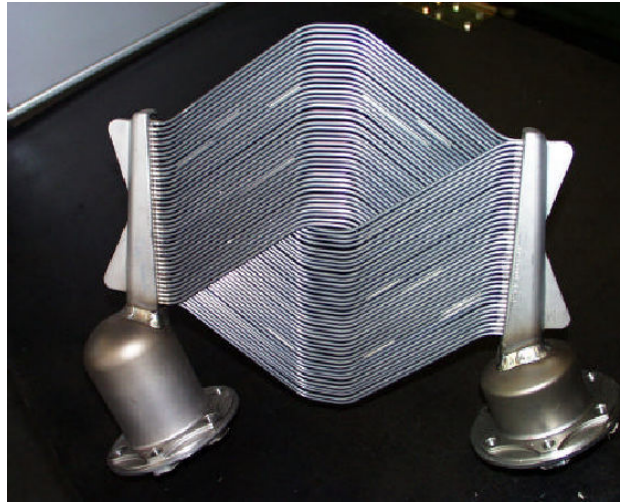
#### 3.2.1 Receptores de tubos de iluminación directa

Los receptores directamente iluminados permiten una adaptación directa del calentador de los motores Stirling convencionales. En estos receptores el absorbedor está formado con un haz de tubos por donde circula el fluido de trabajo del motor (helio o hidrógeno) altamente presurizado (5-20 MPa). La radiación incide directamente sobre estos tubos y es transformada en energía térmica y transmitida al fluido de trabajo. Las altas temperaturas de trabajo de estos absorbedores (del orden de 800°C) dificultan el empleo de recubrimientos selectivos por el gran solape de la radiación emitida y absorbida. Un inconveniente de estos receptores es la falta de uniformidad en el flujo de radiación incidente en el absorbedor, lo cual trae como consecuencia

---

<sup>10</sup> Además del documento "EuroDish-Stirling System Description" de la empresa SBP, son de interés los documentos "Mass Transport, Corrosion, Plugging and their Reduction in Solar Dish Stirling Heat Pipe Receivers" de Douglas R. Adkins, y "Dish Stirling Hybrid Heat Pipe Receiver Design and Test Results" de James Moreno, ambos del Sandia National Laboratories de los Estados Unidos, California 2002.

el que la temperatura de los tubos absorbedores presente picos, limitando por tanto la máxima temperatura del fluido de trabajo para evitar sobrepasar la máxima temperatura permitida en los materiales. La Figura 10 muestra un receptor de este tipo.



*Figura 10. Receptor de tubos iluminados directamente.*

### 3.2.2 Receptores de refluj

Este tipo de receptores emplea un fluido intermedio para la transmisión del calor, generalmente un metal líquido (normalmente sodio), mediante su evaporación en la superficie del absorbedor y su condensación en los tubos por donde circula el fluido de trabajo. Al condensar el metal líquido, por gravedad regresa a la superficie del absorbedor. En la actualidad se intenta emplear este tipo de receptores debido a las ventajas que presentan:

- La gran capacidad de transmisión del calor de los metales líquidos (hasta  $800 \text{ W/cm}^2$ ) permite desarrollar receptores más pequeños.
- Mediante la condensación de este metal líquido se consigue un calentamiento más uniforme del fluido de trabajo, y este se produce realmente a temperatura constante, lo que permite trabajar con temperaturas máximas del fluido de trabajo más cercanas a las máximas admisibles por los materiales.
- Permite el diseño independiente de receptor y motor, evitando los compromisos de diseño entre ambos que limitaban el rendimiento en el caso de los receptores de tubos directamente iluminados.
- Se facilita la hibridación del sistema.

Se distinguen dos tipos de receptores de refluj:

- Receptor de tipo "pool boiler". En este caso hay una poza de metal líquido siempre en contacto con el absorbedor, donde se produce la evaporación del metal, que posteriormente se desplaza hacia el calentador del motor
- Receptor de tubo de calor (heat pipe). En este caso el líquido metálico asciende por fuerzas de capilaridad por unas mechas situadas en la parte posterior del absorbedor, de donde se evapora para ir a condensar en el calentador del motor. Las gotas de metal líquido condensan aquí y por gravedad caen al absorbedor donde mojan las mechas y empiezan a subir por capilaridad. La reserva de metal líquido dentro del receptor es, en este caso, mucho más pequeña. La Figura 11 muestra un receptor de tubo de calor.

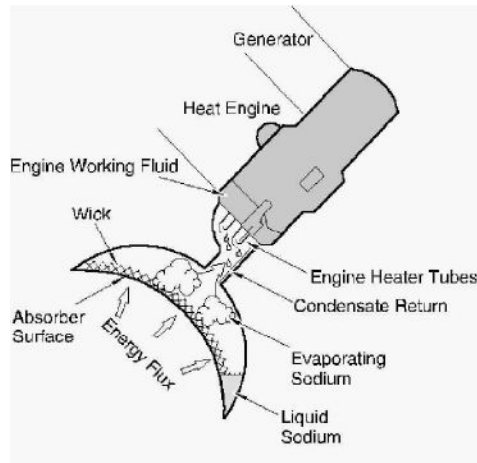


Figura 11. Esquema que muestra el funcionamiento de un receptor solar de tubo.

La configuración tubo de calor tiene la ventaja de su mayor seguridad asociada a una menor reserva de metal líquido para llevar a cabo la transmisión de calor. Por otro lado, al tener menor masa térmica presenta una respuesta más rápida a los transitorios y unas menores pérdidas térmicas durante los mismos. Además, es posible emplear este receptor para sistemas que implementen los dos tipos de seguimiento del sol comentados (acimut-elevación, polar declinación), mientras que el “pool boiler” sólo se presta fácilmente a su integración en el seguimiento acimut elevación. La desventaja del receptor tubo de calor frente al “pool boiler” es la existencia de un mayor número de ciclos térmicos en motor y receptor durante días nublados, así como una mayor variación en la potencia de salida.

Además de la clasificación anteriormente establecida, se puede establecer otra en función de la fuente de la que obtiene el calor el receptor. En general existen dos tipos de receptores. Los de la primera clase que solo funcionan con luz solar y no pueden operar durante la noche, y los que poseen un tipo de receptor híbrido, los cuales están equipados con quemadores de gas y que pueden operar durante todo el día.

En el proyecto Eurodish, se desarrolló un receptor de tubos que se conectaba directamente a las cabezas de los cilindros del motor Stirling. El receptor consistía en unos tubos muy delgados, de aproximadamente 3mm de diámetro, los cuales eran muy resistentes a temperaturas elevadas (receptor de tubos directamente iluminados). Formaban un área prácticamente cerrada que era la cara absorbente. La radiación solar concentrada elevaba la temperatura del gas de trabajo a una temperatura de unos 650°C.

Además de la cara absorbente de radiación solar, el receptor híbrido está equipado con un quemador de gas. De este modo, el motor Stirling puede operar cuando el sol está cubierto por nubes o incluso en la oscuridad. El sistema disco Stirling híbrido tiene la ventaja de estar disponible las 24 horas del día. Por lo tanto, este sistema puede ser el sustituto ideal de los motores diesel que en la actualidad ocupan un porcentaje del mercado de la pequeña generación aislada muy elevado.

### 3.3 Equipos auxiliares

Alternador: es el dispositivo de conversión de la energía mecánica en eléctrica utilizado en los sistemas disco Stirling. Los motores Stirling utilizan generadores de inducción para poder acoplarse a la red. Al sincronizarse los generadores con la red estos pueden suministrar potencia trifásica, ya sea a 230 o a 460 voltios. Estos generadores son capaces de convertir la energía mecánica en electricidad con una eficiencia de alrededor del 94%. El sistema dispone de unos inversores que convierten la corriente continua en alterna. Ello permite emplear máquinas de corriente continua como generadores, pudiendo funcionar a régimen de giro variable, teniendo con ello más flexibilidad para adaptarse a la demanda de electricidad instantánea.

Sistema de refrigeración: los motores necesitan transferir al medio ambiente grandes cantidades de calor debido a sus capacidades estructurales. Los motores Stirling utilizan un radiador para realizar el intercambio de calor entre el motor y la atmósfera.

Controles: el modo de funcionamiento autónomo se logra mediante el uso de controladores electrónicos situados en el plato para el control de la función de seguimiento y para regular el funcionamiento del motor. Algunos sistemas utilizan un controlador de motor por separado. En las grandes instalaciones existe un Sistema de Control y de Adquisición de Datos (SCADA) que se utiliza para poder monitorizar y supervisar el funcionamiento del sistema, y para recoger sus principales datos de funcionamiento, de manera sincronizada con otras instalaciones de producción de energía eléctrica.

### 3.4 Motores.<sup>11</sup>

El ciclo Stirling es el ciclo termodinámico más eficiente para transformar calor en energía mecánica o eléctrica. Entre las características de un motor Stirling destaca que es un motor de combustión externa, dependiendo su funcionamiento del aporte de calor externo que se realice, con independencia del modo en que se genere dicho calor. Además, el motor Stirling casi no produce ruido o vibraciones y posee un ciclo de vida potencial extraordinariamente alto, ya que no hay contaminación interna ni de los pistones, ni de los cojinetes, ni degradación del lubricante al no existir combustión de combustibles fósiles.

El motor en un sistema disco Stirling convierte el calor en energía mecánica de una manera similar a los motores convencionales, por la compresión de un fluido de trabajo cuando está frío, el cual se calienta durante la compresión y que, a continuación, se expande a través de una turbina o con un pistón para producir trabajo. Posteriormente, la energía mecánica se convertirá en energía eléctrica gracias a un generador de energía eléctrica o alternador. Existen diversos ciclos termodinámicos y fluidos de trabajo que pueden funcionar con sistemas disco-motor. Estos incluyen los ciclos de Rankine, utilizando agua o un fluido de trabajo orgánico; Brayton, abierto y ciclos cerrados, y los ciclos de Stirling. Los motores más utilizados son por lo general el Stirling y el ciclo abierto de Brayton (turbina de gas). El uso de motores convencionales de automoción Otto y Diesel no es factible. En estos sistemas disco-motor el calor también puede ser suministrado por un quemador de gas suplementario para permitir funcionamiento durante tiempo nublado y por la noche. La producción eléctrica actual de los prototipos de sistemas disco Stirling es de alrededor de 25 kWe, existiendo unidades más pequeñas de 5 a 10 kWe. En la Figura 12 se muestra el motor Stirling utilizado en el proyecto Eurodish, desarrollado por Schlaich Bergermann und Partner con la empresa SOLO.



Figura 12. Imagen del motor Stirling V161 con receptor solar.

---

<sup>11</sup> Las páginas [www.stirlingengine.com](http://www.stirlingengine.com) y [www.solo.com](http://www.solo.com) presentan gran cantidad de información acerca de motores Stirling de todo tipo, incluyendo los de aplicación solar.

### 3.4.1 Ciclo de Stirling.

Los motores de ciclo Stirling utilizados en sistemas solares de alta temperatura utilizan hidrógeno o helio como gas de trabajo a elevada presión. La temperatura de trabajo del gas puede llegar a sobrepasar los 700°C, y la presión alcanzada puede ser de hasta 20 MPa en modelos de alto rendimiento. En el ciclo Stirling, el fluido de trabajo es alternativamente calentado y enfriado en procesos a temperatura constante y a volumen constante. Por lo general los motores Stirling incorporan un regenerador para conseguir una mejora de la eficiencia. El regenerador capta el calor durante la refrigeración a volumen constante y lo suministra cuando el gas se calienta a volumen constante. La Figura 13 muestra los cuatro procesos básicos de un motor de ciclo Stirling.

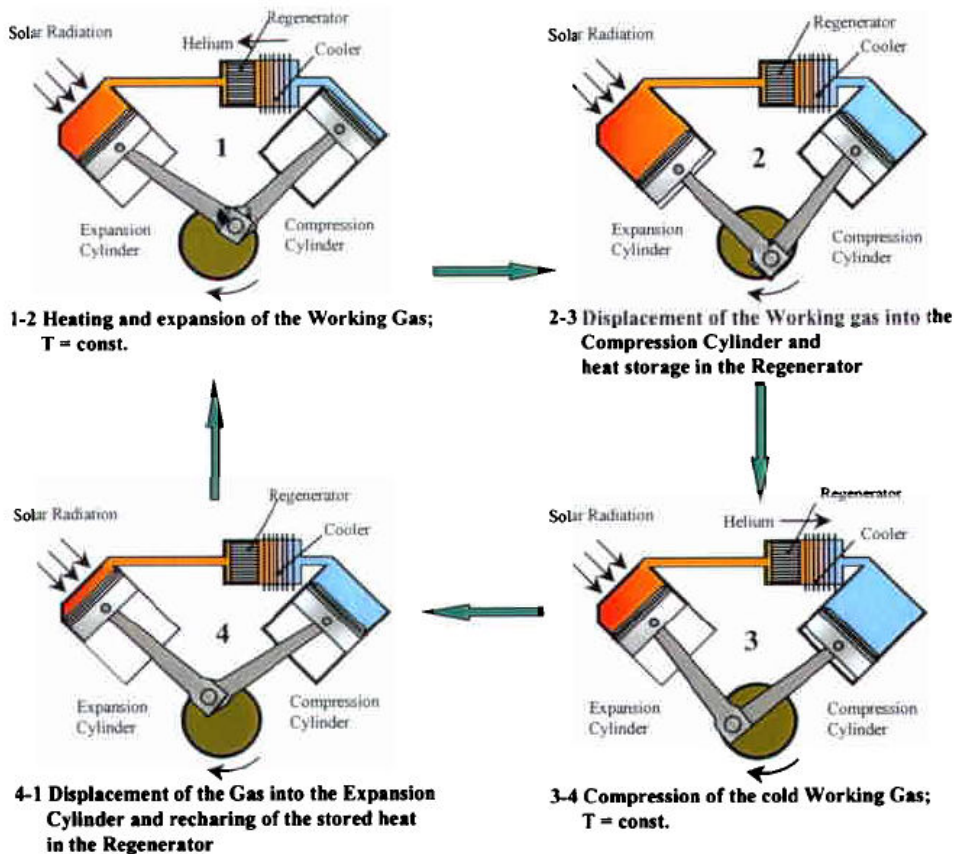


Figura 13. Esquema que muestra el principio de funcionamiento de un Motor Stirling.

En la versión más simple, un motor Stirling consiste en un sistema herméticamente cerrado con dos cilindros (cilindros de expansión y compresión) lleno de un gas de trabajo (por ejemplo helio). Los pistones de esos cilindros están conectados a un cigüeñal. Cuando el gas de trabajo en el cilindro de expansión (cilindro de trabajo) es calentado (por el sol), este se expande debido al aumento de temperatura, empujando el pistón hacia abajo (Figura 13 1-2) induciendo potencia. Parte de esa potencia se utiliza para empujar el fluido de trabajo caliente desde el cilindro de expansión hacia el cilindro de compresión (Figura 13. 2-3). En su recorrido, el gas de trabajo atraviesa el regenerador donde la mayor parte de su calor es almacenado. Entonces pasa a través de un enfriador de gases refrigerado por agua donde se enfriará (2-3). Una vez que el gas de trabajo se encuentre completamente en el cilindro de compresión, este pistón sube debido a la inercia del cigüeñal, comprimiendo el gas de trabajo a baja temperatura (3-4). El gas vuelve al cilindro de trabajo reabsorbiendo el calor cedido en el regenerador (4-1).

La expansión total del gas caliente en el cilindro de trabajo entrega más energía de la necesaria para la compresión del gas frío en el cilindro de compresión. Este excedente de energía puede ser utilizado para hacer funcionar un generador eléctrico conectando su eje directamente al cigüeñal del motor.

### 3.4.2 Ciclo de Brayton<sup>12</sup>

A pesar de que el presente documento se centra en los sistemas disco Stirling, existen otras posibles configuraciones, ya sea utilizando un ciclo de Rankine o uno de Brayton.

El motor de Brayton, o turbina de gas, es un motor de combustión interna que produce energía mediante la quema controlada de combustible<sup>13</sup>. El funcionamiento de una turbina de gas es similar al igual de los motores diesel y gasolina, donde primero se comprime el aire, se añade el combustible y la mezcla se quema. En un sistema disco parabólico con turbina de gas, el calor solar se utiliza para sustituir (o complementar) el combustible. El gas caliente resultante se expande rápidamente y se utiliza para producir energía. En la turbina de gas, la quema es continua, y la producción de energía se realiza gracias a su expansión en una turbina cuyo eje se conecta con un alternador.

Al igual que en el sistema disco Stirling, la recuperación del calor residual es un elemento clave para lograr alta eficiencia. Para ello, el calor residual a la salida de la turbina es utilizado para precalentar el aire del compresor. Un esquema de un sistema de un único eje se muestra en la Figura 14. La utilización de un intercambiador (recuperator en la imagen) consigue temperaturas de entrada en la turbina próximas a los 850°C. Se cree que en próximas generaciones estos sistemas superarán el 30% de eficiencia en la conversión de energía térmica a eléctrica.

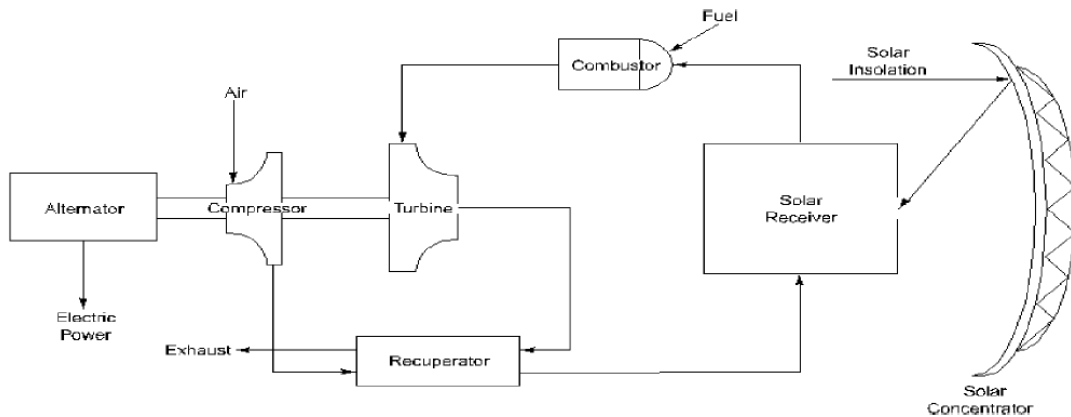


Figura 14. Esquema de un sistema disco parabólico con ciclo Bryton.

<sup>12</sup> Acerca del funcionamiento de las turbinas de gas véase “Turbomáquinas. Procesos, análisis y tecnología” de Antonio Lecuona y de José Ignacio Nogueira, ed. Ariel.

<sup>13</sup> Aunque puede operar también con una fuente térmica externa sustituyendo la cámara de combustión por un intercambiador de calor, igual que lo hace el motor Stirling.

**CAPÍTULO III:**

**ASPECTOS OPERATIVOS.**

**EFICIENCIA DEL SISTEMA.**

## 1.0 Análisis detallado del sistema en operación.<sup>14</sup>

Como primer punto a desarrollar dentro de los aspectos operativos de los sistemas disco Stirling, se presenta un análisis detallado del sistema en operación, en el que se mostrarán los resultados de las mediciones realizadas por el CNRS-PROMES (Centro Nacional Francés de Investigaciones) a una unidad de 10 kW situada en Odeillo (Francia), para poder tener una idea razonable del comportamiento de estos sistemas en funcionamiento mediante el cálculo de su rendimiento.

### 1.1 Análisis del sistema. Mediciones de interés

En los sistemas disco Stirling la energía solar recibida es concentrada y absorbida para producir energía eléctrica. Para ello, la luz incidente debe pasar por distintos componentes en los cuales se producen pérdidas. A continuación se describe dicho proceso y se enumeran las distintas pérdidas.

En primer lugar la luz es reflejada por el concentrador hacia el punto focal. En dicho concentrador las principales causas de reducción de la energía producida son la capacidad de reflejar la luz del espejo y las zonas de sombra producidas por otros componentes estructurales. De la energía reflejada sólo una porción entra en la apertura de la cavidad. Allí, no toda la energía es absorbida por el receptor, ya que parte de ella es reflejada hacia las paredes de la cavidad. Así pues, en las paredes calientes de la cavidad se producirán pérdidas por radiación y por convección. Posteriormente, la energía térmica se convierte en energía mecánica en el motor Stirling, donde las pérdidas más significativas se producen debido a la necesidad de refrigerar el motor y de evacuar el calor residual no aprovechado por el ciclo Stirling cerrado, aunque también se producen otras de menor importancia por convección y radiación en las paredes del motor, debido a las altas temperaturas que alcanzan. Finalmente, el generador convertirá gran parte de la energía mecánica en electricidad, disipándose el resto de la energía. En la Figura 15 se presenta el esquema del sistema con sus principales pérdidas.

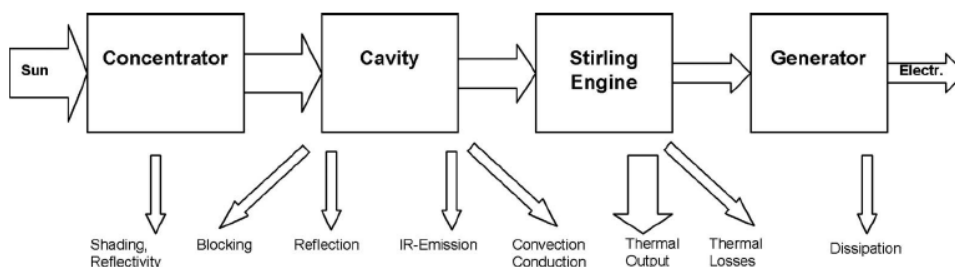


Figura 15. Flujo de energía en un sistema disco Stirling.

Así, para conocer la eficiencia del sistema se necesita conocer el valor la energía de entrada y la energía eléctrica producida por el motor, ya que su valor es el cociente entre ambas.

En primer lugar, para poder calcular la energía de entrada al motor se realizan mediciones precisas de las características ópticas de los distintos componentes. El valor de dicha energía dependerá de consideraciones geométricas y de las condiciones del ambiente. Esta energía de entrada deberá ser igual a la suma de la energía térmica y mecánica de salida del motor Stirling, medidas en el mismo instante.

---

<sup>14</sup> Los datos recogidos en el presente apartado proceden mayoritariamente del documento "Detailed Performance Analysis of a 10 kW Dish/Stirling System" de W. Reinalter, S. Ulmer y P. Heller del Centro Aeroespacial Alemán, Instituto de Termodinámica Aplicada de Stuttgart, y de la Plataforma Solar de Almería, y de J. M. Gineste y A. Ferriere del PROMES-CNRS Laboratory francés, Febrero 2008.



El comportamiento óptico del concentrador puede ser determinado con una medición del flujo de energía solar recibido por el sistema. Con este método, la radiación concentrada que entra en la cavidad y la proporción de ella que golpea directamente el receptor puede determinarse con precisión, cuando la irradiación directa normal y el coeficiente de reflexión del concentrador son conocidos. Las propiedades ópticas del material, y las geometrías de la cavidad y del receptor son conocidas, lo que permite una buena aproximación de la reflexión y de las pérdidas térmicas.

Por el lado de salida del motor, se necesitan medidas precisas de la energía eléctrica y térmica. Dado que la eficiencia del generador es conocida, la energía mecánica del motor Stirling puede deducirse. La energía térmica disipada en el motor Stirling se puede conocer midiendo la temperatura del agua de refrigeración con un calorímetro. A continuación se enumeran los principales parámetros medidos y el sistema utilizado.

#### 1.2 Medición de la energía solar recibida.

La medición exacta de la energía solar incidente es crucial. Para ello se utilizan dos piranómetros que miden las componentes horizontales global y difusa, y un pirheliómetro que mide la irradiación normal directa. La desviación de la medida puede ser de un 3'5% para los piranómetros y de un 1'5% para el pirheliómetro.

#### 1.3 Sistema de medición del flujo incidente.

Se utilizan distintos sensores y equipos de medición que suministran información analizada por un programa informático. Para lograr una correcta medición se tiene especial cuidado en el calibrado de los dispositivos. El margen de error de este sistema se sitúa en un 2'5%.

#### 1.4 Sistema de medida de la energía absorbida por el refrigerante

Para medir con precisión el calor evacuado por el sistema de refrigeración, se calcula la variación de entalpía del refrigerante, o lo que es lo mismo, la variación de entalpía entre el agua de entrada y salida. También se mide el flujo másico de agua. Para realizar dichas medidas se utilizan una serie de sensores de alta precisión. Con este sistema se consigue una incertidumbre en la medida del 4%.

#### 1.5 Sistema de medición eléctrico.

Las mediciones de la energía eléctrica de salida del generador y el consumo de los componentes individuales se realizaron utilizando equipos comunes de medición eléctrica. La eficiencia específica del generador es del 92'5%.

#### 1.6 Medición de la distribución de flujo.

Las mediciones del flujo incidente fueron realizadas en planos perpendiculares al eje óptico. Todos los valores fueron normalizados para una irradiación normal directa de  $1000 \text{ W/m}^2$  y para un 94% de reflexión del espejo. La Figura 16 muestra la distribución de flujo medido en el plano focal.

En dicha figura se observa una distribución próxima a una distribución Gausiana. Dicha distribución tiene una forma prácticamente simétrica en ambos planos al situarse en el plano focal. Posteriormente se mostrará en la Figura 17 como la distribución de flujo recibido se vuelve mucho más dispersa y como aparecen una serie de picos de temperatura en el plano del absorbedor, al alejarnos tan solo unos pocos centímetros del plano focal.

La posición del punto focal es  $x = -15 \text{ mm}$  e  $y = 7 \text{ mm}$  ligeramente a la izquierda y elevado. La Figura 17 muestra la distribución de flujo en el plano de absorción (más de  $120 \text{ mm}$  detrás). La distribución no es homogénea, existiendo un considerable pico de  $1.583 \text{ kW / m}^2$  en la parte superior.

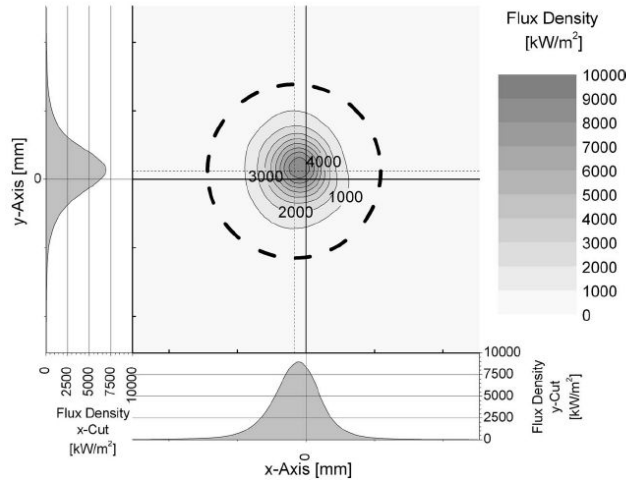


Figura 16. Distribución de flujo normalizado en el plano focal.

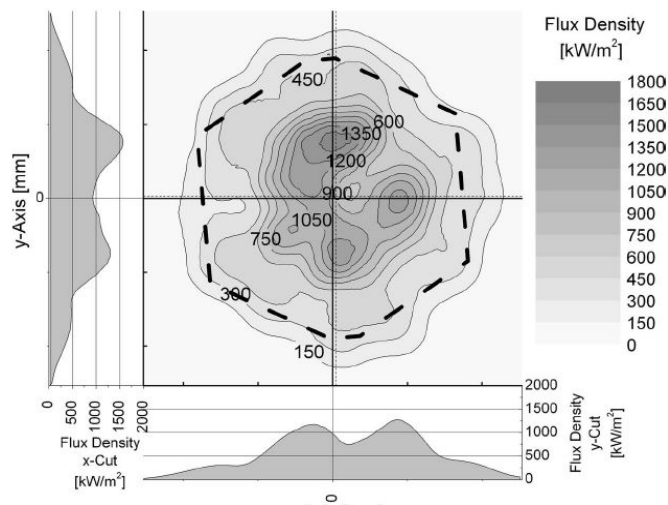


Figura 17. Distribución de flujo normalizado en el plano del absorbedor.

La Figura 18 muestra un diagrama con los valores pico de la distribución de flujo recibido en función de la distancia al plano focal y el porcentaje de energía interceptada. También se muestran los datos para la apertura de 190 mm existente en el receptor.

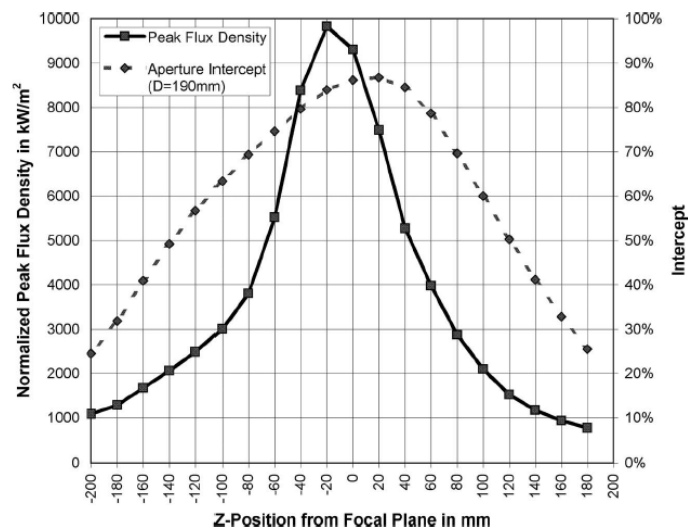


Figura 18. Picos de flujo y mediciones en la apertura del receptor en el sistema Eurodish.

Se puede observar que el plano de máxima concentración no coincide con el de máximo porcentaje de interceptación. El plano focal se sitúa entre ambos. Las líneas de la Figura 19 muestran el porcentaje de la radiación incidente que se intercepta con diferentes radios de la abertura del receptor, en función de la distancia al plano focal, junto a una sección de la cavidad del sistema. Se puede observar que cerca del 15% de la radiación total golpea fuera de la apertura del receptor, entrando el 85% restante en la cavidad.

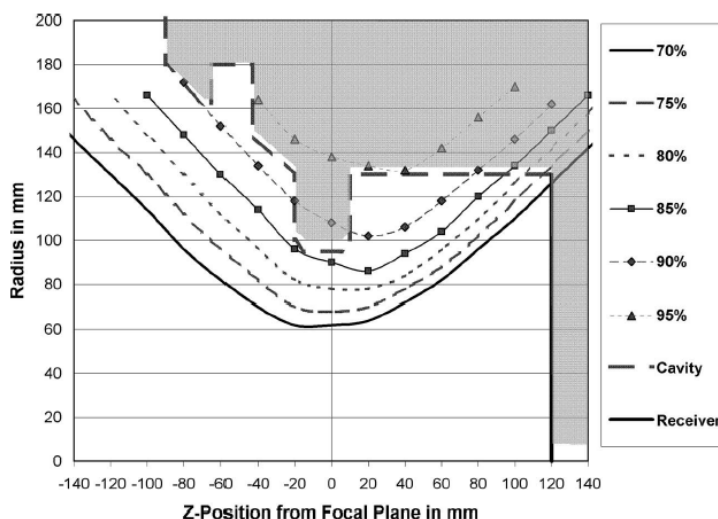


Figura 19. Porcentaje de radiación interceptada en función de la distancia al plano focal y en función del radio de la abertura.

Muy importante en este punto es definir la relación existente entre la distancia al plano focal, los picos de temperatura y el rendimiento global. A medida que nos distanciemos del plano focal, la dispersión de la radiación nos llevará a tener una serie de importantes picos de temperatura en la superficie del absorbedor. Esto puede deberse a ligeras deformaciones en la superficie del concentrador, y trae como resultado el incorrecto funcionamiento del motor, viéndose así reducido el valor del rendimiento de la instalación.

### 1.7 Medida de la energía del sistema.

Debido a la altitud y a la atmósfera tan limpia existente en Odeillo, se produce un aumento muy rápido de la insolación incidente hasta llegar a niveles donde el ventilador de refrigeración del receptor comienza a actuar para eliminar el exceso de calor producido por el concentrador. Esto introduce un nuevo, y desconocido flujo de calor, que hace imposible realizar un balance energético de manera exacta. Además, un sistema disco Stirling nunca funciona en régimen estacionario ya que las condiciones ambientales están en permanente cambio. A esto se añade el sistema de control del motor, que intenta constantemente mantener al motor en su punto de funcionamiento óptimo. Por todo ello, las mediciones fueron realizadas en momentos en los cuales las condiciones existentes eran lo más parecidas posibles a un sistema en equilibrio, con poca variación a lo largo del tiempo de medición. Para reducir aún más el error, se realizaron promedios de los datos tomados cada 5 minutos (dichos datos fueron tomados el 19 de Enero de 2006, con un moderado nivel de insolación de alrededor de  $900 \text{ W/m}^2$  y una baja temperatura ambiente de unos  $5^\circ \text{ C}$ ). Como no toda la energía que fluye por la unidad Stirling puede ser medida, los cálculos han sido realizados de manera que se pudieran cuantificar todas las pérdidas que no se pueden medir. Las consideraciones realizadas para calcular estas pérdidas adicionales incluyen a las pérdidas por reflexión dentro y fuera de la cavidad, la irradiación del receptor y de la cavidad, y las pérdidas en la cubierta de la cavidad por convección, y en la superficie del motor Stirling. Para los cálculos se realizaron una serie de

simplificaciones concernientes a la temperatura, a la distribución del flujo de calor y a la geometría del sistema<sup>15</sup>. Las simplificaciones utilizadas se presentan en la Tabla 1.

Área circular del absorbedor	0'058 m <sup>2</sup>
Radio cavidad cilíndrica	136 mm
Radio apertura cavidad	95 mm
Temperatura homogénea en el absorbedor y en las paredes de la cavidad	850 °C
Temperatura cubierta cavidad	150 °C
Distancia del absorbedor a la apertura	120 mm
Tamaño de la pared de la cavidad que irradia	30 mm
Área de los lados de la cubierta de la cavidad	0'47 m <sup>2</sup>
Velocidad en el paquete	1 m/s
Temperatura en la superficie del motor y en el colector (cárter) de aceite	50 °C
Superficie del motor y del cárter	0'7 m <sup>2</sup>

Tabla 1. Hipótesis adoptadas en el cálculo de las pérdidas no medibles experimentalmente.

Las propiedades del material de la cavidad y de los tubos del absorbedor dependen de la edad del material y de las condiciones ambientales (suciedad, formación de capas de óxido, etc). De acuerdo con los resultados de las mediciones, los valores de las propiedades de los materiales utilizados se muestran en la Tabla 2.

Material	Absorbidad	Reflectividad	Emisividad
Receptor	93'0%	7'0%	88'9%
Cerámica aislante	20'0%	80'0%	90'0%

Tabla 2. Propiedades ópticas de los materiales utilizados.

### 1.8 Balance de energía del sistema

El balance de energía completo para el sistema se presenta en las tablas 3 y 4, donde se incluye la precisión de las medidas o el error estimado en el cálculo realizado. Con un nivel de irradiación de 906 W/m<sup>2</sup> y una reflectividad del 92'5%, el disco suministra una potencia de 44'4 kW al conjunto en el que se sitúa el motor Stirling. Cerca del 15% de la energía no consigue pasar a través de la apertura. Después de eliminar las distintas pérdidas, la energía térmica total transferida al gas de trabajo del motor Stirling se calcula en 31'6 kW, con un error de  $\pm 4'3\%$ .

	Parámetro	Valor	Comentario	Error
<b>Entrada</b>	Insolación normal directa	906 W/m <sup>2</sup>		$\pm 1'5\%$
	Energía procedente del disco	44'4 kW	92'5% reflejado; 53 m <sup>2</sup> de área activa.	$\pm 1'9\%$
	Energía en la apertura	37'75 kW	85% interceptado.	$\pm 3'1\%$
	Reflexión	1'4 kW	Hipótesis.	$\pm 25\%$
	Pérdidas por radiación	2'59 kW	Hipótesis.	$\pm 16\%$
	Convección a través de la apertura	1'0 kW	Hipótesis.	$\pm 25\%$
	Radiación y convección en el motor Stirling	1'13 kW	Hipótesis.	$\pm 50\%$
	Energía térmica al motor	31'63 kW	Considerando pérdidas	$\pm 4'3\%$

Tabla 3. Balance energético de entrada al sistema con porcentaje de error de la medida.

<sup>15</sup> El método utilizado en la simulación se desarrolla en el siguiente capítulo.

	Parámetro	Valor	Comentario	Error
<b>Salida</b>	Energía eléctrica a la salida	10'85 kW		±1'0%
	Energía de salida del motor Stirling	12'25 kW	Considerando cargas parasitarias y eficiencia del generador del 92'5%.	±1'1%
	Caudal de refrigerante	4'92·10 <sup>-4</sup> m <sup>3</sup> /s		±0'17%
	Densidad del refrigerante	1060 kg/m <sup>3</sup>		±0'5%
	Diferencia temperaturas entrada/salida en el motor	9'94 k		±0'1%
	Capacidad calorífica del refrigerante	3574 J/kg·k		±4'0%
	Energía térmica de salida	18'53 kW		±4'0%
	Energía total de salida	30'77 kW		±2'4%

Tabla 4. Balance energético de salida del sistema con porcentaje de error de la medida.<sup>16</sup>

#### 1.9 Eficiencia de los componentes.

Con los resultados presentados en las tablas 3 y 4, se pueden calcular las eficiencias de los distintos componentes. Definiendo la efectividad óptica del concentrador como el producto de la fracción de área sin sombra de la apertura, de la reflectividad, y del factor de interceptación, se calcula dicha efectividad en un 74'4%. La eficiencia del receptor, definida como la proporción de la energía térmica que pasa por la apertura y que llega al motor, se sitúa en el 84'5%. La eficiencia del motor Stirling, cociente entre la energía térmica que se le suministra y la energía mecánica que proporciona es de un 39'4%, bajo las condiciones anteriormente mencionadas. Este valor de eficiencia no puede ser aplicado en general, ya que como todos los motores térmicos, depende mucho de la diferencia de temperatura entre sus dos focos, siendo en este caso muy variable con las condiciones atmosféricas. Después de eliminar las pérdidas que se producirán en el generador, que se sitúan en torno a un 7'5%, y asumiendo que el sistema de seguimiento consume cerca de 100 W, la eficiencia global del sistema, o lo que es lo mismo, la cantidad de energía térmica transformada en energía eléctrica es de un 22'5%.

#### 1.10 Conclusiones.

La aproximación al balance de energía realizado por el NRCS, para este sistema disco Stirling de 10 kW, situado en Odrillo, mediante la medición de las entradas y salidas de energía del sistema, ayuda a comprender las pérdidas individuales en cada componente. Como todas las mediciones tienen una precisión limitada, el error total del balance puede ser elevado. El único error que podría ser despreciado es el del calor perdido en el refrigerante, error que fue determinado con un error del 4%. El proceso de medición fue planeado para ser realizado en verano, usando agua como refrigerante, pero la idea fue desechada y finalmente la medición se llevó a cabo en invierno. El error esperado según los autores era menor, pero aun así se mostraron satisfechos con el resultado del conjunto.

Como podemos ver en las tablas 3 y 4, casi el 30% de la energía recogida por el concentrador no es transferida al motor Stirling. El análisis de las pérdidas en la apertura, hace pensar que el

<sup>16</sup> Todos estos datos se pueden encontrar en el documento "Detailed Performance Analysis of a 10 kW Dish/Stirling System" citado anteriormente.

conjunto concentrador-apertura puede ser optimizado, siendo una de las principales líneas de investigación para el futuro. Si nos centramos solo en la energía interceptada, el diámetro de la apertura debería ser aumentado en algunos milímetros pero esto tendría una influencia negativa en las pérdidas por radiación y convección que se producen en la apertura. Para reducir todas las pérdidas, la calidad óptica del concentrador debería ser mejorada. Quizá, estas mejoras se podrían realizar optimizando o cambiando el proceso de fabricación del concentrador, que en la actualidad es un conjunto de segmentos unidos, y que en el futuro se presentará como uno de los puntos clave a mejorar para aumentar la eficiencia del sistema.

## 2.0 Modelo térmico del sistema disco Stirling.<sup>17</sup>

### 2.1 Introducción.

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos por una modelización térmica de un sistema disco Stirling desarrollado por el CNRS-PROMES (Centro Nacional Francés de Investigaciones), para un sistema perteneciente al proyecto Eurodish, concretamente para una unidad de 10 kW. Se considera relevante el estudio de dicho modelo por dos motivos. El primero es conocer si se dispone de herramientas correctas a la hora de comprobar a priori la posible eficiencia de sistemas de disco parabólico para poder localizar los emplazamientos más adecuados y para comprobar cómo afectan en su funcionamiento posibles cambios. Además, la información de la que se dispone acerca de los sistemas disco Stirling es limitada. La única fuente con datos exactos de la distribución de temperaturas en los tubos del absorbedor y de las pérdidas del sistema es la mencionada modelización. Para poder trabajar con ellos a posteriori, en los puntos siguientes se explica la forma en la que se realiza la modelización, la validez del modelo mediante su comparación con algunos datos conocidos (de manera experimental) del sistema y con ello se obtienen conclusiones de interés para el presente estudio.

### 2.2 Resumen del método.

A continuación se incluye un resumen de los aspectos teóricos del método y posteriormente se presentan los resultados, ya que no es intención del presente estudio centrarse en lo adecuado del método computacional elegido o de lo correcto de las aproximaciones realizadas en el mismo.

El sistema se divide en cinco partes, donde cada una representa un estado dentro de la cascada de conversión, que se representan en la Figura 20. El modelo define cada una de las cinco partes atendiendo a sus características especiales.

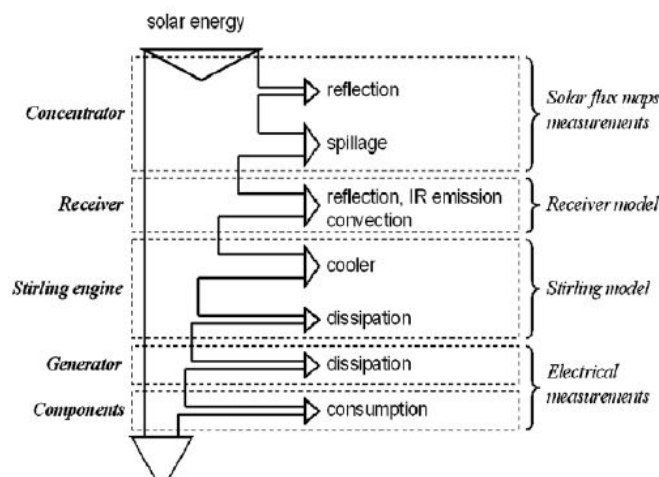


Figura 20. Metodología del modelo.

<sup>17</sup> Véase Francois Nepveu, "Thermal model of a dish Stirling systems", Odeillo 1 de Julio de 2008.

Se tendrán que resolver una serie de ecuaciones, como las que definen las pérdidas térmicas por convección y conducción en los distintos componentes del sistema, la que define el valor del campo de radiación incidente sobre cada superficie, además de realizar los pertinentes balances de energía y de masa en cada componente. Para ello se definirán mallas que representen los sistemas y luego mediante técnicas de elementos finitos se obtendrán los resultados.

### 2.3 Descripción del sistema a modelar.

El área efectiva de la parábola teniendo en cuenta las zonas de sombra es de  $52'9 \text{ m}^2$ , mientras que la reflectividad media del espejo es del  $92'5\%$ . El receptor solar está compuesto de una cavidad cilíndrica de cerámica de  $30 \text{ cm}$  de diámetro, con una apertura de  $19 \text{ cm}$  de diámetro por la que entra la radiación solar concentrada. El absorbedor tiene forma hexagonal y cuenta con  $78$  tubos de  $3 \text{ mm}$  de diámetro. Además, se encuentra situado en la parte inferior de la cavidad.

### 2.4 Modelización del receptor.

Los datos proporcionados por el modelo presentan gran importancia a la hora de analizar los rendimientos del sistema. En la Figura 21 se presenta el mapa del flujo solar en el plano focal para una irradiación normal directa de  $1000 \text{ W/m}^2$  y un  $94\%$  de reflectividad del concentrador. La apertura de la cavidad se sitúa en el plano focal y absorbe el  $85\%$  de la radiación solar concentrada que recibe.

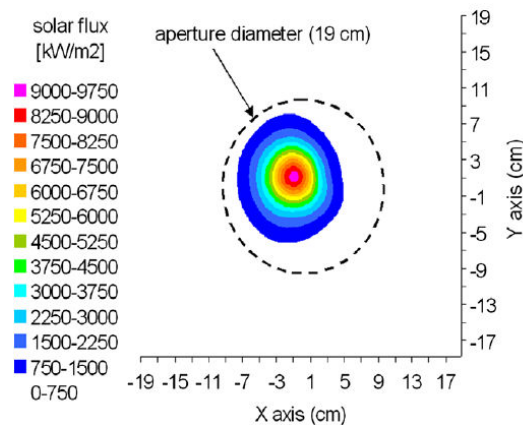


Figura 21. Distribución del flujo incidente en el plano focal.

En la Figura 22 se observa que en el plano del absorbedor, que está localizado  $12 \text{ cm}$  detrás de la apertura, golpea directamente el  $78\%$  de la energía solar concentrada, mientras que el  $7\%$  restante golpea en las paredes de la cavidad. Esta distribución no homogénea presenta un valor medio de flujo solar en el absorbedor de  $702 \text{ kW/m}^2$ , con un pico de  $1538 \text{ kW/m}^2$ .

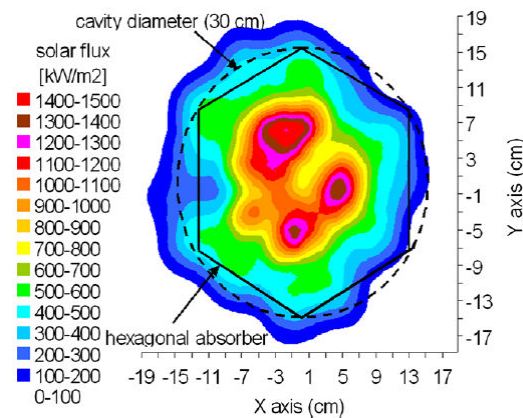


Figura 22. Distribución del flujo solar incidente en el receptor.

En el receptor existen una serie de pérdidas que se deben a los fenómenos de conducción, convección y de radiación, junto con el fenómeno denominado spillage<sup>18</sup> (pérdidas debidas a que parte de la radiación concentrada no impacta en el punto en el que debería). La Figura 23 muestra una sección lateral del receptor en la que se observa donde se producen las pérdidas.

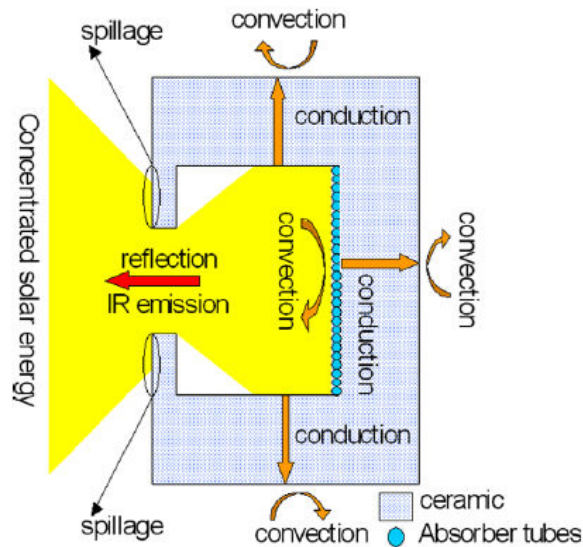


Figura 23. Sección lateral del receptor con las principales causas de pérdidas en el sistema.

Para el cálculo de los diversos valores del flujo de calor en el sistema, se divide el receptor en 11 volúmenes de control y se le aplican las ecuaciones de transferencia de calor y del balance de energía. De los once volúmenes de control en los que se dividía el receptor, ocho correspondían al absorbedor, tal y como se muestran en la Figura 24.

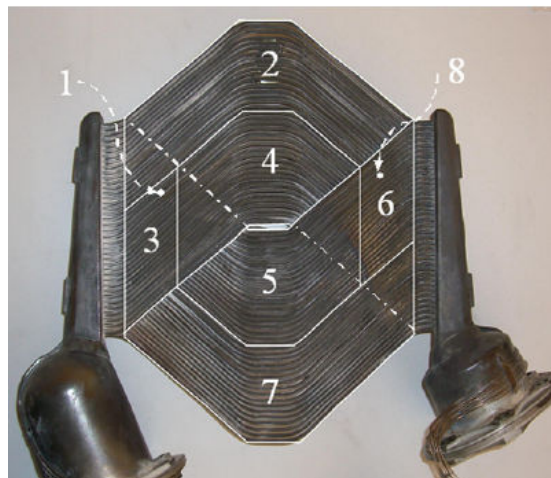


Figura 24. Geometría y volúmenes de control del absorbedor.

El sistema de ecuaciones diferenciales propuesto fue resuelto con Matlab. Los resultados se muestran en el apartado siguiente.

### 2.5 Resultados. Comparación con medidas experimentales.

Los resultados obtenidos se comparan con los datos de operación experimentales del sistema modelado, que se muestran en la Tabla 5.

<sup>18</sup> Desbordamiento.



Datos de operación del sistema		
Gas de trabajo hidrógeno		
Irradiación normal directa	W/m <sup>2</sup>	906
Área de la parábola	m <sup>2</sup>	52.9
Energía solar	kW	48
Presión	Bar	130-140
Temperatura pared del absorbedor	K	1053
Temperatura en el cilindro de expansión	K	903-923
Diferencia temperaturas de entrada y salida del agua de refrigeración	K	295-305
Temperatura de la apertura	K	293
Frecuencia (t <sub>ciclo</sub> =40 ms)	min <sup>-1</sup>	1500

Tabla 5. Datos de operación del sistema.

En la comparación se debe tener en cuenta que al igual que se producen errores numéricos en el cálculo computacional, se producen errores de medida en la toma de datos experimentales. En la Figura 25 se muestra el destino final de la energía suministrada al sistema. En la figura de la izquierda se presenta el resultado obtenido con el modelo y en el de la derecha las medidas experimentales.

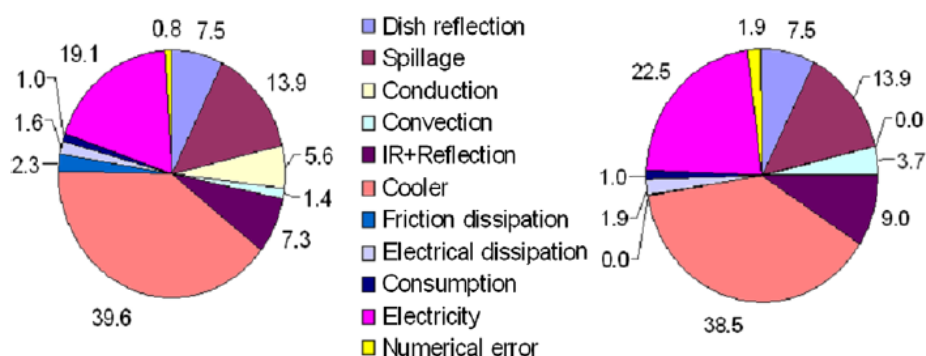


Figura 25. Distribución final de la energía suministrada al sistema.

Se observa en los gráficos que las pérdidas por spillage son muy importantes, y que si las unimos a las producidas por conducción, convección y por radiación, suponen un total aproximado de 13'5 kW lo que supone un 28% de la energía solar captada por el sistema. Del resto de la energía, 31 kW son suministrados al hidrógeno del motor y 19 kW son evacuados por el sistema de refrigeración. Por otro lado, se debe destacar que los datos suministrados por el modelo se aproximan bastante a la realidad experimental, lo que supone un éxito del modelo. Así, la utilización de este modelo aporta multitud de datos de extraordinaria relevancia. La eficiencia del receptor, definida como la energía que llega a la máquina térmica frente a la total que entra en la cavidad se estima en un 81'4% en el modelo y en un 82'6% en las mediciones. Las temperaturas alcanzadas por los tubos del receptor se presentan acompañadas de las medidas experimentales en la Figura 26, donde se observa un máximo de 1053 K. La temperatura estimada en la expansión del cilindro es de 914 K y la presión es de 115 Bar.

Además de las temperaturas, el modelo nos proporciona información acerca de la cantidad de energía que va a los distintos sistemas de la unidad disco parabólica, en función de la irradiación normal directa (DNI) recibida. Dicha información se presenta en la Figura 27.

En capítulos posteriores se realizará un cálculo aproximado de las actuaciones del sistema completo. Este análisis de las actuaciones mostrará la variación que se produce en el funcionamiento del sistema en función del cambio que se produce de la radiación normal incidente a lo largo de un día. Por supuesto, los datos aquí presentados serán de una precisión

mucho mayor, ya que el programa que calcula las actuaciones partirá de numerosas hipótesis simplificadoras. Aún así, todo ello se desarrollará en el Capítulo IV.

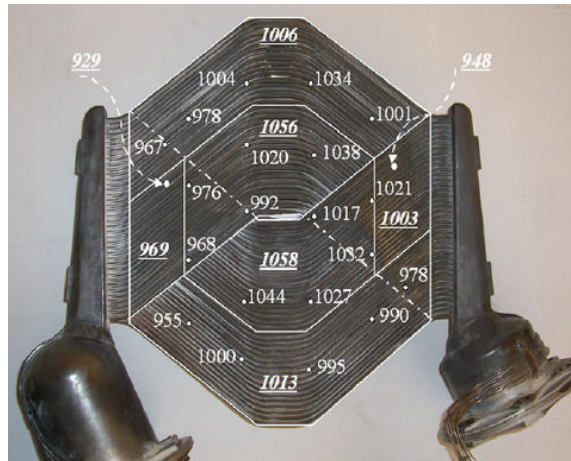


Figura 26. Distribución de temperaturas en el absorbedor. Subrayados los resultados del modelo.

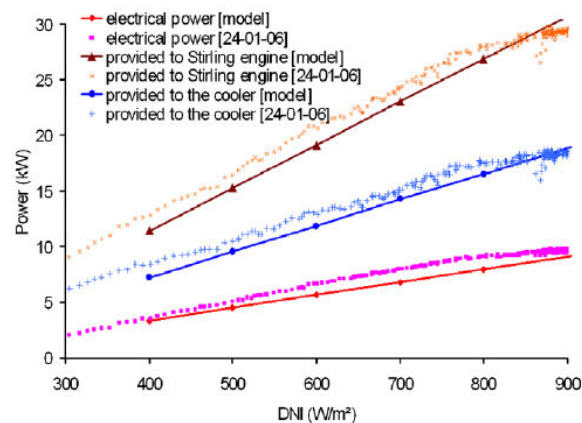


Figura 27. Potencia producida por el motor frente a dato suministrado por el modelo.

## 2.6 Conclusiones del modelo.

Comparando el modelo con mediciones experimentales se observa que el modelo da buenos resultados y que permite realizar un estudio detallado de las pérdidas de calor. Actualmente, la eficiencia del sistema modelado es de alrededor del 21% con un valor de DNI de 900 W/m<sup>2</sup> y con una temperatura ambiente de 20°C. El modelo muestra importantes pérdidas de calor en la cavidad por spillage y radiación (reflexión y emisión) y, en consecuencia, una mejora potencial de eficiencia del sistema. Los estudios futuros se centrarán en la influencia de los parámetros físicos de la cavidad con el fin de diseñar un nuevo receptor solar. Además, el modelo se puede utilizar para evaluar la posibilidad de utilizar un sistema disco Stirling en una aplicación de cogeneración, ya que es capaz de calcular la energía absorbida por el refrigerante del motor<sup>19</sup>.

<sup>19</sup> Para el análisis de las posibilidades de utilizar sistemas disco Stirling en sistemas de cogeneración, véase el documento "Multi-Megawatt dish based solar thermal electricity generating plant with optional cogeneration" de Stephen Kaneff, del Energy Research Centre of Australia, Enero 2000.

### 3.0 Experiencia en España. Prototipo EuroDish (Proyecto EnviroDish).<sup>20</sup>

En marzo de 2004 se finalizó la instalación de un disco parabólico con motor Stirling en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla. Este sistema está integrado en un proyecto más amplio, EnviroDish, que cuenta con varias unidades de sistemas disco parabólico en distintos países. La unidad de Sevilla ha funcionado durante dos años, acumulando 1915 horas de funcionamiento, habiendo producido en ese periodo 9'7 MWh eléctricos.

#### 3.1 La instalación de Sevilla.

El sistema instalado en Sevilla posee las características técnicas descritas en la Tabla 6:

Potencia neta nominal 9'2 kW
Diámetro de la apertura del concentrador 8'5 m
Factor de concentración 2500
Motor SOLO V161 de 2 cilindros en V a 90º, 160 cm <sup>3</sup>
Gas de trabajo: hidrógeno
Presión de trabajo: 20-150 bar
Conexión eléctrica: 400 V, 50 Hz, 3 fases
Sistema de seguimiento con suspensión azimutal
Cimentación en hormigón armado

Tabla 6. Características técnicas sistema EnviroDish.

#### 3.2 Resultados de operación.

Durante los primeros meses de operación, las principales tareas realizadas fueron las debidas a tareas de ajuste, aprendizaje y mejora del sistema, por lo que los resultados obtenidos en operación en este periodo no han sido incluidos. Cabe destacar que este sistema solo operó en momentos en los que no hubiese falta de operarios en caso de incidencia.

La evaluación se ha realizado a partir de los datos registrados cada 5 minutos por el Sistema de Adquisición de Datos. Los parámetros evaluados se relacionan en la Tabla 7.

Parámetro	Símbolo	Unidades	Comentarios
Tiempo con irradiación normal directa > 340	T340	Horas	El umbral de irradiación directa normal para la operación del sistema se estableció en 340 W/m <sup>2</sup> .
Energía solar disponible	H340	kWh	Se sitúa por encima de 340 W/m <sup>2</sup> al ser la integral de la irradiancia.
Tiempo de operación	top	Horas	Tiempo que el sistema está funcionando durante un intervalo de tiempo determinado
Energía solar incidente	Hop	kWh	Energía solar disponible durante el tiempo de operación
Electricidad generada	EG	kWh	Energía eléctrica generada por el sistema durante un intervalo dado
Potencia máxima	Pmax	kW	Valor máximo de la potencia generada
Rend. global bruto	$\eta_{gl0}$		Rendimiento bruto, EG/H340
Rend. operativo bruto	$\eta_{op0}$		Rendimiento bruto, EG/Hop
Rendimiento operativo neto	$\eta_{op}$		Rendimiento neto, (EG-Ep)/ Hop

Tabla 7. Relación de parámetros evaluados.

<sup>20</sup> Operación rutinaria de un disco parabólico con motor Stirling conectado a red, en la Escuela de Ingenieros de Sevilla, Valeriano Ruíz, XIV Congreso Ibérico de Energía Solar, Vigo, junio 2008.

Aunque no se presentan todos los parámetros evaluados en detalle, estos se incluyen en el cálculo de los rendimientos, cuyo valor si se presenta en las figuras siguientes.

### 3.3 Resultados anuales.

En los siguientes apartados se presentan los resultados operativos de los años 2005 y 2006.

#### 3.3.1 Año 2005.

En las figuras 28, 29, 30 y 31 se presenta la evolución temporal de algunos de los parámetros anteriormente descritos. En la Figura 28 se observa que el rendimiento operacional es más alto en enero y febrero, primeros meses del año, coincidiendo con los valores más bajos de temperatura ambiente. Durante los meses de diciembre y, en menor medida, noviembre, los registros de potencia son incorrectos por avería del medidor de potencia, por lo que no se presentan datos de potencias, energías ni rendimientos. También se aprecia que en los meses de marzo y abril el rendimiento operacional presenta los valores mínimos, debido a averías del sistema de control. La energía producida, Figura 30, es máxima en el mes de julio, coincidiendo con el máximo de horas de operación, a pesar del relativamente bajo rendimiento durante este mes, debido a las elevadas temperaturas ambientales. La producción en el mes de agosto se ve perjudicada por ser un periodo vacacional. Los fallos apuntados en el párrafo anterior también se reflejan en las bajas producciones de marzo, abril, noviembre y diciembre, y el valor máximo de potencia, coincidiendo con el valor máximo de rendimiento, se alcanza en el mes de febrero. Hay que hacer notar que el tiempo de operación es mayor que T340 durante los meses de julio y agosto, porque el sistema sigue funcionando durante los transitorios en que la irradiancia cae por debajo del valor umbral. En cualquier caso, este hecho es indicativo de la excelente disponibilidad del sistema durante estos meses.

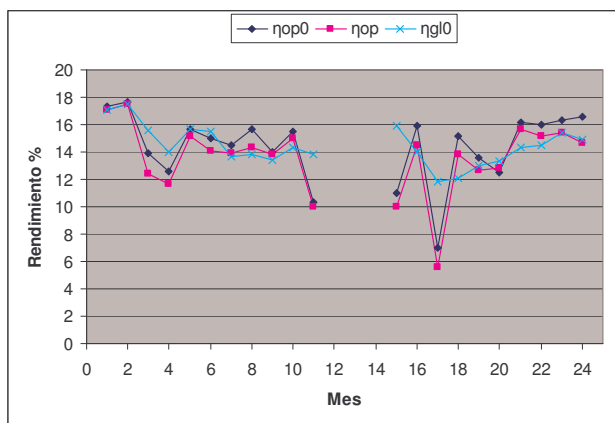


Figura 28. Evolución de rendimientos en el periodo 2005-2006.

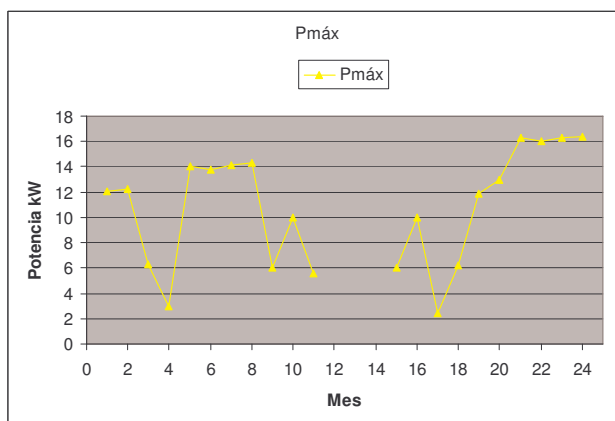


Figura 29. Evolución potencia en el periodo 2005-2006.

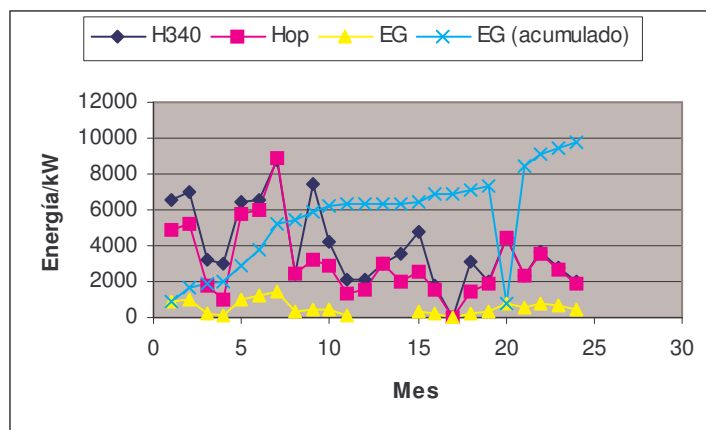


Figura 30. Evolución de la energía durante el periodo 2005-2006.

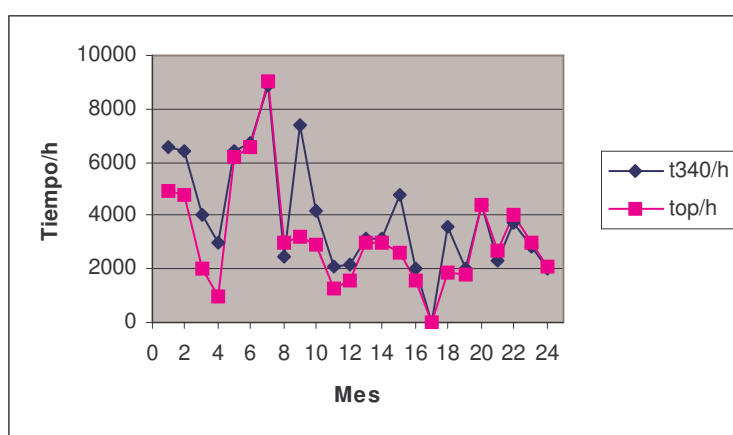


Figura 31. Evolución de los tiempos de operación periodo 2005-2006.

### 3.3.2 Año 2006

Durante los meses de enero y febrero persiste la avería del medidor de potencia. A partir de marzo se soluciona este problema. Durante los meses de abril y mayo, la instalación estuvo desatendida por lo que operó de manera muy esporádica, lo que explica los pobres registros. En junio se realiza una completa revisión del sistema. El valor máximo de rendimiento de 2006 se obtiene en diciembre (recuérdese que no se dispone de datos de enero y febrero) y los valores máximos de tiempo de operación y energía producida se dan en el mes de agosto (figuras 30 y 31). El rendimiento neto medio durante este año es del 12'96%, frente al 14% de 2005, como consecuencia de la rotura de un termopar del receptor que limitó la temperatura máxima de trabajo de 800 °C a 760 °C. La disminución de los tiempos de operación debidos a averías, modificaciones y falta de personal (770 h en 2006 frente a 1146 h en 2005) es aún más acusada, reflejándose ambos factores en la generación de electricidad. El total de energía generada en 2006 fue de 3'3 MWh, frente a las 6'4 de 2005.

### 3.4 Conclusiones.

En primer lugar llama la atención el hecho de que el sistema de 10 kW instalado en Sevilla proporciona unos valores de rendimiento máximo inferiores a los de la unidad de Odrillo. Esto puede deberse a que la temperatura de evacuación del calor residual es más alta, al serlo la temperatura ambiente. Además, al ser el prototipo de Sevilla un prototipo más reciente, y por lo tanto menos estudiado, puede que su configuración no sea la más óptima todavía. A pesar de ello, el estudio mes a mes del sistema proporciona unos resultados lógicos en lo que al rendimiento y a la producción de energía se refiere; la máxima producción corresponde a la época de máxima energía recibida, lo que ocurre en los meses de verano, mientras que el

rendimiento aumenta en invierno debido a una mayor variación de la temperatura de los focos del motor.

#### 4.0 Experiencia global con sistemas disco motor.

La siguiente tabla (Tabla 8), muestra un resumen de los principales sistemas de disco parabólico desarrollados junto con algunas de sus principales características. Esto no permite distinguir las principales líneas de evolución de los sistemas disco parabólico y compararlos con los sistemas de última generación, como EuroDish.

SISTEMA	CONCENTRADOR				MOTOR	RECEPTOR
	Salida	Diámetro	Superficie	Seguimiento		
<b>Histórico</b>						
Ericsson	?	?	Plata y cobre	Azimut/elevación	Stirling	Irradiación directa
<b>Primeros desarrollos</b>						
Shenandoah	400 kWe	7 m	Polímeros con aluminio	Polar/declinación	Rankine	Tubos de iluminación directa
Omnium G	10 kWe	6 m	Aluminio pulido	Azimut/elevación	Rankine	Tubos de iluminación directa
France THEK-2	95 kWe	8 m	Cristales con plata	Azimut/elevación	Rankine	Irradiación directa
White Cliffs Australia	25 kWe	5 m	Cristales con plata	Azimut/elevación	Rankine	Irradiación directa
SBP	50 kWe	17 m	Cristales con plata	Azimut/elevación	Rankine	Irradiación directa
PKI Dish	50 kWe	20 m	Cristales con plata	Azimut/elevación	Rankine	Irradiación directa
<b>Primeros esfuerzos destinados a comercialización</b>						
Vanguard	25 kWe	10.6 m	Cristales con plata	Azimut/elevación	Stirling	Irradiación directa
MDAC	25 kWe	10.6 m	Cristales con plata	Azimut/elevación	Stirling	Irradiación directa
SBP	9'5 kWe	7.5 m	Cristales con plata	Polar/declinación	Stirling	Irradiación directa
CPG	7'5 kWe	9.6 m	Polímeros de aluminio	Polar/declinación	Stirling	Receptores de reflujos
CPG	25 kWe	15 m	Cristales con plata	Azimut/elevación	Stirling	Receptores de reflujos
Sistemas anteriores a la última generación						
SBP	10 kWe	8.5 m	Cristales con plata	Azimut/elevación	Stirling	Irradiación directa
SAIC	20 kWe	10 m	Cristales con plata	Azimut/elevación	Stirling	Irradiación directa
Aisin/Miyako	8 kWe	9.6 m	Polímeros de aluminio	Polar/declinación	Stirling	Irradiación directa
ANU	45 kWe	25.6 m	Cristales con plata	Azimut/elevación	Rankine	Irradiación directa

Tabla 8. Resumen experiencia con sistemas disco parabólico.

## **CAPÍTULO IV:**

### **ACTUACIONES DEL SISTEMA DISCO STIRLING,**

## 1.0 Actuaciones del sistema.

En el presente capítulo se realiza una aproximación a las actuaciones de un sistema disco Stirling. Para ello se analizará el comportamiento del sistema frente a la variación de la radiación solar incidente a lo largo del día, intentando analizar el comportamiento de cada componente ante dicha variación.

## 2.0 Actuaciones del prototipo EuroDish.

En el documento - EnviroDish and EuroDish - System and status<sup>21</sup> - se recogen las mediciones de irradiación normal directa que recibe una unidad disco Stirling de 10 kW situada en Almería, en un día normal en el mes de febrero, junto con la potencia neta que suministra la instalación, Figura 32.

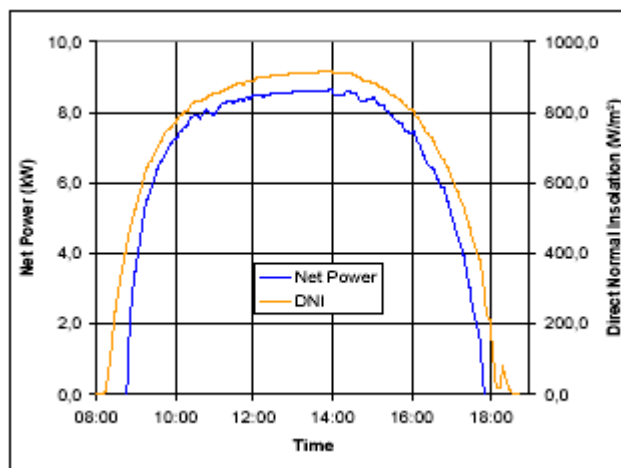


Figura 32. Actuaciones del sistema disco Stirling a lo largo de un día del mes de febrero en Almería.

Como se puede observar, el sistema comienza a recibir irradiación normal directa a partir a las ocho de la mañana, situación que se mantiene hasta prácticamente las siete de la tarde. El problema es que el sistema necesita una cantidad mínima de irradiación normal directa para poder funcionar. Según algunos autores<sup>22</sup> esa cantidad se cifra para una instalación de 10 kW en  $340 \text{ W/m}^2$ . Analizando los valores de la Figura 31, se observa que esta comienza a producir potencia cuando la irradiación normal directa alcanza un valor de unos  $380 \text{ W/m}^2$ . Así, el funcionamiento real del sistema abarca desde las 8:40 de la mañana, momento en el que se supera el valor umbral de  $380 \text{ W/m}^2$ , hasta las 17:45 de la tarde, momento en el que se desciende por debajo de dicho umbral. Por lo tanto, se concluye que el periodo de funcionamiento diario en invierno de una unidad disco Stirling se sitúa en torno a las 9 horas y 5 minutos diarios. Esta capacidad se verá aumentada en verano debido a que la irradiación normal (por encima del valor umbral) se incrementa al existir un mayor número de horas diarias de luz solar.

En la Figura 33 se observa la potencia suministrada que registró el sistema en función de la irradiación normal directa recibida. Introduciendo todos estos datos en una hoja de cálculo en el programa Excel, se puede interpolar y obtener una función aproximada que calcule la potencia que suministra el sistema en función de la irradiación normal directa recibida. La expresión obtenida muestra la potencia que suministra el sistema en kW, introduciendo el valor de la irradiación normal recibida en  $\text{W/m}^2$ , siendo su forma:

<sup>21</sup> Datos obtenidos del documento "EnviroDish and EuroDish - System and status" de Thomas Keck y Wolfgang Schiel de la empresa Schlaich Bergermann und Partner (SBP), Stuttgart, Alemania.

<sup>22</sup> Operación rutinaria de un disco parabólico con motor Stirling conectado a red, en la Escuela de Ingenieros de Sevilla, Valeriano Ruíz, XIV Congreso Ibérico de Energía Solar, Vigo, junio 2008.



$$\text{Potencia neta suministrada en kW} = (0.0134 * \text{Irradiación normal directa en W/m}^2) - 3'0155.$$

A pesar de que en la realidad la función que representa la potencia neta obtenida no es exactamente lineal, debido a la cantidad de variables de las que depende, esta interpolación se puede considerar como una buena aproximación.

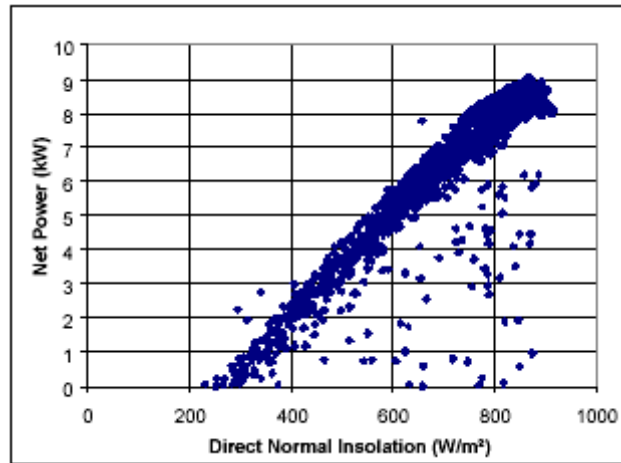


Figura 33. Potencia neta obtenida en función de la irradiación normal directa recibida.

Ahora, partiendo de esta expresión, se puede calcular la variación que sufre el funcionamiento del motor ante las variaciones de la irradiación normal recibida, y hacer un desglose exacto de la actuación de cada elemento del sistema. Para ello basta con conocer los rendimientos del concentrador, del receptor, del absorbedor y del generador eléctrico, valores que se mantienen prácticamente constantes aunque varíe la irradiación normal directa recibida por el sistema, y calcular el rendimiento global del sistema con los datos de la Figura 32. Los valores de los rendimientos anteriormente citados y el porcentaje de pérdidas que sufre cada componente de la instalación se incluyen en el Capítulo III del presente estudio. A continuación se realiza el estudio de las actuaciones de cada componente por separado.

### 2.1 Comportamiento del sistema.

Para analizar el comportamiento del sistema se calcula el rendimiento global del sistema. El rendimiento global del sistema se define como el cociente entre la potencia neta suministrada por la instalación y la potencia de entrada recibida por el concentrador. La potencia de entrada se calculará como el producto de la irradiación normal directa recibida por el concentrador en  $\text{W/m}^2$  y del área del mismo en  $\text{m}^2$  (52'9). Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 10.

### 2.2 Comportamiento del motor.

Una vez calculada la eficiencia del sistema se calcula la evolución del rendimiento del motor frente a cambios en la irradiación normal incidente recibida. Para ello se supondrán los valores de los rendimientos de cada componente del sistema que aparecen en la Tabla 9.

Componente	Concentrador	Receptor	Absorbedor	Generador
Rendimiento (%)	92	82	83	91

Tabla 9. Rendimiento de los componentes del sistema.

El rendimiento global del sistema se puede calcular como el producto de cada uno de los componentes del sistema:

$$\text{Rend. Global} = \text{Rend.Colector} * \text{Rend.Receptor} * \text{Rend.Absorbedor} * \text{Rend.Motor} * \text{Rend.Gene.}$$

Como el único de ellos que no es conocido es el rendimiento del motor, se despeja de la ecuación anterior. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 10.

Irradiación normal directa (W/m <sup>2</sup> )	Potencia neta (kW)	Rend. Sistema	Rend. Motor
200	0	0,00	0,00
250	0,2	0,02	0,03
300	0,5	0,03	0,06
380	1,8	0,09	0,16
400	2,5	0,12	0,21
450	3	0,13	0,22
500	3,4	0,13	0,23
550	4,5	0,15	0,27
600	5,25	0,17	0,29
650	5,75	0,17	0,29
700	6,5	0,18	0,31
750	7,3	0,18	0,32
800	8	0,19	0,33
850	8,4	0,19	0,33

Tabla 10. Evolución del rendimiento global del sistema y del motor frente a cambios en la irradiación normal directa recibida.

Para facilitar el estudio de los resultados obtenidos en la Tabla 10, los resultados obtenidos para el rendimiento global del sistema y para el rendimiento del motor se muestran en la Figura 34.

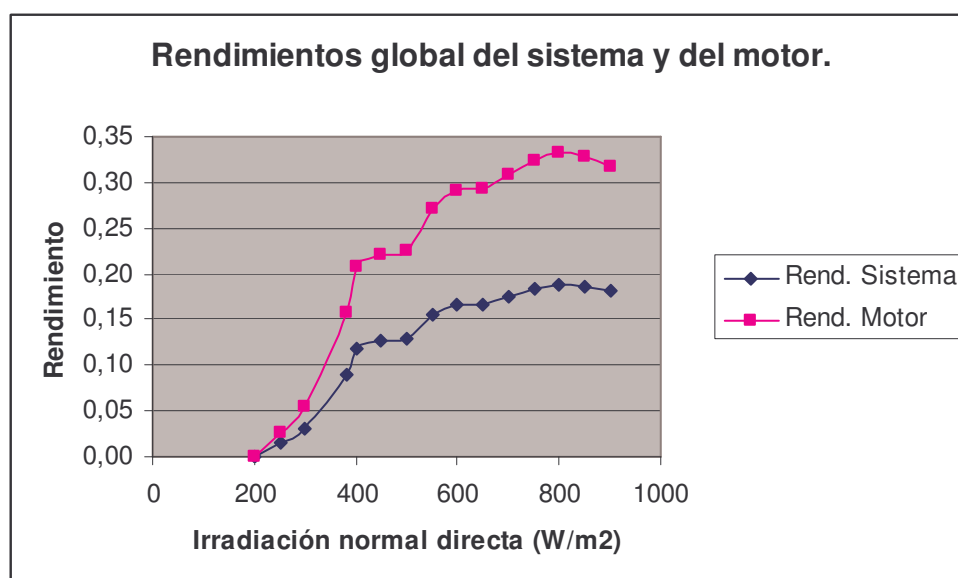


Figura 34. Evolución de los rendimientos global del sistema y del motor.

Como era de esperar debido a las hipótesis simplificadoras adoptadas, se observa que el rendimiento del sistema es proporcional al valor del rendimiento del motor, ya que se supone el rendimiento de los demás componentes constante frente a las variaciones de la irradiación normal incidente.

Respecto al comportamiento del rendimiento del motor se observa una clara tendencia a aumentar su valor a medida que aumenta la irradiación normal directa. Este comportamiento es debido al aumento de la diferencia de temperatura existente entre el foco caliente del motor (el absorbedor) y el foco frío del mismo (el ambiente), lo que se produce a consecuencia del citado incremento de la irradiación normal directa.

También se observa que para los valores más bajos de irradiación recibida, el aumento del valor del rendimiento se produce de una manera muy brusca. Posteriormente la curva se suaviza, llegando incluso a decrecer un poco al final de la misma. Esto se debe a dos razones fundamentales:

- el aumento de pérdidas térmicas por convección y por conducción debido al alto incremento de la temperatura en el conjunto receptor- absorbedor-motor.
- La segunda es el aumento de las pérdidas debido al aumento de la fricción mecánica al aumentar la velocidad y la temperatura en los componentes mecánicos del motor Stirling.

Para finalizar se muestra en la Figura 35, el valor de la potencia suministrada por una unidad de 10 kW en Rumania<sup>23</sup>, junto con la cantidad de irradiación normal directa que recibe. Como se puede apreciar en la figura, la producción de energía eléctrica sufre muchísimos transitorios que, en su mayoría, se deben al paso de nubes. De ahí la importancia de conseguir adecuados emplazamientos para la instalación de sistemas termoelectrónicos y de la necesidad de conseguir sistemas híbridos que sigan funcionando sin aporte de energía solar.

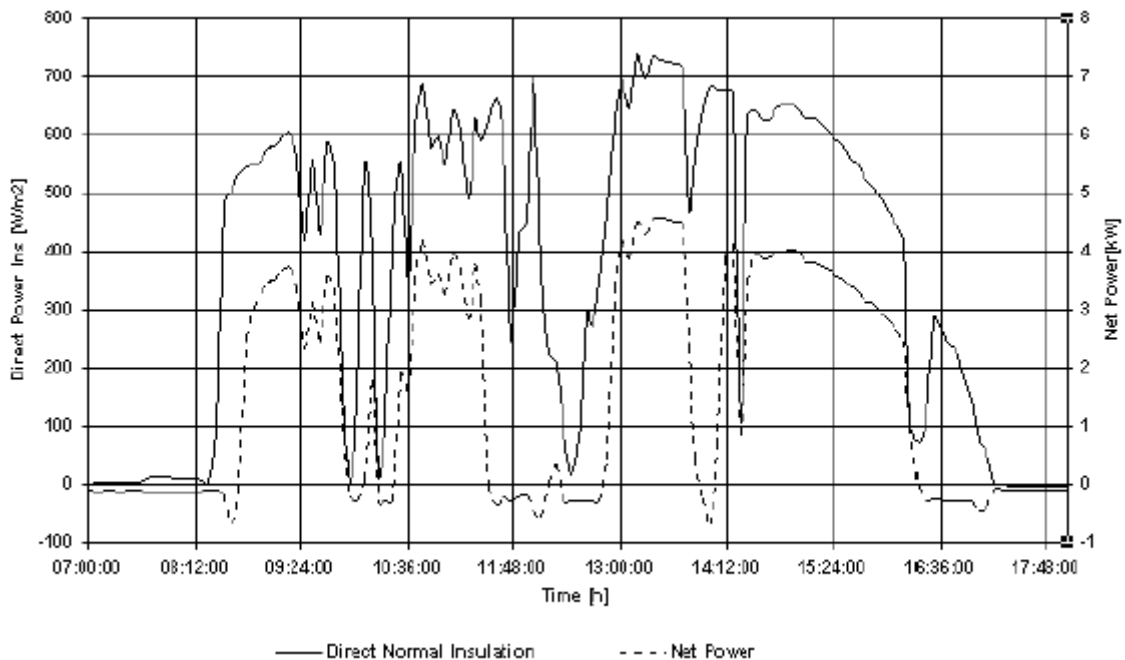


Figura 35. Datos recogidos por una unidad disco Stirling de 10 kW en Rumania.

Es de destacar la diferencia existente entre los tiempos de encendido y apagado del sistema. Mientras que el sistema deja de funcionar rápidamente si deja de recibir irradiación solar, a la hora de la puesta en marcha, el tiempo de reacción es mucho mayor. Esto se debe a que el fluido se enfría muy rápidamente al dejar de recibir energía solar, mientras que tarda un tiempo en alcanzar la temperatura de trabajo al volver a recibirla.

### 3.0 Actuaciones de cada elemento del sistema.

En el presente apartado se muestra claramente el destino de la energía que recibe un sistema disco Stirling. Así, se muestra el destino final de toda la energía que recibe el sistema, distinguiendo claramente la zona de mayores pérdidas, y por tanto la de mayor necesidad de mejora. Los datos obtenidos, utilizando como valores de rendimiento de cada sistema los

<sup>23</sup> Véase el documento “Experimental results at PSA facilities, estimation of implementing dish Stirling system in Romania. IHP programme”, de Elisabeta Pasculete, Universidad de Bucarest.

presentados en el Capítulo III, se muestran en la Figura 36, para una irradiación normal directa de  $900 \text{ W/m}^2$ , y un área de la parábola libre de sombras de  $52.9 \text{ m}^2$ .

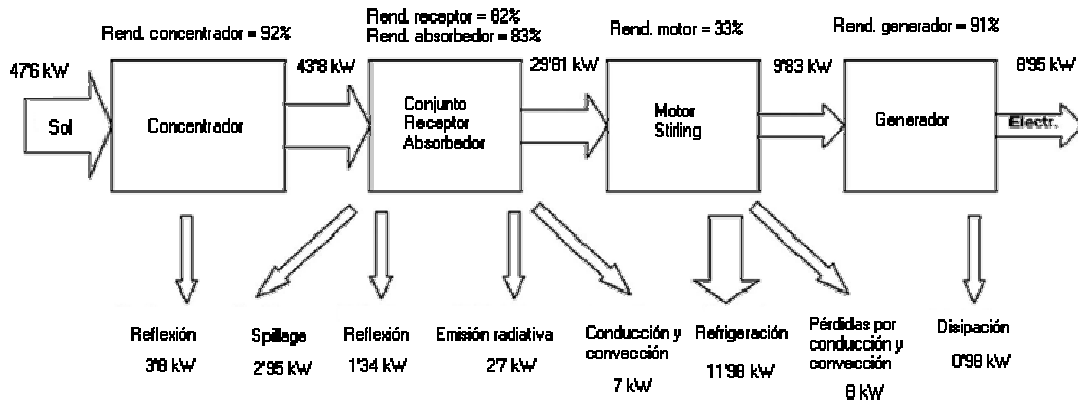


Figura 36. Destino final de la energía en un sistema disco Stirling.

Como se comentó en capítulos anteriores, se observa que las mayores pérdidas se producen entre el conjunto receptor-absorbedor y el motor Stirling. Esto nos permite pensar que dicho conjunto deberá recibir las mayores inversiones de desarrollo si se desea aumentar la eficiencia del sistema, ya que el rendimiento del resto de los componentes es bastante elevado.

## **CAPÍTULO V:**

### **CONSIDERACIONES DE DISEÑO.**

**Nota:** la nomenclatura utilizada en este capítulo se presenta a continuación.

Nomenclatura		Subíndices	
$A$	Área, m <sup>2</sup>	$c$	Espacio de compresión
$C_p$	Calor específico a presión constante J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	$ch$	Carga
$C_{pr}$	Capacidad calorífica de cada celda de la matriz J·K <sup>-1</sup>	$d$	Espacio de expansión
$C_v$	Calor específico a volumen constante J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	$E$	Interior
$d$	Diámetro hidráulico	$ext$	Exterior
$D$	Diámetro, m	$f$	Frío
$dm$	Diámetro de cable, m	$h$	Caliente
$f_r$	Factor de fricción	$moy$	Media
$Freq$	Frecuencia de operación, Hz	$P$	Pérdidas
$h$	Coefficiente de convección, W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	$Pa$	Pared
$J$	Distancia anular entre el cilindro y el pistón, m	$pis$	Pistón
$k$	Conductividad térmica, W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	$r$	Regenerador.
$L$	Tamaño, m	$r1$	Celda 1 regenerador
$M$	Masa de gas de trabajo en el motor, kg	$r2$	Celda 2 regenerador
$\dot{m}$	Flujo másico, kg·s <sup>-1</sup>	$S$	Salida
$m$	Masa del gas en distintos componentes, kg	<b>Símbolos griegos</b>	
$NTU$	Número de unidades de transferencia		
$P$	Presión, Pa		
$Q$	Calor, J	$\theta$	Ángulo de la biela.
$\dot{Q}$	Potencia, W	$\varepsilon$	efectividad
$R$	Constante de los gases, J·kg·K <sup>-1</sup>	$\mu$	Viscosidad dinámica, kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>
$T$	Temperatura, K	$\rho$	Densidad, kg·m <sup>-3</sup>
$V$	Volumen, m <sup>3</sup>	$\omega$	Frecuencia angular, rad·s <sup>-1</sup>
$W$	Trabajo, J	$\psi$	Porosidad de la malla.

## 1.0 Consideraciones de diseño<sup>24</sup>.

Los sistemas disco Stirling poseen como característica principal un elevado rendimiento de operación. Este rendimiento depende de diversos factores, como son el factor de concentración y la temperatura del fluido de trabajo. La Figura 37 muestra la evolución del rendimiento teórico de los sistemas disco Stirling en función de los parámetros ya mencionados.

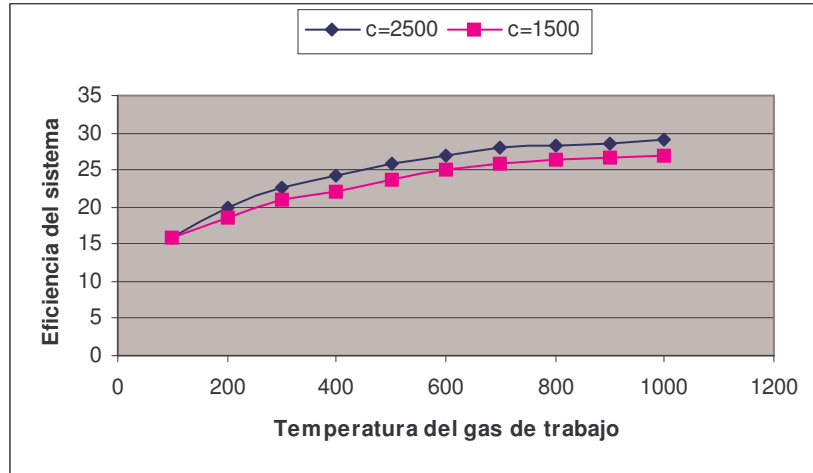


Figura 37. Evolución del rendimiento teórico en sistemas disco Stirling en función de la temperatura del gas de trabajo y de la relación de concentración.

La obtención de rendimientos tan elevados se fundamenta en el desarrollo de componentes eficientes capaces de suministrar la energía necesaria al fluido de trabajo, reduciendo al mínimo las pérdidas. Por este motivo, a continuación se especifican las características de diseño de los elementos que forman los sistemas disco Stirling, ya que de ellos dependen el precio y las características operativas del sistema, y por lo tanto, su grado de competitividad en el mercado.

Si realizamos un pequeño análisis energético del sistema EuroDish, analizando las pérdidas en cada sistema, podremos conocer la influencia de cada componente en el conjunto del sistema. La Figura 38 muestra un diagrama de pérdidas y rendimientos de cada componente del sistema.

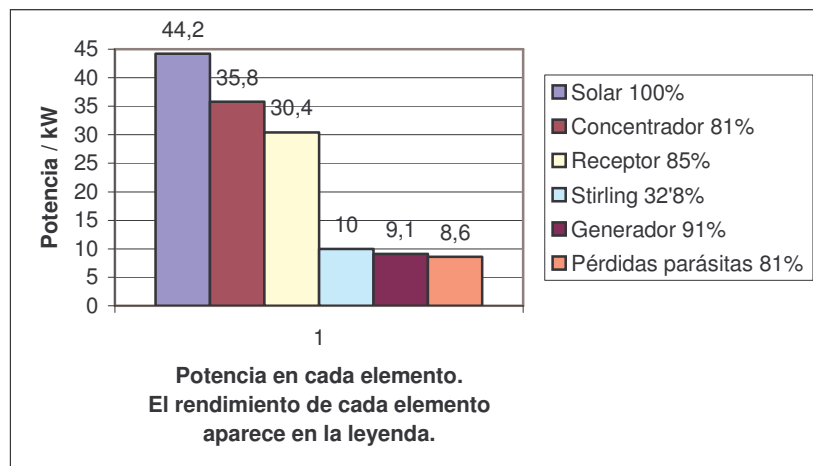


Figura 38. Diagrama de pérdidas y rendimientos de cada componente del sistema.

<sup>24</sup> Véase el "Curso sobre sistemas solares de concentración", de la plataforma PSA, Unidad de Discos Parabólicos de Félix Téllez Sufrategui.

La principal pérdida se observa entre el receptor y el motor, lo que refleja la gran importancia de estos elementos en el sistema. El rendimiento tras las pérdidas parásitas se define como el rendimiento obtenido tras tener en cuenta las pérdidas eléctricas del sistema<sup>25</sup>.

## 2.0 Relación distancia focal / diámetro.

En un sistema disco Stirling, la ecuación que gobierna su comportamiento viene dada por la integración de los rendimientos de los distintos subsistemas. La energía útil captada por el conjunto concentrador/receptor viene dada como en cualquier otro sistema solar térmico por la expresión:

$$Q_{util} = I_{bn} \cdot A_{ap} \cdot E \cdot (\cos \theta_i) \cdot \rho \cdot \phi \cdot \tau \cdot \alpha - A_{rec} \cdot [U \cdot (T_{rec} - T_{amb}) + \sigma \cdot F \cdot (T_{rec}^4 - T_{amb}^4)]$$

donde:

$A_{ap}$ = área de la apertura del concentrador.
$A_{rec}$ = área de apertura del receptor.
$E$ = fracción del concentrador no sombreada por el receptor y demás elementos.
$F$ = conductancia radiativa equivalente.
$I_{bn}$ = radiación solar incidente.
$Q_{util}$ = energía térmica útil suministrada por el receptor.
$T_{amb}$ = temperatura ambiente.
$T_{rec}$ = temperatura de operación del receptor.
$U$ = coeficiente de pérdidas por conducción y convección debido a corrientes de aire dentro del receptor a conducción a través de las paredes del receptor.
$\alpha$ = absorbancia del receptor.
$\tau$ = transmitancia del medio entre el reflector y el absorbedor.
$\phi$ = factor de interceptación (fracción de energía que una vez abandonado el reflector entra en el receptor).
$\rho$ = reflectividad del concentrador.
$\sigma$ = constante de Stefan-Boltzmann.
$\theta_i$ = ángulo de incidencia (en discos parabólicos es cero).

Para poder maximizar  $Q_{util}$ , es necesario que  $A_{ap}$  sea grande y  $A_{rec}$  pequeño. La relación de concentración geométrica en un concentrador óptico viene dada por la expresión:

$$CR_g = A_{ap} / A_{rec}$$

Esta relación de concentración define un factor ideal. Teóricamente el valor máximo del factor de concentración debería situarse en  $CR_g(\text{máx}) = 46.200$ . En la realidad este valor es muy inferior, debido a distintos errores ópticos como la aberración, la reflectancia de la superficie y los errores de la superficie. Estas deficiencias tienen diferentes causas que, dependiendo del tipo de construcción tendrán efectos diferentes. Se pueden diferenciar los siguientes tres tipos:

- Errores debidos a deformaciones de la curva de referencia (error de inclinación).
- Errores debidos a ondulaciones del orden de mm hasta cm.
- Errores de seguimiento.

<sup>25</sup> Las pérdidas parásitas (o de Foucault) se refieren a las que aparecen en el núcleo de los bobinados del generador. Para minimizarlas se recurre a colocar núcleos constituidos por láminas de hierro en lugar de bloques compactos.



Estas deficiencias dan lugar a una pérdida de calidad de la imagen que produciría un concentrador ideal en la zona focal, pasándose del límite teórico máximo (en un solo paso de concentración) de unos 11.000 a relaciones de concentración reales de 3000 a 3500.

Si desarrollamos la expresión de la relación de concentración en función de los parámetros geométricos del paraboloide, dependiente del ángulo límite o de contorno  $\theta$  (en miliradianes), obtenemos la siguiente expresión para su valor mínimo:

$$CR_{\min} = \frac{\text{sen}^2\Theta \cdot \cos^2(\Delta + \Theta)}{\text{sen}^2\Theta}$$

Analizando esta relación y el ángulo límite  $\theta$ , resulta que el factor de concentración máximo a un ángulo límite es de  $45^\circ$ , que equivale a una relación focal de  $f/D = 0'6$ . De ahí se deduce que un concentrador óptimo ha de tener una relación focal de  $0'6$ . La relación entre  $f/D$  y el ángulo límite viene dada por la geometría del paraboloide que es descrita por:

$$x^2 + y^2 = 4fz$$

donde  $x$  e  $y$  son las coordenadas en el plano de la apertura y  $z$  es la distancia del plano de la apertura al vértice, siendo  $f$  la distancia focal, Figura 39.

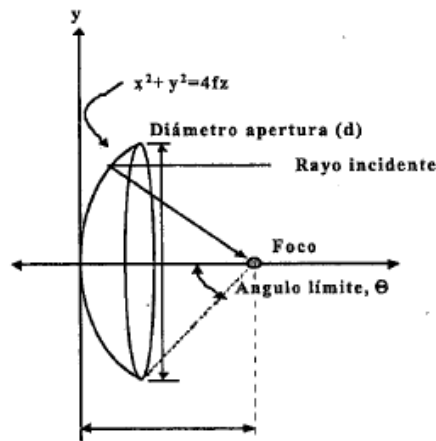


Figura 39. Esquema óptico de un paraboloide de revolución.

Dado que a pequeños ángulos límite el paraboloide tiende a parecerse a una esfera y que los discos facetados suelen usar superficies esféricas, se hace válida la relación:

$$f / d = \frac{1}{4 \tan(2\Theta)}$$

La Figura 40 recoge esta expresión mostrando el valor de la relación focal para un ángulo límite dado. Se aprecia como para un ángulo de  $45^\circ$  corresponde una relación focal de  $0'6$ .

En aquellos casos donde se usan receptores de cavidad, los ángulos límite son inferiores a  $50^\circ$ , por lo que normalmente el receptor está situado lejos y la curvatura del concentrador es pequeña.

El factor más importante en la conexión del concentrador con el receptor es el factor de interceptación ( $\Phi$ ), que define la fracción de energía que después de abandonar la superficie del concentrador es capaz de penetrar en el interior del receptor. Depende de los errores en la superficie del concentrador, errores de seguimiento o tracking, canteo y alineamiento de los espejos y del receptor y del tamaño aparente del sol. Existe una relación directa entre  $\Phi$  y el área del receptor, pero inversa de ésta última con las pérdidas del receptor, por lo que es necesario optimizar la relación.

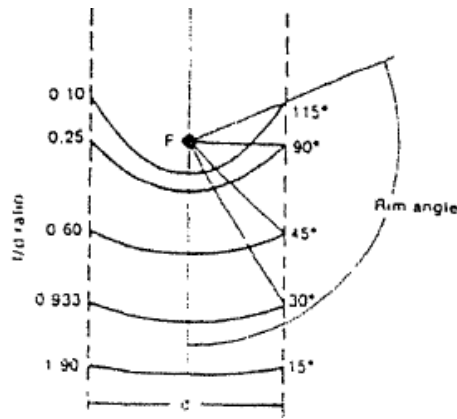


Figura 40. Ángulo límite y relación focal.

La Figura 41 muestra como no todos los rayos solares reflejados consiguen alcanzar el receptor. Mientras que los rayos en línea continua consiguen chocar contra el receptor, se observa que los rayos en línea discontinua abarcan un plano más amplio que el que ocupa la cara frontal del receptor, perdiéndose toda esa energía.

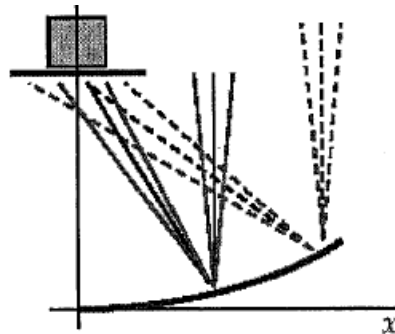


Figura 41. Reflexión en el concentrador.

### 3.0 Análisis de un motor Stirling para aplicaciones solares. Consideraciones de diseño.

Las aplicaciones solares a alta temperatura pueden utilizar motores térmicos para obtener energía mecánica, y con ella producir energía eléctrica a través de un generador. Dichos motores térmicos funcionan a nivel termodinámico entre dos focos térmicos; uno es el foco frío a temperatura ambiente; el otro es el foco caliente a una temperatura determinada por la capacidad de concentración y absorción del sistema. Entre ambos focos se sitúa el motor, capaz de extraer trabajo como se representa en la Figura 42.

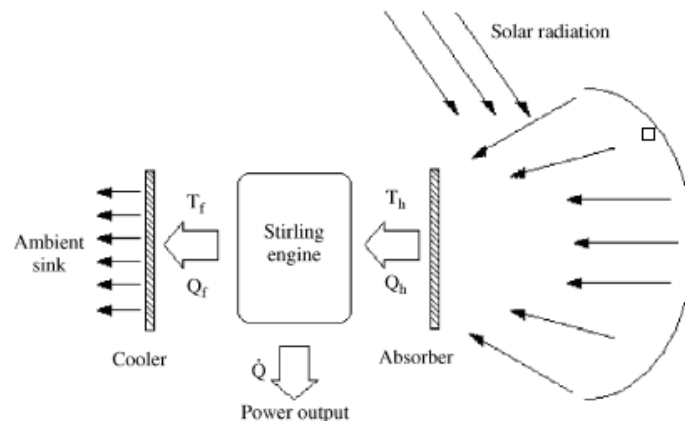


Figura 42. Motor Stirling a nivel termodinámico entre dos focos térmicos.

Entre los distintos tipos de motores térmicos existentes, el motor Stirling parece tomar ventaja en este tipo de aplicaciones. Las principales ventajas de usar un motor Stirling radican en que es un motor de combustión externa y que posee una elevada eficiencia. El hecho de que sean motores de combustión externa implica que pueden utilizar cualquier fuente de calor para funcionar, por lo que pueden utilizar la energía proveniente del sol, que es una fuente inagotable y barata de energía. Otra ventaja de estos motores es la gran experiencia que existe en su utilización, lo que presupone desarrollos optimizados a nivel comercial. El interés suscitado por los motores Stirling en las últimas décadas se debe también a su capacidad para producir energía mecánica de una manera menos agresiva para el medio ambiente que los motores de combustión interna, y a su capacidad de producción de energía mecánica no explosiva, lo que convierte a este motor en un motor limpio y silencioso.

### 3.1 El motor Stirling como sistema generador.

El motor Stirling, como se afirmó anteriormente, es un motor de combustión externa en el cual el fluido de trabajo sigue un ciclo cerrado. Esto permite, por un lado escoger un fluido termodinámicamente óptimo porque no van a haber pérdidas significativas del mismo, y por otro lado emplear presiones elevadas para aumentar la potencia específica de los motores.

El rendimiento mejora con la temperatura del foco caliente del ciclo, por lo cual el objetivo es ir a temperaturas tan altas como sea posible. Esta es la razón de que en las aplicaciones solares se emplee el motor Stirling con tecnologías de concentración con discos parabólicos (concentración en foco), con lo cual se consiguen fácilmente temperaturas más allá de las posibilidades de operación de los motores actuales. Por tanto, en la actualidad la temperatura del foco caliente del motor Stirling está en el límite de la que admiten los materiales empleados (650-800°C), con lo cual se obtienen rendimientos térmicos del motor de un 30-40%. Por otro lado, para maximizar la potencia específica del motor se emplean altas presiones del fluido de trabajo (50-200 bar), lo cual, junto a la naturaleza alternante del movimiento de los pistones, introduce dificultades en el sellado.

El ciclo Stirling hace uso de un regenerador para conseguir un intercambio de calor eficiente con las fuentes de calor externas. De esta forma, los únicos intercambios de calor con fuentes externas se realizan a temperatura constante, siendo uno con la fuente caliente a la máxima temperatura del ciclo, y el otro con la fuente fría a la mínima temperatura del ciclo. Por tanto el rendimiento térmico de este ciclo será muy parecido al de un ciclo de Carnot operando entre estas dos fuentes de temperatura extremas. Se debe notar que el ciclo de Carnot es un ciclo reversible, lo que implica que todos los procesos del mismo lo son, mientras que en el ciclo Stirling existen dos evoluciones que no son adiabáticas-isentrópicas sino isocóricas, por lo que será necesario proporcionar y extraer calor del fluido en estas etapas del ciclo. El calor intercambiado en estas etapas se transfiere internamente de una parte del fluido de trabajo al otro mediante el regenerador, con lo cual no se requiere la participación de las fuentes externas.

En 1984, con un sistema disco parabólico y un motor Stirling se consiguió el mayor rendimiento de conversión solar-eléctrico hasta el momento, 29'4%, con un motor Stirling de 25 kW eléctricos, con hidrógeno como fluido de trabajo a 200 bar y una temperatura de ciclo de 720°C. El rendimiento del motor Stirling fue del 41%. En la actualidad, la potencia en este tipo de motores suele oscilar entre los 5 y los 25 kW, con rendimientos entre el 30 y el 40%.

### 3.2 El motor SOLO V161<sup>26</sup>

De entre las distintas aplicaciones en las que se utiliza en la actualidad el motor V161 de SOLO, destaca su versión solar con más de 40.00 horas de funcionamiento. En capítulos anteriores se analizaron sistemas disco parabólico que utilizaban este motor, como el sistema EuroDish que utilizaba un motor de este tipo de 10 kW.

---

<sup>26</sup> Para obtener más información de los motores disco Stirling, visítese la página [www.soloengines.com](http://www.soloengines.com).



Figura 43. Motor SOLO V161.

El motor V161 es la evolución de los anteriores motores de la empresa SOLO utilizados en los prototipos de generaciones previas de sistemas disco Stirling. Sus características se presentan a continuación. En la Figura 44 se aprecia el motor con un corte longitudinal.

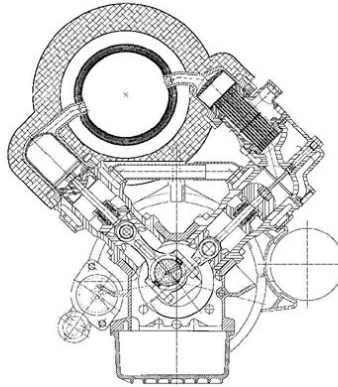


Figura 44. Sección motor SOLO V161.

En la Tabla 11 se muestran los parámetros geométricos y de funcionamiento del motor.

Longitud	1280 mm
Profundidad	700 mm
Altura	980 mm
Peso	460 kg
Potencia eléctrica	10 kW
Diseño	Dos cilindros en V
Capacidad del cilindro	160 cm <sup>3</sup>
Gas de trabajo	Helio
Presión de operación máxima	150 bar
Velocidad de giro nominal	1500 r.p.m
Quemador auxiliar	16-40 kW (Gas natural)

Tabla 11. Parámetros geométricos y de funcionamiento del motor.

A continuación se presentan los datos de operación más importantes para el motor SOLO V161, obtenidos de una modelización realizada recientemente por la Universidad Politécnica de Sevilla sobre su unidad EuroDish de 10 kW<sup>27</sup>.

<sup>27</sup> Datos obtenidos del documento “*Thermal Model of the EuroDish Solar Stirling Engine*”, de Valeriano Ruiz Hernández, del Grupo de Termodinámica y de Energías Renovables de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla, Febrero de 2008.

Potencia suministrada: 28'46 kW
Presión media: 112'8 bar
Potencia obtenida: 13'67 kW
Rendimiento indicado del motor: 48%

En la Figura 45 (a) se observa como la temperatura del fluido de trabajo llega hasta los 1000° K en el cilindro de expansión al calentarse el fluido. Esta situación, como era de suponer, coincide con las mayores presiones en el cilindro, como se observa en la Figura 45 (b). Situación inversa ocurre con los puntos de mínima temperatura que coinciden con los de mínimas presiones.

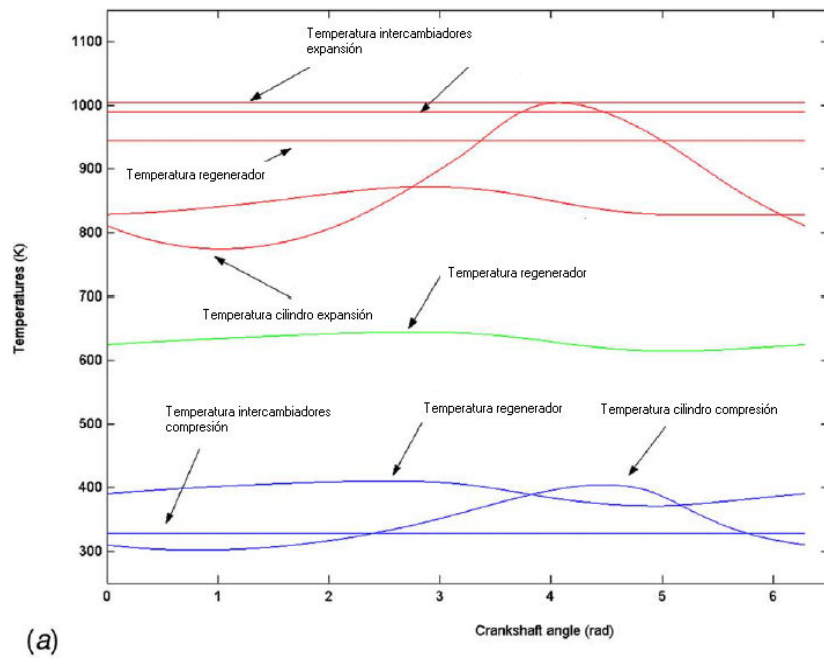


Figura 45. (a): Variación de la temperatura en función del ángulo del cigüeñal.

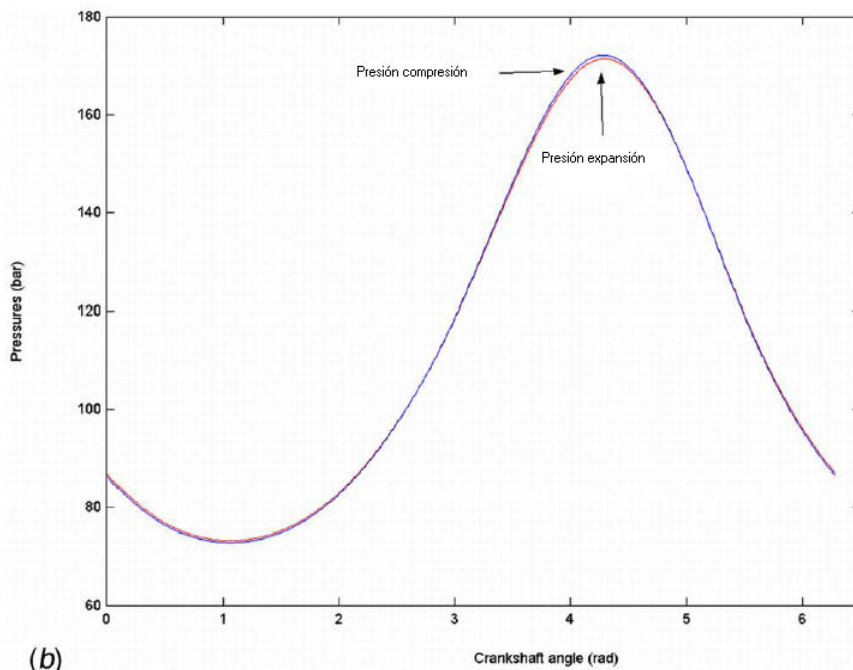


Figura 45 (b): Variación de la presión en función del ángulo del cigüeñal.

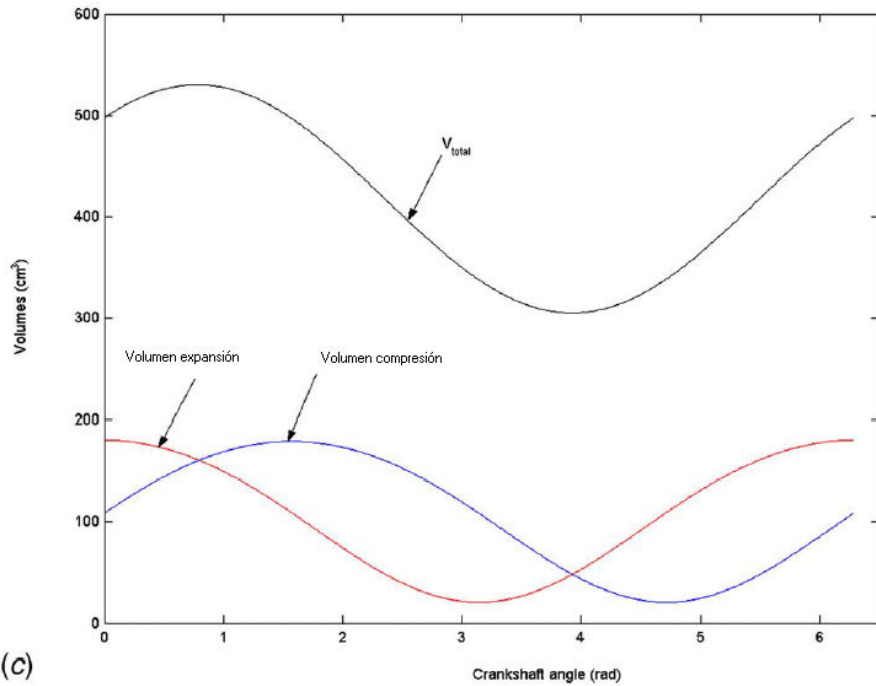


Figura 45 (c): Variación del volumen en función del ángulo del cigüeñal.

### 3.3 Pérdidas en el motor Stirling<sup>28</sup>.

Las pérdidas de energía en un motor Stirling son debidas a procesos mecánicos y termodinámicos. La compresión y la expansión no son adiabáticas. Los intercambiadores no son ideales ya que existen pérdidas de presión y de calor. Para predecir con exactitud la energía y la eficiencia del motor, se necesita comprender cuales son las principales pérdidas mecánicas.

#### 3.3.1 Energía disipada por la caída de presión en los intercambiadores de calor. $d\dot{Q}_{PCh}$

La caída de presión debida a la fricción y a los cambios de sección en el intercambiador viene dada por la ecuación:

$$\Delta p = \frac{-2 \cdot f_r \cdot \mu \cdot G \cdot V}{A \cdot d^2 \cdot \rho}$$

donde G es el flujo másico de gas de trabajo por unidad de área ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), d es el diámetro hidráulico (m),  $\rho$  la densidad del gas ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), V el volumen ( $\text{m}^3$ ) y  $f_r$  es el factor de fricción de Reynolds.

La generación interna de calor ocurre cuando el gas es forzado en su movimiento contra las fuerzas aerodinámicas de fricción, cuyo valor viene determinado por la ecuación siguiente:

$$d\dot{Q} = - \frac{\Delta p \dot{m}}{\rho}$$

El calor total generado por la caída de presión en los diferentes intercambiadores es:

$$d\dot{Q}_{Pch} = d\dot{Q}_{Pchf} + d\dot{Q}_{Pchr1} + d\dot{Q}_{Pchr2} + d\dot{Q}_{Pchh}$$

<sup>28</sup> Véase el documento "Analysis and design consideration of mean temperature differential Stirling engine for solar application", de Iskander Tlili y otros, de la Escuela Nacional de Ingenieros de Monastir, Túnez.

### 3.3.2 Pérdidas de energía debidas a conducción interna. $d\dot{Q}_{Pcd}$

La energía perdida debido a la conductividad interna entre las partes calientes y frías del motor es directamente proporcional a la diferencia de temperatura a la salida del intercambiador; las expresiones siguientes muestran su comportamiento:

$$d\dot{Q}_{Pcdr} = k_{cdr} \frac{A_r}{L_r} \cdot (T_{r-h} - T_{f-r})$$

$$d\dot{Q}_{Pcdf} = k_{cdf} \frac{A_f}{L_f} \cdot (T_{f-r} - T_{c-f})$$

$$d\dot{Q}_{Pcdh} = k_{cdh} \frac{A_h}{L_h} \cdot (T_{h-d} - T_{r-h})$$

Luego las pérdidas totales por conducción son:

$$d\dot{Q}_{PcdT} = d\dot{Q}_{Pcdr} + d\dot{Q}_{Pcdf} + d\dot{Q}_{Pcdh}$$

### 3.3.3 Pérdidas por conducción externa. $d\dot{Q}_{Pext}$

Las pérdidas por conducción externa se dan en el regenerador al no ser este adiabático. Estas pérdidas se especifican en el coeficiente de adiabaticidad del regenerador,  $\varepsilon \leq 1$ , definido como el cociente entre el calor cedido en el regenerador por el gas de trabajo en su camino hacia el cilindro de compresión y el calor recibido por el gas de trabajo en el regenerador a su paso hacia el cilindro de expansión. De aquí se deduce que, si no estamos en el caso ideal de  $\varepsilon=1$ , el calor robado por el regenerador al fluido en su movimiento hacia el espacio de compresión no se restituirá por completo en su movimiento de vuelta. La energía perdida por conducción externa es:

$$d\dot{Q}_{Pext} = (1 - \varepsilon)(d\dot{Q}_{r1} + d\dot{Q}_{r2})$$

La efectividad del regenerador se puede calcular mediante la aplicación del método  $\varepsilon$ -NTU:

$$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU} \quad NTU = \frac{h \cdot A_{wg}}{C_p \cdot \dot{m}}$$

donde NTU es el número de unidades de transferencia de calor,  $h$  es el coeficiente total de transferencia de calor,  $A_{wg}$  el área humedecida por el gas de trabajo del intercambiador,  $C_p$  es el calor específico a presión constante y  $\dot{m}$  es el flujo másico en el regenerador.

### 3.3.4 Pérdidas de calor asociadas al desplazamiento del émbolo. $d\dot{Q}_{Pshl}$

El movimiento del pistón entre el espacio caliente y frío dentro del motor introduce otro mecanismo de transferencia de calor en el sistema. Así se ve aumentada la transferencia de calor entre la zona caliente y la fría. El displacer absorbe una cierta cantidad de calor de la superficie caliente que transporta hasta la zona fría, cuyo valor se representa por la expresión:

$$d\dot{Q}_{Pshl} = \frac{0.4 \cdot Z^2 \cdot k_{pis} \cdot D_d}{J \cdot L_d} (T_d - T_c)$$

donde  $J$  es la distancia anular entre el displacer y el cilindro (m),  $k_{pis}$  es la conductividad térmica del pistón ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ),  $D_d$  el diámetro del pistón (m),  $L_d$  la longitud del pistón (m),  $Z$  es la carrera del displacer (m), y  $T_d$  y  $T_c$  las temperaturas (K) en los espacios de expansión y compresión respectivamente.

### 3.3.5 Análisis matemático.

La resolución matemática del problema de transferencia de calor en el motor puede ser resuelto de diversas maneras. Como el objetivo del presente documento no es la realización de dicho cálculo, se puede consultar el documento “*Thermal Model of the EuroDish Solar Stirling Engine*”, de Valeriano Ruiz Hernández, del Grupo de Termodinámica y de Energías Renovables de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla, de febrero de 2008, en el cual mediante la aplicación de métodos de elementos finitos se resuelven las ecuaciones de conservación de la masa y de la energía, obteniendo un rendimiento indicado de un sistema disco Stirling del 48%, un rendimiento de conversión eléctrico del 26’5% y unas pérdidas totales en el sistema de 14’91 kW sobre una entrada de potencia de 28’46 kW.

### 4.0 El mecanismo de yugo<sup>29</sup>

Los parámetros del motor deben ser optimizados para evitar pérdidas y obtener una elevada eficiencia térmica para todos los componentes del motor, especialmente en los intercambiadores de calor. El objetivo principal del motor es producir energía, y para ello debe tomarse en cuenta la existencia de condiciones que plantean limitaciones críticas en el diseño, como el fluido de trabajo, y la diferencia de temperatura entre focos. El motor presentado en la Figura 46 utiliza un mecanismo formado por un cigüeñal conectado a dos pistones mediante un mecanismo de yugo<sup>30</sup>. La principal característica de este es que no hay casi movimiento lateral de las bielas, por lo que las fuerzas que aparecen en los laterales de los pistones son muy pequeñas. La fuerza lateral del émbolo sobre la pared del cilindro es debida a la presión de los gases en la zona superior, y tiene lugar durante la carrera de trabajo útil. La razón por la que las cargas laterales son pequeñas es que estos motores operan con una moderada diferencia de presiones entre ambas caras del émbolo, reduciéndose así las pérdidas por fricción en el interior del motor. Con la falta de movimiento lateral en las bielas, hay un desequilibrio relativamente grande en las fuerzas laterales, que en este tipo de motores (patentados por Ross) se compensa por la contrarrotación del contrapeso. Este tipo de alternativa puede ser interesante para el futuro si se consigue un aumento significativo del rendimiento mediante la reducción de las pérdidas por fricción, reduciéndose a su vez las pérdidas por conducción y convección al alcanzarse menores temperaturas. Las figuras 46 y 47 presentan esquemas de dicho sistema.

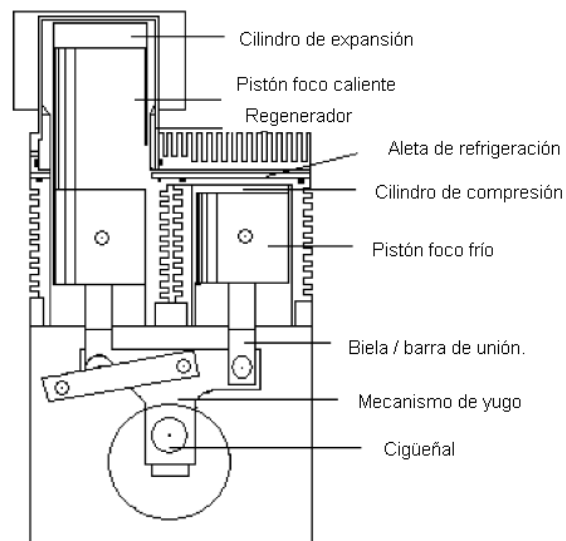


Figura 46. Sección transversal de un motor con mecanismo de yugo.

<sup>29</sup> Véase el documento “*Analysis and design consideration of mean temperature differential Stirling engine for solar application*”, de Iskander Tlili y otros, de la Escuela Nacional de Ingenieros de Monastir, Túnez.

<sup>30</sup> Se trata de un cigüeñal equipado con un contrapeso que se emplea para equilibrar el primer armónico de la fuerza de inercia alternativa, debida al desplazamiento lineal de las masas de pistones y pies de bielas.



#### 4.1 Concepto de diseño

El mecanismo de yugo no produce variaciones de volumen sinusoidales, y hace que la función de posicionamiento exacta del pistón, sea extremadamente compleja. Las variaciones de volumen derivan de consideraciones geométricas mostradas en la Figura 47 y en la Tabla 12. Los principales conceptos de diseño se listan en la Tabla 13.

Parámetros geométricos	$b_1 = \sin \varphi = r \cdot \cos \theta$ $b_\theta = \sqrt{b_1^2 - (r \cdot \cos \theta)^2}$ $X = r \cdot \sin \theta + b_\theta$
Desplazamientos	$Y_c = r[\sin \theta - \cos \theta(b_2/b_1)] + b_\theta$ $Y_e = r[\sin \theta + \cos \theta(b_2/b_1)] + b_\theta$
Variaciones de volumen	$V_c = V_{mc} + A_p(Y_{\max} - Y_c); V_e = V_{me} + A_d(Y_{\max} - Y_\theta)$ $\frac{dV_c}{d\theta} = A_p \cdot r \cdot \left[ \cos \theta + \sin \theta \left( \frac{b_2}{b_1} \right) + \frac{r \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{b_\theta} \right]$ $\frac{dV_e}{d\theta} = A_d \cdot r \cdot \left[ \cos \theta + \sin \theta \left( \frac{b_2}{b_1} \right) + \frac{r \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{b_\theta} \right]$

Tabla 12. Relaciones geométricas.

Parámetros	Valores
Fluido de trabajo	Hidrógeno
Tamaño del cigüeñal	$r=7'6$ mm
Tamaño del yugo	$b_1=29$ mm
Tamaño del pistón	$b_2=29$ mm
Desplazamiento de las extremidades	$Y_{\min}=17'75$ mm $Y_{\max}=39.28$ mm

Tabla 13. Conceptos de diseño.

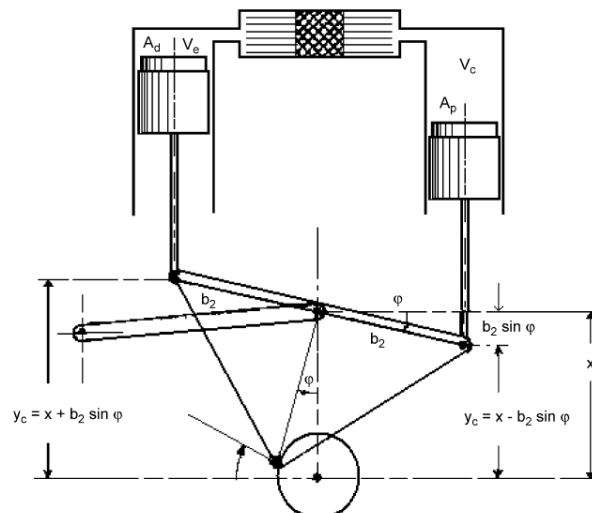


Figura 47. Derivaciones geométricas en motores de yugo.

El principal problema que presenta este tipo de motores es que las cargas laterales se trasladan a la articulación inferior. Estas tensiones internas suponen el mayor problema en el futuro de estos motores ya que condicionan su ciclo de vida de manera considerable.

## 5.0 Análisis y diseño de concentradores<sup>31</sup>.

### 5.1 Concentradores. Características y tipos.

La forma soporte de la superficie reflexiva en un sistema de disco parabólico es un paraboloide de revolución, aunque existen muchas formas de configuración de ese paraboloide, ya sea tratando de reproducir una superficie continua o directamente facetada. El concentrador o superficie reflexiva se consigue a base de espejos de vidrio o de películas reflectantes. El tamaño del concentrador dependerá tanto de la potencia nominal como de la energía a generar en un periodo de tiempo para unas determinadas condiciones de radiación solar y rendimientos asociados de los elementos que constituyen el sistema.

En la Figura 48 se muestran distintos tipos de concentradores. Además de los discos de vidrio facetado soportado sobre metal, se han desarrollado prototipos con reflectante en primera o segunda superficie, sobre soporte metálico o polimérico, con curvatura conformada de modo permanente o controlable (por ejemplo vacío en los reflectantes de la membrana), etc. A nivel óptico los más prometedores son los discos de membrana tensionada de una sola faceta. El problema de estos concentradores de membrana tensionada es su excesivo coste, que los hace escasamente competitivos a nivel de mercado. Por eso, en la actualidad se utilizan otro tipo de estructuras más baratas, y por lo tanto más competitivas, a pesar de sacrificar parte del rendimiento tan elevado que proporciona el sistema.



*Figura 48. Tipos de concentradores. En sentido horario encontramos: concentrador multifacetado, concentradores de segunda superficie y de membrana tensionada.*

Los principales problemas técnicos a resolver, con relación al disco, son la adherencia de las películas reflectantes a la estructura, su conformado parabólico, la degradación de la superficie y la reducción de peso en la estructura (que redundará en una reducción del coste específico).

En la Figura 49 se muestra el disco australiano de ANU, de 400 m<sup>2</sup> y 50 kW. Nótese que aunque en la mayoría de los prototipos el área del concentrador está entre 40 y 120 m<sup>2</sup> y la

---

<sup>31</sup> Sobre los tipos de concentradores y su evolución es interesante la información recogida en el documento “EuroDish – The next milestone to decrease the costs of dish Stirling systems towards competitiveness”, de Peter Séller, DLR Plataforma Solar de Almería. También es de interés el “Curso sobre sistemas solares de concentración”, de la plataforma PSA, Unidad de Discos Parabólicos de Félix Téllez Sufrategui.

potencia eléctrica máxima por equipo es del orden de 10 a 25 kW, se han construido discos de mayor tamaño, como el citado ANU.



Figura 49. Prototipo australiano ANU.

### 5.2 Diseño del concentrador. Aspectos de diseño<sup>32</sup>.

Durante el periodo 1980-1995 el desarrollo en Europa de sistemas disco Stirling pasaba por la utilización de concentradores de membrana metálica con motores de 10 kW de SOLO v160, como muestra la Figura 50 donde se aprecian los sistemas DISTAL I y DISTAL II. Ambos diseños estaban basados en tecnologías que utilizaban una membrana de metal estirado con forma de parábola. La membrana se componía de dos capas: una de metal y una de cristal superpuesta a la anterior que reflejaba la luz solar. La principal diferencia entre ambos sistemas era el sistema de seguimiento, cuyas características operativas se describen en el apartado séptimo de este capítulo.

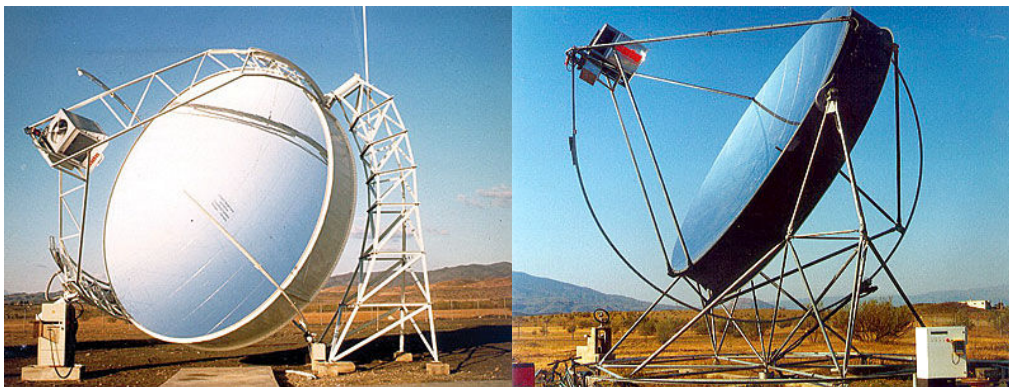


Figura 50. Sistema DISTAL I y DISTAL II.

En la última generación de sistemas disco Stirling el diseño con membrana estirada ha perdido mucho peso, habiendo aparecido otro tipo de diseños que tratan de conseguir diseños para unidades aisladas que fuesen capaces de mantenerse erguidas a un coste razonable, ya que se esperaba que las primeras implantaciones comerciales fuesen de unidades individuales. Los cuatro principales diseños que se seleccionaron como factibles en el desarrollo de esta última generación aparecen en la Tabla 14 junto con algunas de las características más importantes del concentrador. Su correspondiente estructura se observa en la Figura 51.

---

<sup>32</sup> Para ver la evolución de los concentradores en las primeras generaciones véase el documento “A compendium of Solar Dish Stirling Technology” de William B. Stine, Catedrático de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica del Estado de California.

Realizando un primer análisis de los datos observamos que la estructura formada por láminas de cristal unidas presenta un peso menor del concentrador, lo que supondrá una estructura de la instalación más ligera y, a priori, más barata.

	(a) Membrana de metal de un solo componente	(b) 19 membranas de metal el mismo perímetro.	(c) 18 espejos de fibra formando una superficie	(d) Multitud de láminas de cristal formando una estructura
Diámetro exterior (m)	8'76	9'68	8'5	8'5
f/D radio	0'57	0'65	0'53	0'53
Masa del concentrador (kg)	2800	2950	2170	1770

Tabla 14. Datos característicos de los diferentes tipos de diseños.

Para realizar el análisis de cada diseño se deben tener en cuenta los aspectos de fabricación, de ingeniería, el mantenimiento de la unidad y la resistencia de la estructura a cargas (viento). En este análisis se puede afirmar que la estructura formada por láminas de cristal es la más adecuada ya que, como se afirmó anteriormente, es la más ligera y la que necesita un soporte que estructuralmente soportará cargas más ligeras, siendo además más fácil de fabricar que las estructuras de membranas, ya que es más fácil cortar y pegar cristales, que montar membranas en pesadas estructuras donde se necesita vacío entre ambas para conseguir la forma parabólica.

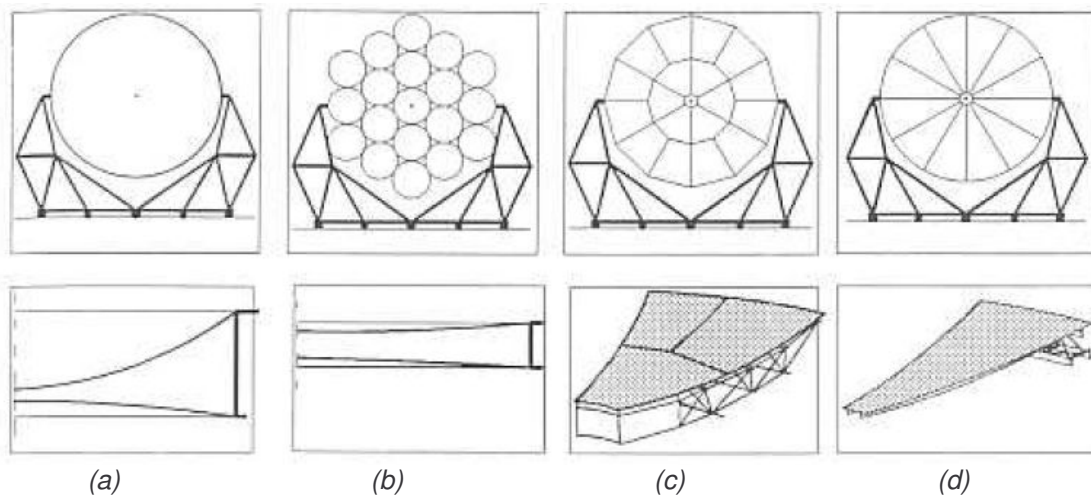


Figura 51. Principales construcciones para concentrador.

Otra ventaja que posee la estructura compuesta por láminas de cristal frente a las estructuras de membrana es la forma en la que se transmiten los esfuerzos de la estructura, o de un punto del propio concentrador, al resto de la superficie reflectante, lo cual repercutirá de una forma trascendental en la capacidad del sistema para reflejar la radiación solar. Mientras que en la estructura con membrana los esfuerzos se transmiten a toda la estructura, haciéndola perder su estructura característica, y concentrando la radiación solar de manera ineficiente, en la estructura formada por láminas de cristal, los esfuerzos internos nos se transmiten a las láminas contiguas de una manera tan efectiva, por lo que en conjunto la estructura se deforma menos, manteniendo una mayor efectividad en la concentración. Este factor es tan importante

que el prototipo SES (Stirling Energy System) americano, apuesta claramente por la modularidad en el concentrador con diversos objetivos: reducción de los esfuerzos internos, mejora en el ensamblaje, facilita el mantenimiento. Así, como se observa en la Figura 52, el diseño de este sistema es bastante distinto del de los sistemas europeos actuales.

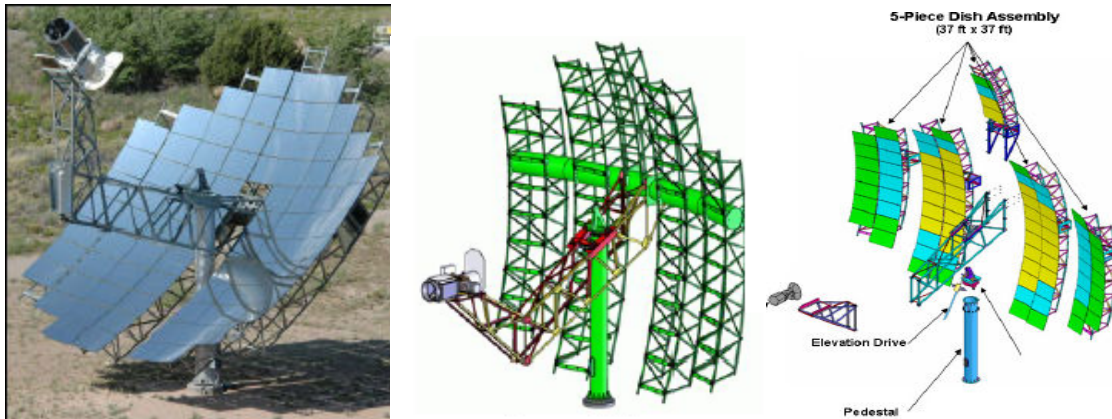


Figura 52. Sistema SES. Estructura soporte. Módulos del sistema.

En lo referente al análisis estructural debemos destacar que es necesario conocer los esfuerzos internos producidos en la estructura por la sujeción del motor Stirling, de alrededor de 450 kg de peso. Además, se deben estudiar los esfuerzos aparecidos a consecuencia de las deformaciones provocadas en la estructura por las elevadas temperaturas y los efectos del viento sobre la estructura. Para ello se utilizan simulaciones por ordenador que proporcionan resultados como los mostrados en la Figura 53.

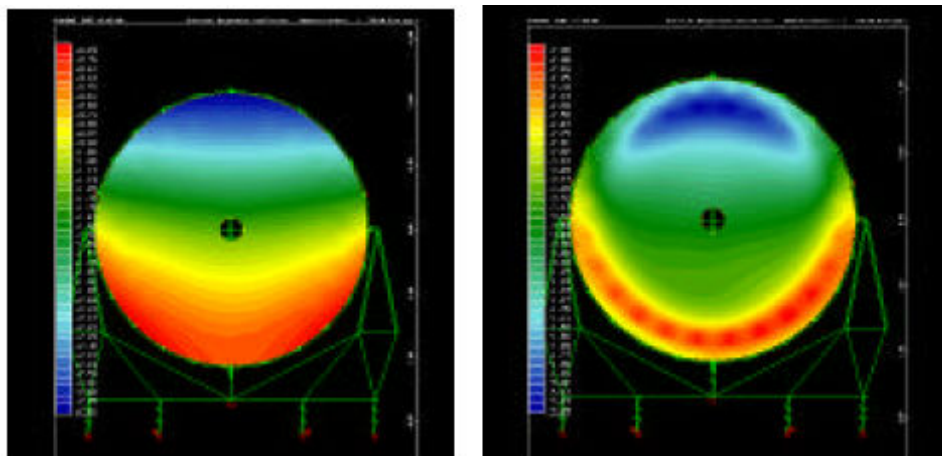


Figura 53. Esfuerzos internos en el disco. Izquierda sin viento; derecha con viento.

Se debe tener en cuenta que mientras que el motor, el receptor y el generador están caracterizados por rendimientos energéticos, definidos como cocientes entre potencia de entrada y salida, el concentrador, viene definido por el área de apertura del concentrador, el área de apertura del receptor, la fracción de área de apertura no sombreada, la reflectividad de la superficie y por la fracción de interceptación (fracción de energía reflejada por el concentrador que entra en el receptor alcanzando la superficie absorbadora).

### 6.0 Análisis del receptor. Corrosión en receptores de reflujo heat pipe.

La principal función del receptor es hacer de punto de unión entre el motor y el concentrador. Como se desarrollo en el Capítulo II del presente documento, existen varios tipos de receptores. Entre ellos destacan los tubos de iluminación directa, donde los gradientes de temperatura dañan los materiales del motor y producen variaciones en su funcionamiento no

deseadas, y los receptores de reflujó, que haciendo uso de un fluido intermedio, consiguen transmitir la energía al motor Stirling de una manera uniforme en toda su superficie, lo que provoca un mejor funcionamiento, a costa de una pérdida importante de la energía recibida por el sistema receptor<sup>33</sup>.

En la Figura 54 se muestra el funcionamiento de un receptor de tubo de calor. El sodio se distribuye a través de la superficie receptora del flujo de energía. El sodio absorbe este calor entrante, evaporándose y subiendo hasta el intercambiador de calor, donde tras ceder gran parte de la energía que contiene al gas de trabajo del motor, condensa volviendo a caer acumulándose en la piscina de sodio, desde donde se distribuye posteriormente a la superficie receptora por capilaridad.

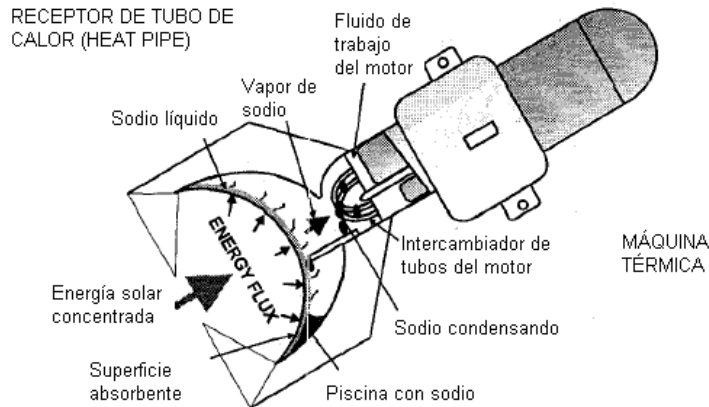


Figura 54. Funcionamiento de un receptor de tubo de calor.

El principal problema con el que se enfrentan este tipo de receptores es la corrosión, que en sistemas con disoluciones líquidas de sodio, cuenta con dos principales mecanismos iniciadores:

- a) Elementos metálicos transferidos a la disolución de sodio líquido.
- b) Elementos no metálicos en las aleaciones o en los componentes metálicos, que han retenido oxígeno en su estructura.

Además, si el sistema no está perfectamente aislado del exterior, cabe la posibilidad de que se introduzca oxígeno en el sistema. El oxígeno aumenta la solubilidad de los metales en el sodio, acelerando los efectos de la corrosión. En aleaciones de hierro o níquel, el oxígeno provoca que en contacto con el sodio se formen procesos de corrosión, lo que provoca dos efectos indeseados:

- 1) Erosión de los materiales hasta llegar a fallo crítico en funcionamiento
- 2) Aparición de capas de óxidos que empeoran las propiedades térmicas de los materiales, dificultando la transferencia de calor y reduciendo así la eficiencia del sistema.

<sup>33</sup> Acerca de los receptores heat pipe véanse los documentos "Hybrid sodium heat pipe receivers for dish Stirling systems", de Doerte Laing y Michael Reusch, del Instituto de Termodinámica Aplicada de Stuttgart, "Dish Stirling Irbid heat pipe receiver design and test results", de James Moreno y otros, de los laboratorios Sandia National Laboratories de Albuquerque, EEUU, y el documento "Mass transport, corrosion, plugging and their reduction in solar dish Stirling heat pipe receivers". Sobre los receptores de tubos directamente iluminados se encuentra una buena descripción de su funcionamiento en el "Curso sobre sistemas solares de concentración", de la plataforma PSA, Unidad de Discos Parabólicos de Félix Téllez Sufrategui.

En la actualidad los sistemas de limpieza no son muy eficientes. Se intenta reducir la cantidad de oxígeno dentro del sistema y se intenta utilizar filtros que separen los óxidos de las disoluciones de sodio, pero la eficiencia de dichos sistemas no es muy elevada.

## **7.0 Sistema de control de seguimiento.**

Como se comentó en el capítulo anterior, el sistema de seguimiento evolucionó de seguimiento polar en DISTAL I a seguimiento en acimut-elevación en DISTAL II. Cada sistema posicionaba el disco de una manera diferente:

- Seguimiento en acimut-elevación, en el que el movimiento del sistema se realiza según dos ejes, vertical y horizontal.
- Seguimiento polar, en el que el movimiento en un eje es muy lento, pues sólo debe seguir las variaciones estacionales del sol, y el movimiento en el otro eje es a velocidad constante.

Mientras que el primer montaje es más sencillo desde el punto de vista constructivo, y recoge más radiación, el segundo es más fácil de controlar.

En los desarrollos más recientes el sistema de seguimiento en acimut-elevación es el más utilizado. Con una computadora central se calcula la posición del sol en cada instante y se transfieren esos datos al sistema que controla el posicionamiento del disco. Con este sistema de seguimiento se pueden controlar de manera automática varios discos parabólicos con únicamente una unidad de control. Así, durante el funcionamiento del proyecto DISTAL II, con más de 40.000 horas de funcionamiento, se demostró que el sistema de seguimiento en acimut-elevación es un sistema más fiable.

Otra ventaja de este nuevo tipo de sistema de seguimiento es que permitió reducir los costes totales del sistema de una forma considerable, objetivo fundamental si se pretende lograr la posterior implantación de los sistemas disco parabólico en el mercado eléctrico.

## **8.0 Costes, barreras y desarrollos actuales.**

La naturaleza modular de los sistemas disco-generador parece conducirles hacia el mercado de la pequeña generación en localizaciones aisladas. En este ámbito deberán competir económicamente con los generadores diesel, que en la actualidad ocupan la mayor parte del mercado, y con las instalaciones fotovoltaicas, que poco a poco se abren camino gracias a la política de subvenciones.

A pesar de ello, los principales proyectos con sistemas disco Stirling en la actualidad se centran en la construcción de dos centrales en California que suministrarán a la red una potencia de cientos de megavatios.

Por todos estos motivos el siguiente capítulo tratará la situación económica de los sistemas disco Stirling y se mostrará un claro ejemplo de lo que puede significar económicamente su implantación frente a los sistemas fotovoltaicos.

## **CAPÍTULO VI:**

### **VIABILIDAD ECONÓMICA DEL SISTEMA,**



## **1.0 Viabilidad económica del sistema disco Stirling.**

En cualquier proyecto de construcción y puesta en marcha de una instalación energética se debe realizar un desembolso económico que permita adquirir unos bienes e infraestructuras capaces de sustentar la instalación proyectada. Estos bienes conllevan una serie de pagos en el tiempo que se deben analizar para conocer la viabilidad económica del proyecto. En el presente capítulo, partiendo de lo anteriormente expuesto, se realizará un estudio de la viabilidad económica de los sistemas disco Stirling.

### **1.1 Costes del sistema.**

Los costes de explotación de una instalación energética<sup>34</sup> se dividen en costes fijos y en costes variables. Los costes fijos, a diferencia de los variables, no cambian con la cantidad de energía producida, e incluyen una serie de costes relacionados con la adquisición de los bienes de equipo, con el mantenimiento de la instalación (personal de mantenimiento) y con el personal de operación. Los costes de mantenimiento y los de operación suelen unirse en el denominado *coste de mantenimiento y de operación*. En energías renovables, al no existir coste del combustible consumido, el coste de mantenimiento y operación se puede representar como un porcentaje del coste de adquisición. Por su parte, los costes variables incluyen costes de mantenimiento (debido a imprevistos en el funcionamiento, como averías) y costes de combustible consumido. Este último coste debe ser tenido en cuenta debido a la tendencia actual de crear sistemas disco parabólico híbridos que puedan cubrir la demanda existente en cualquier momento quemando gas natural.

### **1.2 Ingresos del sistema.**

Los ingresos de una instalación energética son de diversa índole. En primer lugar encontramos los ingresos procedentes de la venta de la energía generada por la instalación. Estos ingresos son insuficientes para hacer rentable la puesta en marcha de una instalación renovable. Por ello, el gobierno de la nación, otorga una serie de ayudas estatales que fomenten el desarrollo de dichas instalaciones, entre las que encontramos desgravaciones fiscales, incentivos financieros, incentivos a la producción, subvenciones y por último, los ingresos por venta de derechos de emisiones.

## **2.0 Costes orientativos en instalaciones generadoras de energía eléctrica**<sup>35</sup>

En el presente capítulo se muestran valores representativos de los costes que soportan los distintos sistemas de generación de los que se dispone en la actualidad. Por regla general, el coste de adquisición es el más importante de los que conlleva una instalación de producción de energía eléctrica. Por ello, comparando los diferentes costes de cada tipo de instalación se obtendrá una idea de la competitividad de cada una de ellas, y más concretamente de en qué punto se encuentran los sistemas disco Stirling.

### **2.1 Coste de adquisición.**

A continuación se presentan las figuras 55 y 56 que muestran los costes de adquisición de las instalaciones de generación. En la Figura 55 se muestran los costes de las instalaciones basadas en combustibles fósiles y en la energía nuclear, mientras que en la Figura 56 se observan los costes de adquisición de las instalaciones basadas en energías renovables.

---

<sup>34</sup> Véase “Apuntes asignatura Ingeniería Energética. Capítulo II. Análisis económico de proyectos energéticos” de Antonio Lecuona y la página Web del Ministerio de Industria, [www.mityc.es](http://www.mityc.es).

<sup>35</sup> Véanse “Apuntes asignatura Ingeniería Energética. Capítulo II. Análisis económico de proyectos energéticos” de Antonio Lecuona, la página Web del Ministerio de Industria, [www.mityc.es](http://www.mityc.es), la página Web del Departamento de Estado de Energía de EEUU, [www.eere.energy.gov](http://www.eere.energy.gov), el documento “Energía 2008”, disponible en la página Web [www.foronuclear.es](http://www.foronuclear.es) y la Web del Ciemat, [www.ciemat.es](http://www.ciemat.es).

En primer lugar se observa que los costes de las instalaciones basadas en energías no renovables son menores que el de las basadas en energías renovables, llegando algunas de las tecnologías renovables a un nivel de costes que las hace inviables, sin ayudas gubernamentales, actualmente.

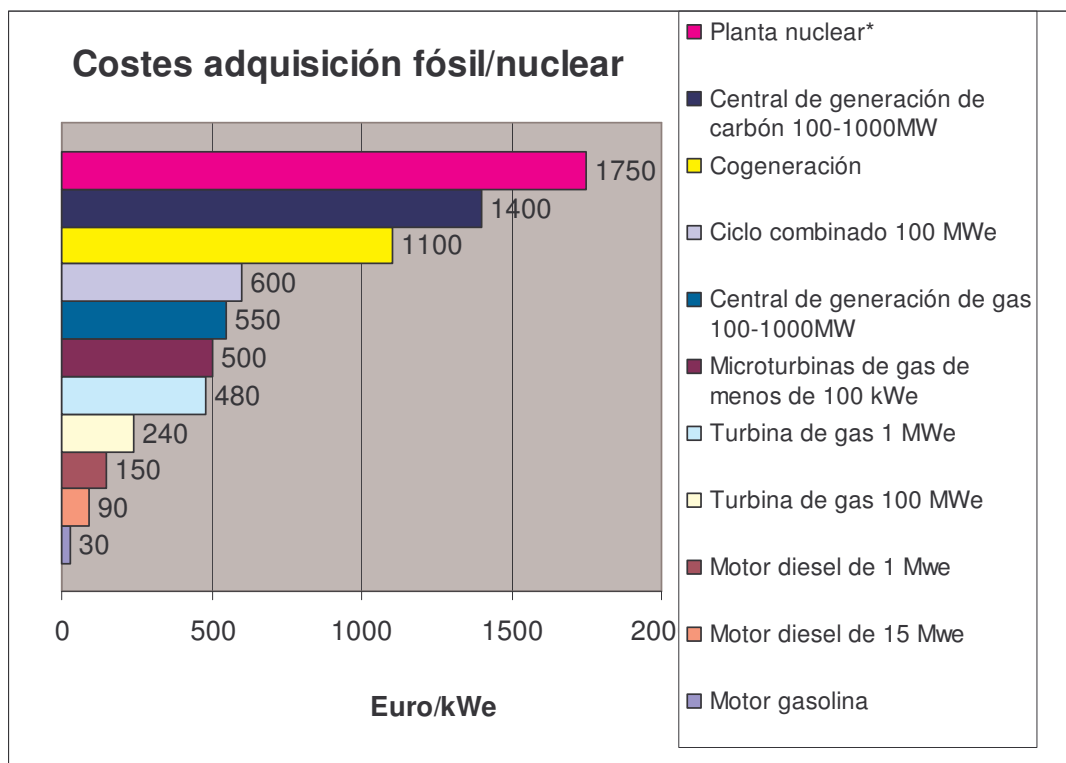


Figura 55. Costes de adquisición fósil/nuclear.

El límite de lo rentable se sitúa en un coste de adquisición de unos 2.000 euros/kW, coste al que se aproxima la generación nuclear. En el otro extremo se sitúan los generadores diesel y gasolina, opciones muy baratas en adquisición al tener gran experiencia de fabricación. El principal problema de estos generadores, además del problema medioambiental ya mencionado en capítulos anteriores, es el encarecimiento de los combustibles a medida que disminuyen sus reservas. Esta tendencia hará que los sistemas basados en la combustión de derivados del petróleo dejen de ser rentables en unas décadas, ya que aunque los costes de adquisición se mantendrán, los costes variables relacionados con el consumo de combustible se irán incrementando con el tiempo.

Por otro lado se sitúan los costes de adquisición de las energías renovables, Figura 56, donde se pueden observar dos grupos bien diferenciados:

- instalaciones productoras de energía eléctrica de gran tamaño basadas en tecnología eólica, en tecnología hidráulica y en la combustión de biomasa, instalaciones que presentan unos costes de adquisición reducidos que hacen que la instalación sea viable desde el punto de vista económico.
- Instalaciones eólicas de poca potencia, solares de alta temperatura y fotovoltaicas, tecnologías que presentan elevados costes de adquisición. Comentario especial merecen las instalaciones basadas en tecnologías solares de alta temperatura, especialmente las que se basan en colectores cilíndrico parabólico, cuyos costes empiezan a ser competitivos en la generación actual.

Estas tecnologías renovables, excepto la biomasa, presentan como gran ventaja la ausencia de costes añadidos por el combustible consumido. Además, se espera que a medida que se desarrollen los nuevos prototipos y se comience la fabricación en serie, los costes de adquisición se reduzcan. Muy llamativa es la situación de la tecnología fotovoltaica, ya que con su baja eficiencia, presenta unos costes muy elevados.

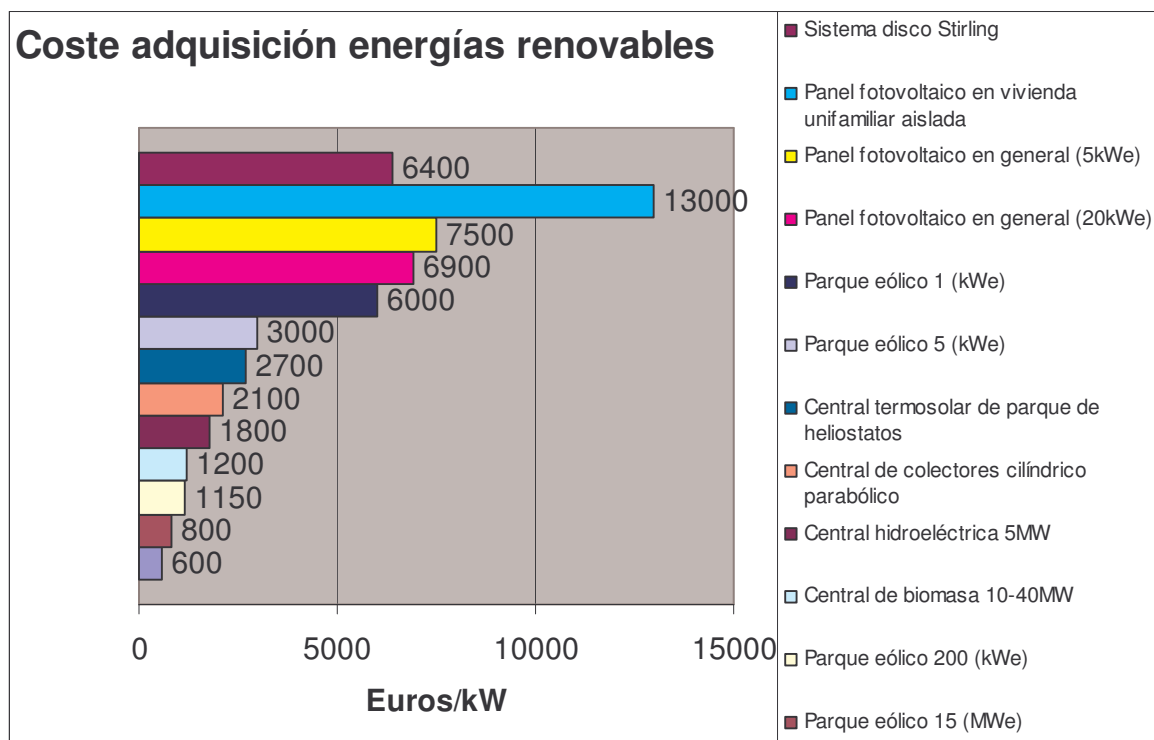


Figura 56. Coste adquisición energías renovables.

## 2.2 Costes de operación y mantenimiento.

Como se indicó en el apartado anterior, los costes de operación en instalaciones renovables se pueden expresar como un porcentaje de los costes de adquisición, al no tener que soportar este tipo de instalaciones costes relacionados con el consumo de combustible. La Tabla 15 muestra valores representativos en algunos de estos sistemas.

Como podemos observar los sistemas disco Stirling presentan unos costes de operación y mantenimiento muy elevados en la actualidad debido a dos factores principales. El primero es la falta de unidades en el mercado, ya que la producción en serie reduce los costes y mejora la fiabilidad, y el segundo, muy relacionado con el primero, es la fiabilidad del sistema (al hablar de prototipos, la fiabilidad de dichos sistemas es todavía bastante limitada).

Algo similar le ocurre a los campos de helióstatos, aunque en menor medida, ya que estos comienzan a aproximarse a los límites de la rentabilidad.

También es destacable el comportamiento de los sistemas fotovoltaicos. A pesar de su bajo rendimiento y de su alto coste general, estos sistemas han acumulado muchas horas de experiencia comercial y en el ámbito de la fabricación, lo que ha optimizado su desarrollo. Debido a esto presentan una elevada fiabilidad y unos costes de operación y mantenimiento bastante bajos. Este dato nos conduce a pensar que la fabricación en serie de unidades disco Stirling obtendría los mismos resultados, mejorando su fiabilidad y disminuyendo sus costes de adquisición hasta los 4900 euros/kWe<sup>36</sup>.

<sup>36</sup> Keck T., Shiel W. "EnviroDish and EuroDish-system and Status", Stuttgart 2003.

Tipo de central eléctrica	Potencia instalada	Coste anual de operación y mantenimiento (en % de la inversión de adquisición)	Coste anual de operación y mantenimiento (€/kWe)
Turbina eólica convencional	-	1-2% (alquiler de terrenos)	60-16
Solar fotovoltaica	1 kW	3% (instalación sin conexión a la red)	390
	5kW	0'5-0'6% con conexión a la red 1-1'8% sin conexión a la red <sup>37</sup>	41 105
	20 kW	0'25-0'3% con conexión a la red 0'5-0'9% sin conexión a la red	17 31
Hidráulica	5 MW	3%	45
	20 MW	2%	12
Concentradores CCP <sup>38</sup>	30 MW	13%	273
Campo helióstatos <sup>4</sup>	15 MW	15%	459
Disco Stirling <sup>39</sup>	10 kW	19%	1.360

Tabla 15. Coste de operación y mantenimiento en centrales renovables.

Una vez analizados los costes más importantes para energías renovables, en el apartado siguiente, se mostrarán datos orientativos del coste por energía producida para instalaciones que consuman combustible.

### 2.3 Coste por energía producida.

En actividades energéticas que mayoritariamente consuman un combustible, el coste de mantenimiento se cuantifica en primera aproximación como un coste por energía producida, generalmente en €/kWh o en €/MWh, o por hora de funcionamiento.

Algunos datos orientativos se muestran en la Tabla 16. Observamos que este coste varía bastante de un equipo a otro.

Motor térmico	Combustible	Coste unitario (€/MWh)
Turbina de vapor	Biomasa	2
	Carbón	< 2
	Gas natural o GLP	< 2
Motor alternativo	Gas natural o GLP	6
	Biogás	12

Tabla 16. Coste unitario por kWh producido

Nótese que las impurezas del biogás encarecen el coste del mantenimiento, además de añadir nuevos costes debido a la necesidad de almacenarlo y purificarlo, frente al gas natural.

Una vez que se conocen los principales costes de una instalación, el siguiente paso es detallar sus ingresos, tras lo cual se podrá conocer el coste total unitario de la instalación o coste de la electricidad, que será el parámetro que finalmente permita comparar la viabilidad actual de cada uno de los sistemas.

<sup>37</sup> El coste aumenta debido a la necesidad de incluir baterías de almacenamiento.

<sup>38</sup> Datos obtenidos de *Energía solar termoeléctrica 2020*, Greenpeace.

<sup>39</sup> Curso sobre "Sistemas Solares de Concentración", unidad discos parabólicos de Félix Téllez Sufrategui, CIEMAT-PSA

## 2.4 Coste de la electricidad.

En las tablas 17 y 18 se muestran las previsiones que realizó el Departamento de Energía de EEUU acerca del coste de la electricidad que tendrían los distintos sistemas basados en tecnologías renovables<sup>40</sup>. Aunque las previsiones se hicieron en 2001, y están ligeramente desplazadas de los valores actuales, son una fuente fiable de la evolución esperada en el precio del coste de la electricidad de los sistemas renovables.

Tecnología	1997	2000	2010	2020	2030
Biomasa - quema directa	8,7	7,5	7	5,8	5,8
Biomasa - gasificación	7,3	6,7	6,1	5,4	5
Geotérmica	10,9	10,1	8,3	6,5	5,3
Campo helióstatos		13,6	5,2	4,2	4,2
Cilindro parabólica	17,3	11,8	7,6	7,2	6,8
Disco Stirling		17,9	6,1	5,5	5,2

(<sup>x</sup>) Sistemas híbridos con disponibilidad total.

Tabla 17. Coste de la electricidad en sistemas de disponibilidad total (cent.\$/kWh).

Tecnología	1997	2000	2010	2020	2030
Fotovoltaica (residencial)	37	29,7	17	10,2	6,2
Disco Stirling (solo configuración solar)	134,3	26,8	7,2	6,4	5,9
Eólica	6,4	4,3	3,1	2,9	2,8

Tabla 18. Coste de la electricidad en sistemas intermitentes (cent.\$/kWh).

En la Tabla 19 se muestran los costes de la electricidad en instalaciones de producción de electricidad basados en la combustión de combustibles fósiles<sup>41</sup>. Solo aparecen datos actuales del coste de la electricidad, aunque la tendencia futura es la de ir encareciéndose a medida que disminuyan las reservas.

	MACI <sup>42</sup>	Turbina de gas.	Microturbinas.
Intervalo de potencia	1 kW-20 MW	500 kW-200 MW	30 kW-300 kW
Combustible	Gasóleo o gas	Gasóleo o gas	Gasóleo o liq
Eficiencia en %.	25-45	20-42	28-30
Coste de inversión (€/Kwh)	160-280	360-700	400-800
C. operación y mantenimiento (cent.€/Kwh)	0'56-0'16	0'24-0'64	0'24-0'8
Coste de la electricidad (cent.€/Kwh)	5'6-7'2	4'8-6'4	4'8-6'4
Vida útil (h)	40.000	40.000	40.000

Tabla 19. Costes de la electricidad con combustible fósil (euro/kWh).

La producción con combustibles fósiles se sitúa alrededor de los 5 céntimos de euro por kWh de energía producido. En general, se prevé que los sistemas renovables tiendan a aproximarse a este valor en las próximas décadas, encontrándose ya la energía eólica en el límite de la rentabilidad. Respecto a la posición de los sistemas disco Stirling, vemos como partiendo de muy atrás con respecto al resto de las tecnologías, esfuerzos como los realizados en el

<sup>40</sup> Datos facilitados por la página Web del Departamento de Energía de EEUU, [www.eere.energy.gov](http://www.eere.energy.gov) y en concreto del documento "Project Financial Evaluation" localizable en dicha Web.

<sup>41</sup> La Tabla 5 contiene costes en euros, frente a las tablas 3 y 4 que los contienen en dólares. En el momento de realizarse los estudios en los que se basan la situación era de una práctica paridad entre ambas monedas. En la actualidad un euro se cambia a 1'3 dólares.

<sup>42</sup> En cogeneración el coste de la energía se puede reducir utilizando gas natural al disminuir un 30% el coste de operación y mantenimiento. Además los ingresos aumentan al generar calor útil.

prototipo EuroDish permitirán alcanzar valores de rentabilidad en un periodo de unos 15 años, resultado que será totalmente dependiente de la aparición de un mercado de consumo de estas unidades que permita su fabricación en serie. También se destaca la situación de rentabilidad de la solución híbrida, con más posibilidades comerciales que la solución 100% solar.

## 2.5 Comparación entre los distintos sistemas solares de alta concentración.<sup>43</sup>

En el presente apartado se expone la situación actual de los sistemas disco parabólico frente al campo de concentradores cilíndrico parabólicos y frente al campo de helióstato.

	Colectores cilindro-parabólicos	Receptores centrales	Discos parabólicos
Tamaño	30-320 MW*	10-200 MW*	5-25 MW*
Temperatura de trabajo (°C)	390	565	750
Eficiencia neta anual	11(d)-16 %*	7(d)-20 %*	12-25 %*(e)
Grado de desarrollo	Comercial	Demostración a gran escala	Demostración de prototipos
Costes Euro/ kWh	0.12/0.14 -0.08/0.04*	0.18/0.20-0.06/0.04* 0.10/0.15 (sist. híbrido)	0.17-0.05*

\* Variación entre los años 2000-2030. (d)= valores demostrados; (e)= valores estimados

*Tabla 20. Valores característicos de sistemas de alta concentración.*

Se observa que el sistema que parte con mayor ventaja es el sistema de colectores cilíndrico parabólicos. Este sistema es el único que se encuentra en actividad comercial, con los costes de la energía más bajos de los tres. El problema de estos sistemas es su bajo rendimiento, aunque suponen una buena alternativa para el futuro para la realización de grandes plantas. Situación similar ocurre con los receptores centrales, que aunque se encuentran en la última fase de su desarrollo antes de la comercialización, presentan costes similares a los de los sistemas basados en CCP. Por su parte, los sistemas disco Stirling poseen los rendimientos más altos de las tecnologías solares. Aunque está en fase de desarrollo de prototipos, se encuentra en la actualidad en los costes de producción de los sistemas fotovoltaicos y se estima que en unas décadas alcanzará en precio a las demás tecnologías solares de alta concentración. Debido a su capacidad modular y a su alto rendimiento, se cree que el principal mercado de estos sistemas serán ubicaciones aisladas sin conexión a la red. En la actualidad los mayores problemas que sufre son su fiabilidad y la inexistencia de un sector industrial dedicado plenamente al desarrollo de sus motores.

### 3.0 Evolución de los costes en sistemas disco Stirling.

A medida que se desarrollaban nuevos prototipos desde los años 80, la tecnología en la que se basaban los sistemas disco Stirling fue modificándose para lograr optimizar los costes y las características operativas del sistema.

A continuación se muestra la Tabla 21 en la que se observan los principales cambios en el diseño de los sistemas disco motor, la tendencia que se espera que sigan durante los próximos años y su influencia en los costes del sistema.

<sup>43</sup> Datos del Departamento de Energía Americano (DoE). "Overview of solar thermal technologies" [www.eere.energy.gov](http://www.eere.energy.gov). De especial interés resultan los documentos "Advances in solar thermal electricity technology" de D. Mills, del departamento de física aplicada de la Universidad de Sidney y el documento "Térmica de concentración 06" del CIEMAT.

Categoría	Unidades de medida	Prototipo de los 80. (1997)	Sistemas híbridos (2000)	Sistemas con receptores heat pipe (2010)	Sistemas en series grandes. (2020)	Sistemas en series grandes. (2030)
Tamaño típico de la planta	MW	0.025	1	30	30	30
Potencia suministrada por modulo	kW	25.0	25.0	27.5	27.5	27.5
<b>Costes de la instalación</b>						
Concentrador	\$/kW	4.200	2.800	1.550	500	400
Receptor		200	120	90	80	80
70Capacidad híbrida			500	400	325	270
Motor		5.500	800	260	100	90
Generador		60	50	45	40	40
Sistema de refrigeración		70	65	40	30	30
Sistema eléctrico		50	45	35	25	25
Equilibrado de la planta		500	425	300	250	240
Subtotal (A)		10.580	4.805	2.710	1.360	1.175
Gastos generales (B)		220	190	150	125	110
Costes de ingeniería, 0'1·(A+B)		1.080	500	286	149	128
<b>Coste total de la planta</b>		<b>11.880</b>	<b>5.495</b>	<b>3.146</b>	<b>1.634</b>	<b>1.413</b>
Inventario material		\$/kW	120	60	12	6
Costes de arranque	350		70	35	20	18
Inventario financiero	200		40	12	4	4
Alquiler de la tierra (16'25\$/ha)	26		26	26	26	26
<b>Capital total requerido</b>	<b>12.576</b>		<b>5.691</b>	<b>3.231</b>	<b>1690</b>	<b>1.467</b>
<b>Capital total requerido sin sistema híbrido</b>	<b>12.576</b>		<b>5.191</b>	<b>2.831</b>	<b>1.365</b>	<b>1.197</b>
<b>Costes de operación y mantenimiento</b>						
Personal	Cent.\$/kWh	12	2.1	1.2	0.6	0.55
Material		9	1.6	1.1	0.5	0.5
<b>Total</b>		<b>21</b>	<b>3.7</b>	<b>2.3</b>	<b>1.1</b>	<b>1.05</b>

Tabla 21. Evolución de los costes en sistemas disco Stirling<sup>44</sup>.

<sup>44</sup> Datos facilitados por la página Web del Departamento de Energía de EEUU, [www.eere.energy.gov](http://www.eere.energy.gov), y en concreto del documento "Solar dish engine" localizable en dicha Web. Nótese que los datos de potencia por módulo se refieren a futuras plantas de producción y no a sistemas aislados.

En líneas generales se observa que los costes se reducirán a medida que se optimice el sistema, cuestión que depende totalmente de su comercialización. También es de destacar que los costes más importantes se reparten entre el concentrador, el receptor y el motor. A continuación se describen los motivos en los que se fundamentan las reducciones de los costes en cada generación.

- Tecnología 1997.

La tecnología utilizada en los sistemas disco Stirling antes del año 2000 se basaba en los prototipos de los años 80. Esta tecnología aplicada en unidades de 10 a 25 KW, presentaba rendimientos bajos de eficiencia, con motores Stirling, de alrededor del 12%. Este valor, aunque parezca insuficiente, es más elevado que el que se obtiene con placas fotovoltaicas, que logran unas eficiencias en torno al 10%. Los costes de operación y mantenimiento son elevados debido a los problemas que tenían en funcionamiento dichos prototipos.

- Tecnología 2000.

Esta tecnología presenta mejoras del rendimiento muy elevadas frente a su predecesora, con unos valores de eficiencia en torno al 23%. EL problema de las instalaciones de esta generación fue la poca fiabilidad que tuvieron debido a la tardanza en recibir repuestos en el momento de las averías, y por la falta de un plan de mantenimiento adecuado, situación reflejada en el brusco descenso de los costes de operación y mantenimiento. También es de destacar la reducción de costes en el motor y en el concentrador. Los costes en esta generación son quizá un poco bajos, ya que se estimaba que en este punto se fabricaría una serie de varias decenas de módulos, pero aun así, estos datos proporcionan una buena orientación acerca de cómo se desarrollan los principales cambios económicos.

- Tecnología 2010.

Para 2010 se esperaba la introducción de los primeros módulos comerciales, pero esta situación se va a retrasar todavía unos años. Los costes son estimados para una producción de unas 2.000 unidades al año, y muestran un descenso de los costes importante en la fase de fabricación en serie, y muy especialmente en el concentrador. La utilización del receptor heat pipe se espera que se pueda incorporar en pocos años, lo que se cree que podrá mejorar el funcionamiento del absorbedor en un 10%, aunque primero debe superar los problemas técnicos que en la actualidad sufre.

- Tecnología 2020-2030.

Desde 2010 hasta 2030 se espera que la producción de unidades se dispare hasta las 50.000 al año. No se asumen mejoras en el absorbedor tras la introducción de los tubos heat pipe, pero si se asumen en lo referente al diseño del motor, del concentrador y del receptor.

- Consumo de agua y alquiler de suelos.

No se estiman costes para consumo de agua ya que estos apenas influyen, aunque se estima que habrá que establecer fechas en las que lavar el espejo reflectante. En lo referente al alquiler del suelo se estima un coste de unos 16'3 \$/ha para estos sistemas, que necesitarán un espacio estimado de 1'2-1'6 ha/MW instalado.

#### **4.0 Análisis de costes en sistemas disco Stirling de última generación. Barreras y desarrollos actuales.**

La tecnología de los discos parabólicos Stirling se ha desarrollado lentamente en los últimos treinta años con un desarrollo algo desigual entre el concentrador, que se ha optimizado (en prestaciones/coste), y el motor Stirling.

Las dos barreras que han impedido el despegue comercial de esta tecnología han sido el alto precio del disco colector-concentrador-dispositivo de seguimiento solar y la falta de una industria de motores Stirling de escala adecuada para estas tecnologías solares. El coste

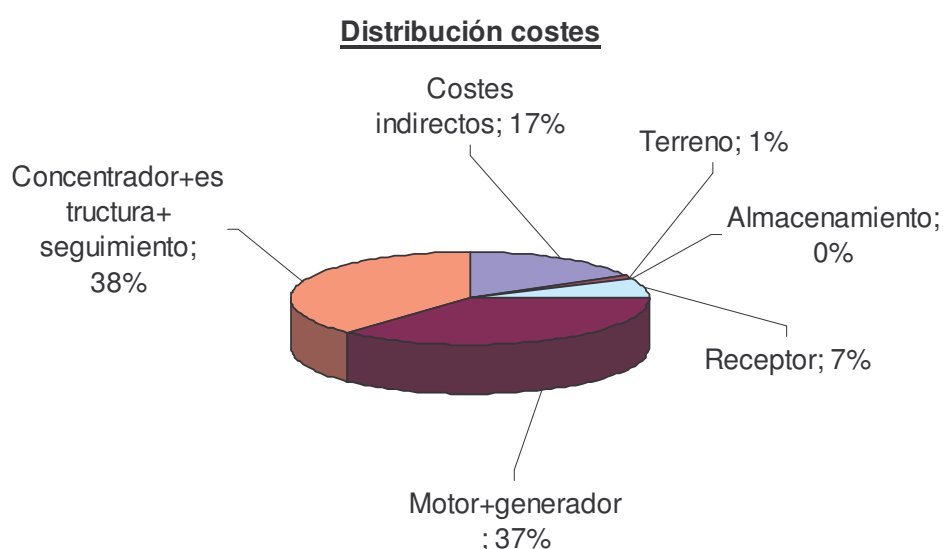


actual del sistema disco Stirling es de 8.000 € por kilovatio eléctrico, siendo los componentes de mayor coste específico (y por tanto los de mayor potencial de reducción) el disco concentrador y el motor Stirling<sup>45</sup>.

Por otro lado, la durabilidad y fiabilidad de los motores Stirling cinemáticos solarizados es, hasta la fecha, insuficiente lo que provoca disponibilidad reducida del sistema y altos costes de operación y mantenimiento. En la Figura 57 se muestra la distribución de costes del sistema.

Varios discos Stirling se han ensayado extensivamente en los últimos treinta años. En dichos ensayos se han acumulado decenas de miles de horas de experiencia. A pesar de la existencia de diversos prototipos en el mundo, el presente estudio se ha centrado de manera mayoritaria en el sistema EuroDish. Dicho sistema, de 10 kW de potencia, está en operación en varios países (España, Italia, Alemania, Francia e India).

En base a las estimaciones de varios diseñadores y fabricantes, el estudio Ecostar estima que la producción en serie de unas 3.000 unidades, requeridas en una instalación centralizada de producción eléctrica de 50 MW, podría reducir un 40 % los costes del sistema disco Stirling hasta unos 4.700 € / kWe. Se estima además, que la disponibilidad y los costes mejorarían significativamente durante la fase de comercialización.



*Figura 57. Distribución tipo costes de inversión para sistema disco Stirling.*

Hasta la fecha se han diseñado prototipos que funcionan con potencias entre 10 kW y 50 kW, que se encuentran instalados en centros de investigación españoles, alemanes, americanos, etc. Estos sistemas que funcionan perfectamente en estos emplazamientos, resultan en la actualidad más costosos que el resto de tecnologías para ser considerados a la hora de promover grandes plantas. Tienen a favor el hecho de ser sistemas modulares.

Como principal incertidumbre de esta tecnología para grandes plantas en la actualidad está la vida útil de los motores Stirling, que se ha de esperar en torno a las 30.000 horas a plena potencia, como resultado de la operación de una central durante 15 años, pero sometidos además a continuos arranques y paradas diarios.

#### 4.1 Situación nacional.

---

<sup>45</sup> Estos datos corresponden al prototipo EuroDish, unidad de 10 KW de potencia, con un coste total de 80.000€. Véase En lo referente a la evolución de los costes en sistemas disco Stirling tras la aparición del prototipo EuroDish, véase “EuroDish-the next milestone to decrease the costs of dish/Stirling systems towards competitiveness”, Peter Heller, Plataforma Solar de Almería.

Según el Plan de Energías Renovables el porcentaje de energía producida con tecnologías renovables debe alcanzar el 10% en 2010. La contribución de la energía solar térmica de alta temperatura será de 500 MW, para lo cual se prevé una inversión de 2.163 millones de euros en el periodo 2005-2010<sup>46</sup>. Así, las principales medidas para conseguir ese desarrollo se centran en el apoyo a nuevos proyectos y en la promoción de una industria de componentes para el sector. Mientras que los colectores cilíndrico parabólico ocupan los proyectos más relevantes, los sistemas disco Stirling tienen como principal objetivo introducirse en el mercado de la generación, para lo que proyectos como EuroDish buscan una relación precio/producción óptima.

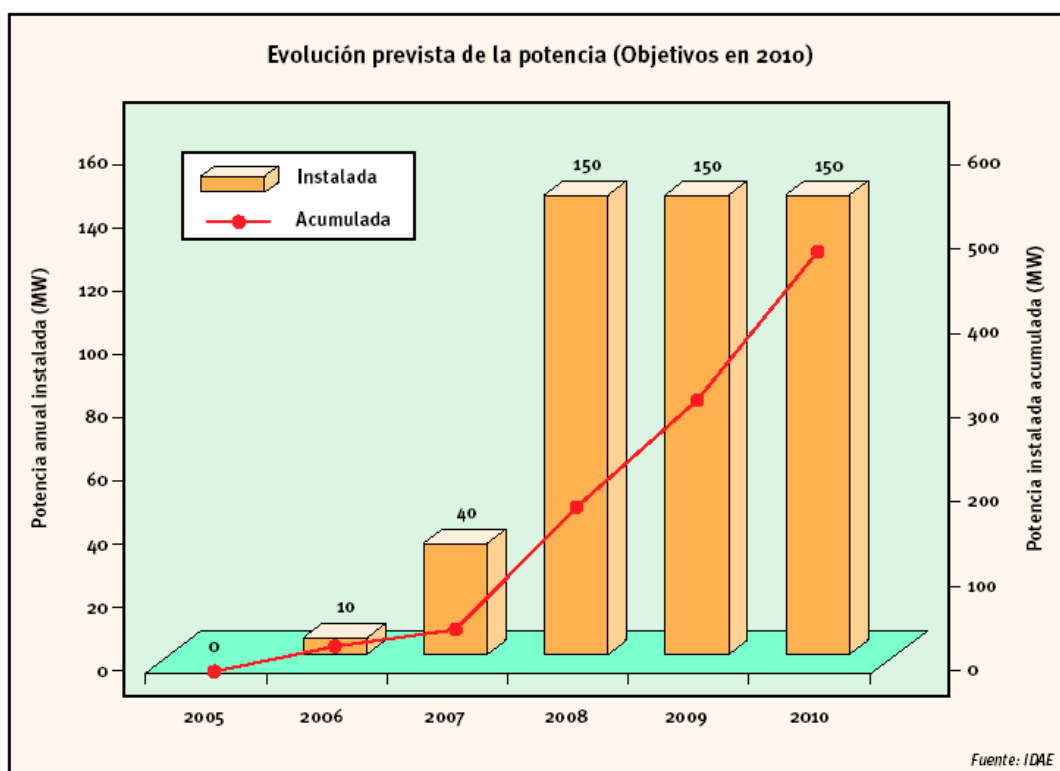


Figura 58. Evolución prevista en el PER para la energía solar termoeléctrica.

#### 4.2 Situación internacional.

Europa. En la actualidad un consorcio Europeo en el que participa España elabora mejoras que incidan en el abaratamiento de estos sistemas con proyectos de desarrollo del prototipo EuroDish. Este prototipo, que como se vio en capítulos anteriores, incorpora un motor Stirling de la compañía alemana SOLO que ha sido diseñado específicamente para este tipo de aplicaciones solares. La empresa encargada del desarrollo del disco parabólico es la alemana SBP. España colabora en el proyecto en los ámbitos de la fabricación, siendo responsable, y en el montaje del conjunto al que se le acopla el motor SOLO.

EEUU. El consorcio SES en el que participan el departamento norteamericano de energía, y Boeing, dispone de sus propios prototipos de 25 kW.

En 2006 se aprueba un proyecto solar termoeléctrico con discos parabólicos de 300 MW en California para 20 años. Recientemente se aprueba un segundo proyecto de 500 MW. Serán las primeras instalaciones comerciales del mundo.

<sup>46</sup> Véase “Energía Solar en España 2007”, estado actual y perspectiva, publicaciones IDAE.

#### 4.3 Principales líneas actuales de I+D.

Por ahora la compañía alemana SOLO ha comenzado la producción de pequeñas series de motores Stirling no solo para la producción de electricidad sino, también, para cogeneración.

El desarrollo de una industria de micro-turbinas en la última década ha abierto el camino a la opción de sustituir el motor Stirling por una turbina de gas (ciclo Bryton), utilizando parte de combustible fósil y parte solar. Estas pequeñas turbinas (30-100 kW) parten de una industria ya muy madura que ha demostrado una alta fiabilidad. Su eficiencia ha crecido tras los últimos desarrollos en recuperadores de alta temperatura, alternadores de alta velocidad, rotores cerámicos, etc. La eficiencia de conversión calor-electricidad de estas turbinas está por encima del 30%, aun menor que la de los motores Stirling.

Las líneas de investigación orientadas a la reducción de costes, están actualmente abordando la simplificación constructiva del concentrador, la mejora de eficiencia óptica del concentrador y del sistema de seguimiento solar (en dos ejes), el incremento del área del colector-concentrador (pasando de unos 100 m<sup>2</sup> a unos 400 m<sup>2</sup>) y la sustitución del motor Stirling por una micro turbina de gas con recuperador y solarizada.

La reducción del coste del kWh eléctrico estimada con el conjunto de innovaciones mencionadas podría conducir a unos 0'12 €/kWh para una planta de producción centralizada y a unos 0'25 €/kWh para discos aislados. Mayores reducciones de coste ocurrirán con el pleno desarrollo del mercado.

La naturaleza modular de los sistemas disco-generador ofrece la flexibilidad de adaptar la potencia eléctrica a la demanda, siendo esta una de las principales bazas que cuentan a favor de este tipo de sistemas solares.

#### **5.0 Comparación de la viabilidad de un sistema disco Stirling frente a una instalación fotovoltaica.**

En el presente apartado se realizará un estudio comparativo, desde el punto de vista económico, entre una instalación fotovoltaica conectada a la red y una unidad disco Stirling también conectada, ambas con una potencia instalada de 10 KWe.

Se selecciona como alternativa comparativa la energía fotovoltaica por dos motivos: el primero es que ha sido la forma de producción más favorecida en los últimos años por la política de subvenciones, y en segundo término porque parece que en el futuro será el competidor más duro de la tecnología disco Stirling, ya que parece que ambas competirán por ocupar el mercado de las pequeñas instalaciones.

En primer lugar se realizará un estudio de los costes de ambas opciones, para posteriormente realizar un estudio de sus posibles ingresos. Una vez realizados dichos estudios, mediante la ayuda de determinadas herramientas financieras, se comprobará la rentabilidad económica de cada una<sup>47</sup>.

##### 5.1 Costes de cada instalación.

- *Coste de la instalación fotovoltaica.*

El coste de adquisición de la instalación fotovoltaica es de aproximadamente 7.000 €/kW<sub>p</sub> para instalaciones de 10 kW conectadas a la red, por lo que el coste total de adquisición será de 70.000 €. El coste de operación y mantenimiento será de unos 2 cent.€/kWh. La vida útil de la instalación se estima en 25 años.

---

<sup>47</sup> Este ejercicio comparativo utiliza datos obtenidos en el curso sobre "Sistemas Solares de Concentración", unidad "discos parabólicos" de Félix Téllez Sufategui, CIEMAT-PSA, ya que presenta los análisis de costes más recientes en lo referente a módulos de 10 kW (prototipo Eurodish).

- *Coste de la instalación disco Stirling.*

El coste de adquisición del módulo disco Stirling se estima en 6.400 €/kW<sub>p</sub>. Al ser un sistema de 10 kW, el coste de adquisición ascenderá a 64.000 €. Los costes de operación y mantenimiento serán de 5 cent.€/kWh. La vida útil de la instalación se estima en 25 años.

- *Coste de la instalación disco Stirling fabricada en masa.*

Este caso es hipotético y refleja un coste de adquisición de 4.700 €/kW<sub>p</sub> (47.000 € en total) y un coste de operación y mantenimiento de 3 cent.€/kWh.

## 5.2 Ingresos de cada instalación.

Suponiendo que cada instalación opera con tarifa regulada los ingresos obtenidos por cada sistema, según el Real Decreto 661/2007, son los siguientes:

- Solar termoeléctrica: tarifa regulada de 26'9375 cent.€/kWh los 25 primeros años, y a partir de entonces 21'5498 cent.€/kWh.
- Solar fotovoltaica: tarifa regulada de 44'0381 cent.€/kWh los 25 primeros años, y a partir de entonces 35'2305 cent.€/kWh.

Además, existen subvenciones estatales para la adquisición. Las subvenciones ofrecidas por el IDAE<sup>48</sup>, que en Madrid son incompatibles con las ofrecidas por la Comunidad Autónoma, son:

- Solar termoeléctrica: 170 €/m<sup>2</sup>.
- Solar fotovoltaica: 1'4 €/W<sub>p</sub>.

Para el cálculo de los ingresos anuales se toma como referencia un número de horas equivalentes<sup>49</sup> de 1.500 horas para ambas instalaciones. Debido a la presencia de un sistema de seguimiento en las instalaciones disco Stirling, se toma un coeficiente de 1'3 que represente el seguimiento del sol por el sistema de modo que sus horas equivalentes a plena potencia se vean incrementadas. Además, como ya se ha comentado el sistema disco Stirling en la actualidad presenta graves problemas de fiabilidad, por lo que se define un coeficiente que represente la disponibilidad del sistema de 0'83. Para la instalación fotovoltaica la disponibilidad se supone del 98%. Se supone además que el rendimiento del colector fotovoltaico es del 10% y que la del sistema disco Stirling es del 18% (este valor es realista para las primeras unidades comerciales aunque se encuentre muy alejado del máximo demostrado del 29%).

## 5.3 Generación anual de cada sistema.

- *Sistema disco Stirling.*

Las horas equivalentes para un sistema solar serán de 1.500 h/año. El factor de corrección será de 1'3, mientras que la disponibilidad (tiempo que funciona al año debido a revisiones o a mantenimiento no programado) será del 83%, por lo que las horas equivalentes totales serán:

$$\text{Horas equivalentes} = 1.500 \text{ h/año} * 0'83 * 1'3 = 1.620 \text{ h/año.}$$

El sistema es de 10 kW de potencia nominal, por lo que los kWh anuales que puede producir son:

---

<sup>48</sup> Solo se tienen en cuenta las subvenciones a fondo perdido que representan el 30% de la subvención en solar termoeléctrica y el 20% en fotovoltaica. El porcentaje restante son préstamos a bajo interés, que debido al bajo precio del dinero en la actualidad, pueden ser despreciados.

<sup>49</sup> Se define el número de horas equivalentes como el número de horas que la planta habría de operar a plena potencia para producir la misma energía en un año.

*Producción anual = 1.620 h/año \* 10 kW = 16.200 kWh/año.*  
*Producción total durante vida útil = 16.200 kWh/año \* 20 años = 324.000 kWh.*

- *Sistema disco Stirling fase comercial.*

Las horas equivalentes para un sistema solar serán de 1.500 h/año. El factor de corrección será también de 1'3, mientras que ahora la disponibilidad será mayor que la de los prototipos actuales, llegando a valores en torno al 91%, por lo que las horas equivalentes totales serán:

$$\text{Horas equivalentes} = 1.500 \text{ h/año} * 0'91 * 1'3 = 1.774 \text{ h/año.}$$

El sistema es de 10 kW de potencia nominal, por lo que los kWh anuales que puede producir son:

*Producción anual = 1.774 h/año \* 10 kW = 17.740 kWh/año.*  
*Producción total durante vida útil = 17.740 kWh/año \* 20 años = 354.800 kWh.*

- *Sistema fotovoltaico.*

Las horas equivalentes para este sistema serán de 1.500 h/año. La disponibilidad en este caso será del 98%, por lo que las horas equivalentes totales serán:

$$\text{Horas equivalentes} = 1.500 \text{ h/año} * 98 = 1.470 \text{ h/año.}$$

El sistema es de 10 kW de potencia nominal, por lo que los kWh anuales que puede producir son:

*Producción anual = 1.470 h/año \* 10 kW = 14.700 kWh/año.*  
*Producción total durante vida útil = 14.700 kWh/año \* 20 años = 294.000 kWh.*

#### 5.4 Herramientas financieras

Las herramientas utilizadas para calcular la rentabilidad de las inversiones son el valor actual neto y el periodo de retorno que se explican a continuación.

- Valor actual neto.

Es el valor de todo el proyecto al comienzo del primer año. Para que la inversión sea rentable el VAN debe ser mayor que cero, yendo el sumatorio desde el año uno hasta el final de la vida del proyecto (20 años).

$$VAN = -(C_0 - VA_n(VR_n)) + \sum VA_m \{FC'_m\}$$

$FC_m$  se refiere al flujo de caja en el año m sin incluir la amortización,

$$FC'_m = IN_m - C_m$$

$VR_n$  se refiere al valor residual del equipo, que a falta de otra información se supone que disminuye en una fracción D de su valor inicial, al cabo de n años:

$$VR_n = C_0 (1-D)^n \text{ }^{50}$$

$VA_n \{VR_n\}$  se refiere al valor actual en el año n del coste representado por el valor residual, siendo en este caso n igual a veinte años.

$$VA_n \{VR_n\} = \{VR_n\} * (1+i)^{-n}$$

---

<sup>50</sup> D viene dado por la experiencia. Según los "Apuntes de la asignatura Ingeniería Energética" de Antonio Lecuona, D en el sector energético varía entre el 10% y el 20%. Se toma como valor de D el 10% ya que los materiales de los que se compone el sistema Stirling pueden reciclarse.

$C_0$  es el coste de adquisición total de la instalación (al coste de adquisición inicial se le deben restar las subvenciones públicas).

$C_m$  es el coste de operación y mantenimiento de la instalación en el año  $m$ .

$IN_m$  son los ingresos de la instalación en el año  $m$ .

- *Cálculo del valor residual del equipo.*

Para su cálculo primero se debe calcular el importe de la subvención recibida, y así determinar  $C_0$ .

1) Ingresos sistema disco Stirling y disco Stirling comercial<sup>51</sup>:

$$\text{Ingreso subvención} = 170 \text{ €/m}^2 * 53 \text{ m}^2 = 9.010 \text{ €}$$

2) Ingresos sistema fotovoltaico:

$$\text{Ingreso subvención} = 1'4 \text{ €/W}_p * 10 \text{ kW}_p = 14.000 \text{ €}$$

Así, los costes de adquisición totales quedan definidos como la diferencia entre  $C_0$  y la subvención:

$$\begin{aligned} C_{0 \text{ total}} \text{ sistema Stirling} &= 54.990 \text{ €} \\ C_{0 \text{ total}} \text{ sistema Stirling comercial} &= 37.990 \text{ €} \\ C_{0 \text{ total}} \text{ sistema fotovoltaico} &= 58.000 \text{ €} \end{aligned}$$

a) Sistema disco Stirling.

$$VR_{20} = 6.685 \text{ €}$$

b) Sistema disco Stirling comercial.

$$VR_{20} = 4.618 \text{ €}$$

c) Sistema fotovoltaico.

$$VR_{20} = 7.051 \text{ €}$$

- *Cálculo del valor actual del valor residual al cabo de 20 años.*

$VA_m$  se refiere al valor actual del coste en el año  $m$ , que se define como  $VA_m\{C_m\} = \{C_m\} * (1+i)^{-m}$ , donde  $m$  es el número de años en el que se estima la vida útil de la instalación.

a) Sistema disco Stirling.

$$VA_{20}\{VR_{20}\} = 3.048 \text{ €}$$

b) Sistema disco Stirling comercial.

$$VA_{20}\{VR_{20}\} = 2.105 \text{ €}$$

c) Sistema fotovoltaico.

$$VA_{20}\{VR_{20}\} = 3.215 \text{ €}$$

- *Coste de adquisición  $C_0$ .*

Sistema	Disco Stirling	Disco Stirling comercial	Fotovoltaico
Coste de adquisición (€)	54.990	37.990	58.000

-  $C_m$  es el coste de operación y mantenimiento de la instalación en el año  $m$ .

En un año, el coste de operación y mantenimiento será el de la producción de un kWh, multiplicado por la producción anual de kWh. Se supone un coste anual que se actualiza a lo

<sup>51</sup> Tamaño correspondiente a la parábola del prototipo EuroDish.

largo de la vida de la instalación multiplicando su valor del año 1, por el valor actual de un euro en cada año.

Sistema	Disco Stirling	Disco Stirling comercial	Fotovoltaico
Coste de o&m (€/kWh)	0'05	0'03	0'02
Producción anual año 1(kWh/año)	16.200	17.740	14.700
Coste de o&m año 1 (€/año)	810	532	294

- $IN_m$  son los ingresos de la instalación en el año m.

A continuación se calcula el ingreso del año 1. Posteriormente se supone una disminución de la producción, y por tanto de los ingresos del 0'5% para los sistemas disco Stirling y un 1% para los sistemas fotovoltaicos. Esta disminución se debe al envejecimiento del sistema y a la consecuente disminución del rendimiento.

Ingresos anuales = producción anual \* precio tarifa regulada

$$\text{Ingresos anuales disco Stirling} = 16.200 * 0.269 = 4.357 \text{ €}$$

$$\text{Ingresos anuales disco Stirling comercial} = 17.740 * 0.269 = 4.772 \text{ €}$$

$$\text{Ingresos anuales fotovoltaico} = 14.700 * 0.440 = 6.468 \text{ €}$$

- *Cálculo del VA.*

El valor actual de un euro durante 20 años es:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0'9524	0'9070	0'8638	0'8227	0'7835	0'7462	0'7107	0'6768	0'6446	0'6139

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0'5847	0'5568	0'5303	0'5051	0'4810	0'4582	0'4362	0'4155	0'3957	0'3769

- *Cálculo del VAN.*

El valor actual neto de cada sistema se presenta en las siguientes tablas, calculado mediante la expresión:

$$VAN = -(C_0 - VA_n(VR_n)) + \sum VA_m \{FC'_m\}$$

Sistema Fotovoltaico (Valores en euros)											
Año	VA	Ingresos	o&m	FC'm	VA*FC'm	∑ VA(FC'm)	C0 fotovoltaico	VRn	VA(VRn)	Co-Van(VRn)	VAN
1	0,962	6468,000	282,692	6196,180	5957,866	3608,109	58000	7051	3215,256	54784,744	-51176,635
2	0,925	6435,660	271,820	6174,295	5708,483	9782,404	58000	7051	3215,256	54784,744	-45002,340
3	0,889	6371,303	261,365	6119,991	5440,650	15902,395	58000	7051	3215,256	54784,744	-38882,349
4	0,855	6307,590	251,312	6065,944	5185,194	21968,339	58000	7051	3215,256	54784,744	-32816,405
5	0,822	6244,514	241,647	6012,162	4941,559	27980,501	58000	7051	3215,256	54784,744	-26804,243
6	0,790	6182,069	232,352	5958,653	4709,210	33939,154	58000	7051	3215,256	54784,744	-20845,590
7	0,760	6120,249	223,416	5905,426	4487,638	39844,580	58000	7051	3215,256	54784,744	-14940,164
8	0,731	6059,046	214,823	5852,486	4276,354	45697,066	58000	7051	3215,256	54784,744	-9087,678
9	0,703	5998,456	206,561	5799,840	4074,891	51496,905	58000	7051	3215,256	54784,744	-3287,839
10	0,676	5938,471	198,616	5747,494	3882,801	57244,400	58000	7051	3215,256	54784,744	2459,656
11	0,650	5879,086	190,977	5695,455	3699,659	62939,855	58000	7051	3215,256	54784,744	8155,111
12	0,625	5820,296	183,632	5643,727	3525,055	68583,581	58000	7051	3215,256	54784,744	13798,837
13	0,601	5762,093	176,569	5592,315	3358,599	74175,896	58000	7051	3215,256	54784,744	19391,152
14	0,577	5704,472	169,778	5541,224	3199,919	79717,120	58000	7051	3215,256	54784,744	24932,376
15	0,555	5647,427	163,248	5490,458	3048,656	85207,578	58000	7051	3215,256	54784,744	30422,834
16	0,534	5590,953	156,969	5440,021	2904,472	90647,599	58000	7051	3215,256	54784,744	35862,855
17	0,513	5535,043	150,932	5389,916	2767,039	96037,516	58000	7051	3215,256	54784,744	41252,772
18	0,494	5479,693	145,127	5340,148	2636,047	101377,663	58000	7051	3215,256	54784,744	46592,919
19	0,475	5424,896	139,545	5290,718	2511,199	106668,381	58000	7051	3215,256	54784,744	51883,637
20	0,456	5370,647	134,178	5370,647	2451,093	112039,028	58000	7051	3215,256	54784,744	57254,284

Tabla 22. Cálculo del VAN en el sistema Fotovoltaico.



Sistema Disco Stirling (Valores en euros)											
Año	VA	Ingresos	o&m	FC'm	VA*FC'm	∑ VA(FC'm)	C0 fotovoltaico	VRn	VA(VRn)	Co-Van(VRn)	VAN
1	0,962	4357,000	778,846	3608,109	3469,336	3608,109	58000	7051	3215,256	54784,744	-51176,635
2	0,925	4335,215	748,891	3615,128	3342,389	7223,237	58000	7051	3215,256	54784,744	-47561,507
3	0,889	4291,863	720,087	3599,471	3199,917	10822,708	58000	7051	3215,256	54784,744	-43962,036
4	0,855	4248,944	692,391	3583,183	3062,920	14405,892	58000	7051	3215,256	54784,744	-40378,852
5	0,822	4206,455	665,761	3566,300	2931,239	17972,192	58000	7051	3215,256	54784,744	-36812,552
6	0,790	4164,390	640,155	3548,857	2804,713	21521,048	58000	7051	3215,256	54784,744	-33263,696
7	0,760	4122,746	615,533	3530,887	2683,184	25051,936	58000	7051	3215,256	54784,744	-29732,808
8	0,731	4081,519	591,859	3512,424	2566,494	28564,359	58000	7051	3215,256	54784,744	-26220,385
9	0,703	4040,704	569,095	3493,497	2454,484	32057,856	58000	7051	3215,256	54784,744	-22726,888
10	0,676	4000,297	547,207	3474,136	2347,002	35531,992	58000	7051	3215,256	54784,744	-19252,752
11	0,650	3960,294	526,161	3454,370	2243,893	38986,362	58000	7051	3215,256	54784,744	-15798,382
12	0,625	3920,691	505,924	3434,226	2145,007	42420,588	58000	7051	3215,256	54784,744	-12364,156
13	0,601	3881,484	486,465	3413,729	2050,197	45834,317	58000	7051	3215,256	54784,744	-8950,427
14	0,577	3842,669	467,755	3392,905	1959,318	49227,222	58000	7051	3215,256	54784,744	-5557,522
15	0,555	3804,242	449,764	3371,777	1872,228	52598,998	58000	7051	3215,256	54784,744	-2185,746
16	0,534	3766,200	432,466	3350,368	1788,789	55949,366	58000	7051	3215,256	54784,744	1164,622
17	0,513	3728,538	415,832	3328,699	1708,865	59278,065	58000	7051	3215,256	54784,744	4493,321
18	0,494	3691,253	399,839	3306,792	1632,326	62584,857	58000	7051	3215,256	54784,744	7800,113
19	0,475	3654,340	384,460	3284,667	1559,042	65869,524	58000	7051	3215,256	54784,744	11084,780
20	0,456	3617,797	369,673	3617,797	1651,115	69487,320	58000	7051	3215,256	54784,744	14702,576

Tabla 23. Cálculo del VAN del sistema disco Stirling.

Sistema Disco Stirling comercial (Valores en euros)											
Año	VA	Ingresos	o&m	FC'm	VA*FC'm	∑ VA(FC'm)	C0 fotovoltaico	VRn	VAN(VRn)	Co-Van(VRn)	VAN
1	0,962	4772,000	511,538	4280,136	4115,515	3608,109	58000	7051	3215,256	54784,744	-51176,635
2	0,925	4748,140	491,864	4275,194	3952,657	7883,303	58000	7051	3215,256	54784,744	-46901,441
3	0,889	4700,659	472,946	4245,903	3774,592	12129,206	58000	7051	3215,256	54784,744	-42655,538
4	0,855	4653,652	454,756	4216,387	3604,185	16345,593	58000	7051	3215,256	54784,744	-38439,151
5	0,822	4607,115	437,265	4186,668	3441,136	20532,261	58000	7051	3215,256	54784,744	-34252,483
6	0,790	4561,044	420,447	4156,768	3285,154	24689,029	58000	7051	3215,256	54784,744	-30095,715
7	0,760	4515,434	404,276	4126,707	3135,958	28815,735	58000	7051	3215,256	54784,744	-25969,009
8	0,731	4470,280	388,727	4096,503	2993,275	32912,239	58000	7051	3215,256	54784,744	-21872,505
9	0,703	4425,577	373,776	4066,177	2856,842	36978,415	58000	7051	3215,256	54784,744	-17806,329
10	0,676	4381,321	359,400	4035,744	2726,404	41014,159	58000	7051	3215,256	54784,744	-13770,585
11	0,650	4337,508	345,577	4005,222	2601,716	45019,382	58000	7051	3215,256	54784,744	-9765,362
12	0,625	4294,133	332,286	3974,627	2482,540	48994,009	58000	7051	3215,256	54784,744	-5790,735
13	0,601	4251,191	319,505	3943,975	2368,649	52937,983	58000	7051	3215,256	54784,744	-1846,761
14	0,577	4208,679	307,217	3913,279	2259,821	56851,262	58000	7051	3215,256	54784,744	2066,518
15	0,555	4166,593	295,401	3882,554	2155,844	60733,816	58000	7051	3215,256	54784,744	5949,072
16	0,534	4124,927	284,039	3851,812	2056,514	64585,628	58000	7051	3215,256	54784,744	9800,884
17	0,513	4083,677	273,115	3821,067	1961,634	68406,695	58000	7051	3215,256	54784,744	13621,951
18	0,494	4042,841	262,610	3790,331	1871,014	72197,026	58000	7051	3215,256	54784,744	17412,282
19	0,475	4002,412	252,510	3759,614	1784,473	75956,641	58000	7051	3215,256	54784,744	21171,897
20	0,456	3962,388	242,798	3962,388	1808,382	79919,029	58000	7051	3215,256	54784,744	25134,285

Tabla 24. Cálculo del VAN sistema disco Stirling comercial.

- Periodo de retorno.

El VAN se puede calcular año a año. Partiendo de un primer año muy negativo, su valor se va incrementando gracias a la acumulación de ingresos hasta que al final se tiene un valor que debería ser positivo.

El periodo de retorno es un parámetro que se define como el tiempo necesario para recuperar el coste de un proyecto. Esta situación supone que el valor acumulado del flujo de caja es igual al coste neto de adquisición, por lo que para calcular el periodo de retorno se impone la condición de un VAN igual a cero.

$$0 = -(C_0 - VA_n(VR_n)) + \sum VA_m \{FC'_m\}$$

$$C_0 - VA_n(VR_n) = \sum VA_m \{FC'_m\}$$

La ecuación anterior no da un valor entero para el periodo de recuperación, por lo que el número de años obtenidos se redondea hacia el año superior inmediato. Los valores obtenidos del periodo de recuperación para los sistemas estudiados se presentan en la Tabla 25.

Sistema	Fotovoltaico	Disco Stirling	Disco Stirling comercial
Periodo de recuperación (años)	10	16	14

*Tabla 25. Periodo de recuperación de los distintos sistemas.*

### 5.5 Resultados obtenidos.

En el presente apartado se realiza un análisis de los datos obtenidos en el apartado anterior. Partiendo de las tablas 22, 23 y 24, observamos que el VAN acumulado para el sistema fotovoltaico es mucho mayor que el acumulado para el sistema disco Stirling actual (prototipo), siendo casi cuatro veces superior. Esto se debe fundamentalmente a la tarifa regulada, que según el RD 661/2007, beneficia de manera especial a la tecnología fotovoltaica, siendo un 60% superior a la tarifa regulada de la tecnología termoeléctrica. Sin embargo, esta diferencia no es tan amplia respecto del VAN acumulado para las expectativas de costes de la tecnología disco Stirling en fase comercial. En esta situación, a pesar de que la diferencia en la tarifa regulada seguirá igual, la mayor fiabilidad del sistema disco Stirling comercial, y la reducción de sus costes tras un proceso de fabricación en serie, harán que la diferencia de rentabilidad sea mucho menor.

Algo similar ocurre con el periodo de recuperación, que hace que los beneficios se consigan a partir del décimo año en los sistemas fotovoltaicos, frente al decimosexto año en los sistemas disco Stirling y al decimocuarto del sistema disco Stirling comercial.

Las conclusiones de la comparativa económica entre el sistema disco Stirling y el sistema fotovoltaico son las siguientes:

- En la actualidad el sistema fotovoltaico es mucho más rentable que el sistema disco Stirling.
- Esta diferencia se reduciría de manera muy importante, casi un 50%, con la primera producción en serie de unidades disco Stirling.
- La mayor rentabilidad del sistema fotovoltaico se sostiene gracias a una política de ayudas que favorece a estas instalaciones claramente.
- La tendencia en el futuro puede cambiar, ya que desde las administraciones se está comenzando a subvencionar a las instalaciones con mayor eficiencia energética. Esto beneficiará de manera clara a los sistemas disco Stirling, ya que como se verá en el siguiente capítulo son mucho más eficientes que los sistemas fotovoltaicos.

## CAPÍTULO VII:

### IMPACTO AMBIENTAL DEL SISTEMA DISCO STIRLING,

## **1.0 Eficiencia del sistema. Comparativa con otros sistemas<sup>52</sup>.**

Debido a las actuales necesidades energéticas, los gobiernos europeos están optando por favorecer a los sistemas de generación eléctrica que reduzcan la dependencia de los combustibles fósiles, y dentro de ellos, a los que se muestren más eficientes, como los son los sistemas disco Stirling. En la Figura 59 se muestran los distintos sistemas de generación eléctrica en función de su rendimiento y del coste de la energía por ellos producida.

Como se puede observar los sistemas disco Stirling poseen el rendimiento más elevado entre las tecnologías solares, y un coste de la energía cada vez más cercano del límite de la rentabilidad<sup>53</sup>. En el lado opuesto se sitúa la energía fotovoltaica, que con un coste de la energía ligeramente inferior, presenta un rendimiento muy bajo. Entre ambos sistemas encontramos a los sistemas de concentradores cilíndrico parabólicos, y en menor medida a los campos de helióstatos, que presentan unos costes de la energía más baratos que los que presentan los sistemas disco Stirling, pero con unos rendimientos un poco inferiores.

Realizando una visión de conjunto de los sistemas renovables, observamos que los sistemas eólicos presentan el mayor rendimiento y los costes más bajos de la energía. Esto se debe a que la tecnología eólica utiliza energía mecánica como fuente de energía primaria, no teniendo que efectuar una transformación térmica, y por tanto no teniendo que incluir el rendimiento térmico correspondiente. Además, esta tecnología se encuentra plenamente desarrollada, en contraste de lo que ocurre con la energía solar termoelectrónica, siendo por tanto una tecnología altamente competitiva. También se observa que la tecnología basada en la quema de biomasa presenta elevados rendimientos<sup>54</sup>, debido a que utiliza tecnologías ya desarrolladas para su uso con otros combustibles, como son las turbinas de vapor.

Analizando las tecnologías basadas en combustibles fósiles observamos que la cogeneración presenta un alto rendimiento. Este fenómeno se debe al aprovechamiento que realizan este tipo de instalaciones del calor residual del motor térmico, mediante el cual se calienta un fluido de trabajo destinado a aplicaciones industriales o aplicaciones de uso doméstico, como agua caliente sanitaria o calefacción.

Si analizamos las tecnologías basadas en combustibles fósiles sin aprovechamiento del calor residual observamos que las centrales de ciclo combinado presentan los mejores resultados, seguidas de los motores diesel, de las centrales de carbón y por último de las turbinas de gas. La tendencia que muestran estos sistemas en la Figura 59 es la de un encarecimiento de los costes de la energía por ellos producida, a medida que disminuye el rendimiento de la instalación.

La energía nuclear se sitúa en un punto intermedio de rendimiento entre sistemas renovables y no renovables, con unos bajos costes de la energía que producen, en los cuales no figuran los costes de desmantelamiento de las instalaciones.

Volviendo a los sistemas disco Stirling observamos que sus prestaciones superan a las de las instalaciones fotovoltaicas, instalaciones que como se indicó en capítulos anteriores, serán sus competidores más inmediatos a la hora de luchar por una cuota de mercado en la generación de sistemas aislados. Sin embargo, los sistemas disco Stirling deben mejorar sus costes, reduciéndolos de manera que su competitividad aumente de forma muy significativa.

---

<sup>52</sup> Datos obtenidos de los apuntes de las asignaturas "Ingeniería Energética" de Antonio Lecuona, y de "Instalaciones Fluidotérmicas", de Pedro Rodríguez Aumente, y de las páginas Web del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y del CIEMAT, [www.mintyc.es](http://www.mintyc.es) y [www.ciemat.es](http://www.ciemat.es).

<sup>53</sup> En capítulos anteriores se cifró este límite en torno a los 5-8 cent.euro / kWh.

<sup>54</sup> No obstante considerablemente inferiores a los de las plantas que queman carbón. Este combustible puede revalorizarse mediante la co-combustión (i.e. combustión simultánea de la biomasa con carbón, para mejorar su rendimiento).

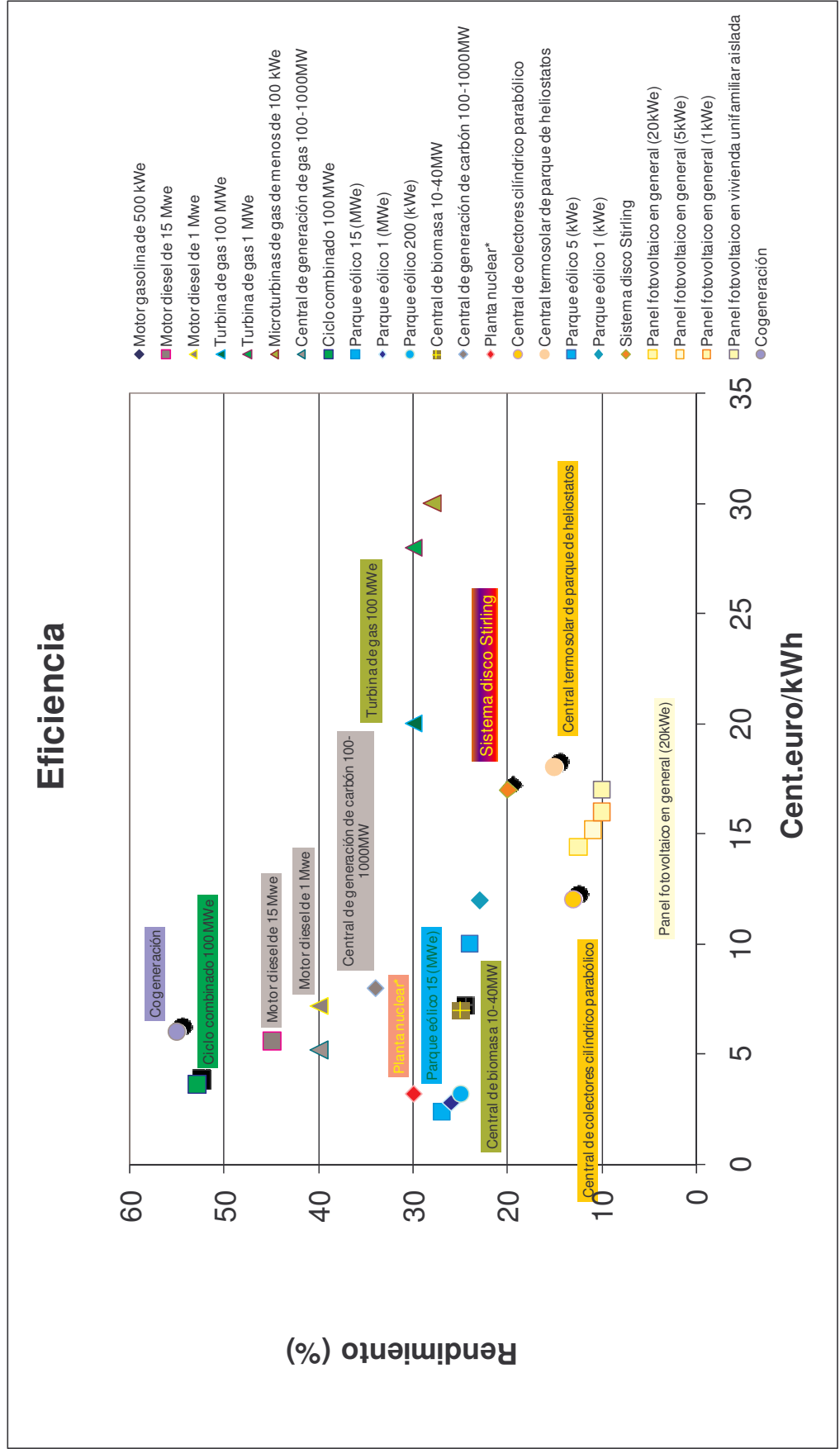


Figura 59. Situación de los distintos sistemas de producción eléctrica en función de su eficiencia y de su coste.

## 2.0 Toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>.

Una de las mayores preocupaciones existentes desde el punto de vista medioambiental es la emisión de gases contaminantes a la atmósfera debido a la combustión de los combustibles fósiles. El CO<sub>2</sub> liberado durante los procesos de combustión tiende a acumularse en la atmósfera incrementando el efecto invernadero. Tal es la preocupación existente a este respecto, que a nivel internacional ha llegado a firmarse un acuerdo que favorezca la reducción de estas emisiones, el Protocolo de Kioto, donde se recoge la creación de un mercado de emisiones en el cual las instalaciones que no emiten gases pueden incrementar sus ingresos vendiendo sus derechos de emisión a plantas que sean más contaminantes.

### 2.1 Emisiones de los combustibles fósiles.

A continuación se presenta en la Tabla 26 los kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalentes generados por cada tipo de combustible fósil<sup>55</sup>.

Combustible	Emisiones de CO <sub>2</sub> (kg/kWe-h)
Lignito	1'1
Carbón	0'95
Gas	0'6
Fuel oil	0'75
Media nacional	0'42

Tabla 26. Emisiones de CO<sub>2</sub> de los distintos combustibles.

Como se puede observar la fuente más contaminante a la hora de generar electricidad, mediante la utilización de combustibles fósiles, es el carbón, mientras que la fuente más limpia es el gas natural. Esa combustión más "limpia", junto con el elevado rendimiento de las centrales de ciclo combinado, ha llevado al gas natural a ocupar en pocos años un papel protagonista en la producción de energía eléctrica en España. En la Figura 60 se muestra el origen actual de la energía eléctrica en el mercado nacional, y el origen de la misma en el año 2000, aunque únicamente a nivel peninsular.

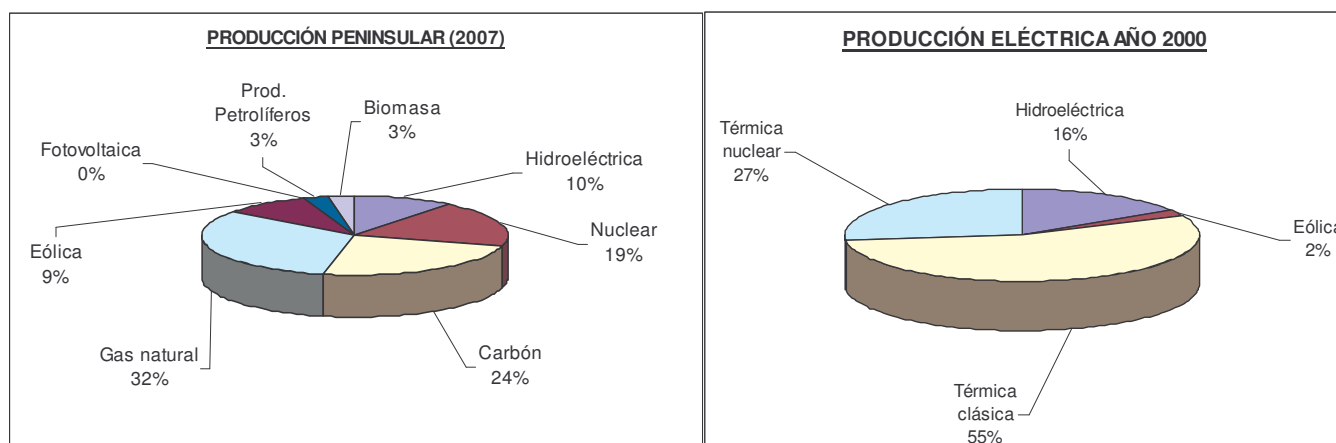


Figura 60. Distribución de la producción peninsular años 2000 Y 2007.

Destaca el porcentaje de energía producida con tecnologías solares, solo un 0'15% del total mediante la utilización de placas fotovoltaicas, lo que conlleva la no utilización de las inmensas cantidades de energía solar gratuita recibidas en el territorio peninsular.

### 2.2 Emisiones de CO<sub>2</sub> del mercado español.

<sup>55</sup> Datos obtenidos de la página Web [www.foronuclear.es](http://www.foronuclear.es), documento "Energía nuclear y cambio climático". Acerca de las emisiones y del consumo realizado a nivel nacional se puede consultar el documento "Energía 2008", disponible en la misma Web.

La ratificación del Protocolo de Kyoto por parte de la Unión Europea obliga a los estados miembros a reducir un 8% sus emisiones entre 2008 y 2012 respecto a 1990. El reparto entre los países comunitarios se hace de forma que unos deben reducir sus emisiones, mientras que otros disponen de un margen limitado para incrementarlas. España es uno de los países que podía incrementar sus emisiones con respecto a las de 1990<sup>56</sup> en un 15% para el periodo 2008-2012 y, sin embargo, triplica el máximo permitido por la UE. En 2006 España superaba ya el exceso de emisiones en un 53%, convirtiéndose en el país industrializado que más se alejaba de los objetivos del compromiso de Kyoto. Esto se debe fundamentalmente a la alta dependencia de nuestro sistema energético de los combustibles fósiles. Este factor, unido al crecimiento económico de los últimos años ha hecho aumentar de manera notable las emisiones realizadas por nuestro sector energético<sup>57</sup>, Figura 61.

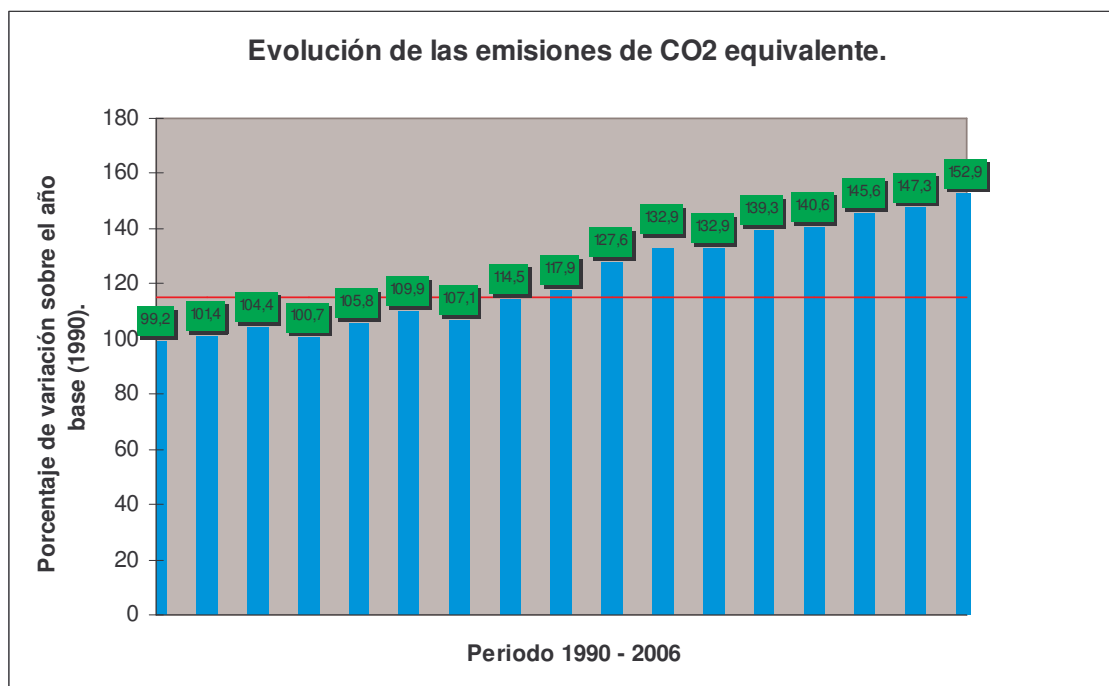


Figura 61. Evolución de las emisiones de CO2 a nivel nacional.

España se verá obligada a acudir a los mecanismos de flexibilidad comprando en el mercado de comercio de emisiones el equivalente al exceso de éstas en nuestro país. El gasto fluctuará según la evolución del mercado, pero con los datos actuales, se calcula que el coste derivado de los derechos necesarios rondará entre los 6.000 y los 15.000 millones de euros.

En lo referente a las emisiones totales anuales de CO<sub>2</sub> equivalente, destaca el valor de la energía eléctrica producida a nivel nacional en 2007, que según datos de Red Eléctrica Española, se situó en torno a los 312.664 GWh<sup>58</sup>. Además, estimaciones realizadas por foro nuclear establecen que las emisiones medias de CO<sub>2</sub> por kWh producido en el mercado español se sitúan en torno a 0'42 Kg/kWh<sup>59</sup>, por lo que las emisiones de CO<sub>2</sub> totales debidas a generación eléctrica ascendieron a:

$$\begin{aligned} \text{Emisiones CO}_2 &= \text{kWh producidos} * \text{kg CO}_2 / \text{kWh} = 312.664.000.000 * 0'42 = \\ &= 131.331.000.000 \text{ kg} \end{aligned}$$

<sup>56</sup> Año tomado como valor de referencia en el Protocolo de Kyoto.

<sup>57</sup> Datos obtenidos de la página Web [www.foronuclear.es](http://www.foronuclear.es).

<sup>58</sup> Véanse las páginas Web [www.ree.es](http://www.ree.es) y [www.foronuclear.es](http://www.foronuclear.es).

<sup>59</sup> Dato obtenido de EUROSTAT.



131'3 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas al año suponen un incumplimiento claro de los compromisos contraídos por España en el Protocolo de Kioto, lo que conlleva un daño excesivo al medio ambiente y sanciones económicas. Debido a ello se hace imprescindible conseguir reducir las emisiones anuales de CO<sub>2</sub>, sustituyendo parte de los sistemas de generación convencionales por los nuevos sistemas basados en tecnologías renovables.

Los sistemas disco Stirling generan electricidad a lo largo del día sin generar ningún tipo de contaminante gracias a la eficiente conversión que realizan de la energía solar que reciben. La cantidad de energía que genera de manera anual un módulo de 10 kW, según los datos calculados en el Capítulo VI, asciende a 16.200 kWh, lo que supone dejar de emitir 6.804 kg de CO<sub>2</sub> por cada módulo instalado.

*Emisiones no realizadas de CO<sub>2</sub> = kWh producidos \* kg CO<sub>2</sub> / kWh = 16.200 \* 0'42 = 6.804 kg*

### **3.0 Impacto de la instalación de un módulo disco Stirling.**

La instalación de una unidad de disco parabólico no está sometida<sup>60</sup> a evaluación de impacto ambiental. No se considerará necesario someter el proyecto de instalación de un sistema disco Stirling al procedimiento reglado de evaluación ambiental, dado que las características y ubicación de la infraestructura a instalar no hacen previsible que se produzcan impactos significativos<sup>61</sup>. Tampoco será necesario establecer un Plan de Vigilancia Ambiental, debido a las razones anteriormente expuestas.

Sin embargo, las actuaciones de este tamaño deben atender a algunas recomendaciones realizadas por las administraciones públicas. Para ello se especifican algunas circunstancias:

Si en la zona existe alguna especie animal que pueda ver perjudicada su época reproductora, las obras deben realizarse fuera de dicho periodo.

Si en la zona existe vegetación, o zonas de paso de agua, se debe tener cuidado de no producir vertidos en el caso de utilizar algún tipo de material químico, ya sean los fluidos térmicos de la instalación, ya sean los lubricantes utilizados en los componentes mecánicos.

Si es necesario desplazar parte del terreno para la cimentar la futura ubicación del sistema disco Stirling, se debe realizar una correcta gestión de dicho material.

En caso de que fuese necesario un depósito de acumulación de biomasa para su utilización en el quemador, tanto su ubicación como su gestión se debe realizar de manera reglamentaria.

#### **3.1 Comparativa acerca del impacto de una unidad Stirling y de un módulo fotovoltaico.**

En el presente apartado se analizan las diferencias existentes desde el punto de vista medioambiental entre la tecnología disco Stirling y la tecnología fotovoltaica.

En primer lugar, la mayor diferencia existente entre ambos sistemas es el material utilizado en su construcción. Las placas fotovoltaicas se componen en un gran porcentaje de placas de silicio, cuyo proceso productivo consume una gran cantidad de energía eléctrica (además de abundante agua de elevada calidad) lo que supone unas emisiones relativamente grandes de CO<sub>2</sub> por módulo producido. A esto debemos añadir que el silicio es muy contaminante una vez que comienza a descomponerse tras el abandono de la instalación, aunque durante la etapa de funcionamiento la instalación no resulta contaminante. Sin embargo, los sistemas disco Stirling se componen de vidrio, de metal ligero y de fibra de vidrio. Estos materiales tienen un proceso productivo más sencillo que el de las placas de silicio, con un consumo energético inferior.

---

<sup>60</sup> Al igual que ocurre con una instalación fotovoltaica de pequeña potencia.

<sup>61</sup> Se supone que tanto el tamaño de la instalación, como la potencia que suministra, son relativamente pequeñas. Si se utiliza un quemador de gas debe existir un gaseoducto cercano previamente construido ya que si no, para una instalación tan pequeña, los costes de transportar el gas hasta la instalación la harían inviable.

Además, estos materiales son fácilmente reciclables, lo que permite su reutilización en futuras instalaciones en un porcentaje muy elevado.

Un problema grave del silicio es que en la actualidad se consume de manera extraordinaria en aplicaciones electrónicas, lo que hace que su producción se encuentre en la actualidad muy próxima a su consumo a nivel mundial, encareciéndose el producto.

Desde el punto de vista del impacto visual, el disco parabólico Stirling presenta un impacto mucho mayor, ya que mientras que las placas fotovoltaicas se pueden situar en el tejado de una casa de manera dispersa, el sistema disco Stirling debe permanecer unido ocupando una superficie considerable en un lugar despejado para poder funcionar. A este respecto debemos indicar que el peso de los módulos puede variar en función del tipo que se utiliza, pero en general se deben considerar unos 15 kg/m<sup>2</sup>; la estructura de soporte de los módulos podría pesar otros 10 kg/m<sup>2</sup>. Los efectos del viento podrían suponer carga adicional. Al instalarse en tejados y terrazas es recomendable consultar la normativa vigente, aunque raramente hay que reforzar las estructuras.

Tanto el sistema disco Stirling como el sistema fotovoltaico necesitan apoyo en las horas en las que no hay sol. Mientras que en el sistema disco Stirling el aporte auxiliar se puede realizar con un quemador de biomasa, con lo que las emisiones totales de la instalación serían muy bajas, la instalación fotovoltaica carece de operación híbrida, por lo que necesitaría un motor-generador o una turbina de vapor auxiliar, con lo que se encarecería el precio de la instalación.

Por último se destaca la importancia de conseguir un sistema de fabricación sostenible de sistemas disco Stirling, para lo que se deberán seguir los pasos que se definen en la normativa ISO 14001, según la cual el proceso de diseño debe contemplar todos los aspectos de la vida del producto, incluido su proceso de reciclaje tras el fin de su vida útil.

#### **4.0 Evaluación de Impacto Ambiental de una central solar térmica de 3'2 MW.<sup>62</sup>**

La Evaluación de Impacto Ambiental se define como el conjunto de estudios y análisis técnicos que permiten estimar los efectos que la ejecución de un determinado proyecto puede causar sobre el medio ambiente. La Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos constituye el instrumento más adecuado para la preservación de los recursos naturales y la defensa del medio ambiente.

A continuación se presentan las principales partes que definen la Evaluación de Impacto Ambiental de un proyecto de estas características. Previamente, se debe aclarar que a la hora de realizar un estudio de este tipo, la legislación a tener en cuenta proviene de distintos ámbitos, ya sea legislación comunitaria, de ámbito nacional o de ámbito comarcal. También es importante aclarar que este tipo de estudios poseen como principal problema un alto grado de subjetividad, dependiendo mucho su resultado de las opiniones de su redactor.

##### Partes de la EIA.

- Introducción y justificación del estudio: se presenta la empresa que promueve el proyecto, se justifica su utilidad, las razones en las que se basa el estudio, la norma que lo sustenta y datos básicos del proyecto y de su realización.
- Descripción del proyecto y sus acciones: descripción y localización del proyecto, descripción del proceso productivo, tipos de vertidos que se realizarán y sus cantidades.
- Examen de alternativas: se comparará el proyecto con una central térmica de la misma potencia y se compararán sus resultados tecnológicos, económicos y medioambientales.
- Inventario ambiental: incluirá el estudio de todos los aspectos del lugar donde se ubicará el proyecto, encuadre geográfico, medio físico, medio biológico, paisaje, patrimonio histórico.

---

<sup>62</sup> Apuntes de la asignatura "Oficina Técnica. Capítulo IV. Estudios medioambientales", de Manuel de Dos Castillos.

- Identificación de impactos: Se realizará en una tabla de doble entrada. Acciones del proyecto que pueden provocar impacto frente a elementos del medio susceptibles de ser alterados.
- Valoración del impacto: se valorarán una serie de características del impacto y se establecerá una evaluación cuantitativa de cada uno de ellas.

Intensidad	Momento	Persistencia	Reversibilidad	Extensión
Baja = 1	Corto plazo = 1	Temporal = 1	corto plazo = 1	Puntual = 1
Media = 2	Medio plazo = 2		medio plazo = 2	Parcial = 2
Alta = 3	Largo plazo = 3	Permanente = 3	largo plazo = 3	Todo el ámbito = 3
			Irreversible = 4	

Tabla 27. Valoración del impacto ambiental.

La valoración final del impacto será:

$$\text{Valoración} = 3 \cdot \text{Intensidad} + \text{Momento} + \text{Persistencia} + \text{Reversibilidad} + \text{Extensión}.$$

A continuación se presenta como ejemplo el EIA de una central de generación con sistemas disco parabólico de 3'2 MW situada en la provincia de Almería.

#### 4.1 Evaluación de Impacto Ambiental de una central de 3'2 MW con sistemas disco Stirling.<sup>63</sup>

- *Introducción y justificación del proyecto.*

El proyecto consiste en la construcción de una central solar térmica de unidades disco Stirling de 3'2 MW de potencia eléctrica y una línea de evacuación para realizar la conexión a la red, conforme a lo establecido en el Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos.

- *Descripción del proyecto y sus acciones*<sup>64</sup>.

Características básicas la actuación proyectada. Son objeto de la presente declaración de impacto ambiental la construcción, establecimiento y/o funcionamiento de los siguientes sistemas, y sus elementos inherentes y accesorios, que se resumen a continuación:

- Campo solar con 90.000 m<sup>2</sup> de sistemas disco parabólicos con seguimiento solar tipo EuroDish con salida de potencia neta de cada unidad de 10 kW.
- Los equipos tiene capacidad híbrida. Disponen de un quemador de gas natural cuya capacidad de consumo anual se establece en 2681 m<sup>3</sup>/año, lo que supone unos 25.920 MWhtérmicos útiles/año, es decir, un 200 % de la energía recogida por el campo solar. De este modo, la instalación será capaz de cubrir la demanda de un día en las peores condiciones posibles, nublado y en invierno (mayor número de horas de oscuridad).
- Edificio de control, edificio de personal y mantenimiento y edificio de almacén.
- Sistema de abastecimiento de agua con una dotación anual de 200.000 m<sup>3</sup>/año.
- Sistema de depuración de aguas residuales que incluye separador de agua/aceite, filtro biológico o percolador y unidad de neutralización.
- Línea aérea de interconexión desde la planta hasta la futura subestación.

La planta de generación no vierte sustancias de ningún tipo durante su funcionamiento habitual. El fluido térmico del motor es hidrógeno, siempre utilizado en ciclo cerrado, en estado gaseoso y en pequeña cantidad, por lo que ante cualquier posible escape el riesgo es nulo al

<sup>63</sup> La Evaluación de Impacto Ambiental se rige por el RD 1/2008 publicado en el BOE num. 23, sábado 26 de enero de 2008. De gran interés es la Evaluación de Impacto Ambiental de la Central de la central solar térmica Andasol 2, publicada en el Boletín Oficial de la Provincia de Granada, número 203, jueves 21 de octubre de 2004.

<sup>64</sup> Un ejemplo de interés para una central fotovoltaica se encuentra en el Boletín Oficial de Extremadura, num 135, 18 de noviembre de 2006.

ascender el gas hacia la atmósfera debido a su baja densidad. La mayor fuente de posibles vertidos se sitúa en las tareas de mantenimiento de los equipos. Por ello se establece que todas las maniobras de mantenimiento de la maquinaria deben realizarse en instalaciones adecuadas para ello (cambios de aceite, etc.), evitando los posibles vertidos accidentales al medio. El ruido y las vibraciones provocadas por el sistema son nulos, por lo que no se deben tomar medidas a este respecto.

Las especies animales y vegetales situadas en la zona no están incluidas en grupos de riesgo. En la zona existen pequeños mamíferos y grupos de aves, por lo que las obras deberán realizarse respetando sus respectivos periodos reproductivos. En lo referente a la vegetación, sólo se desbrozarán las zonas afectadas por las cimentaciones y las calles, manteniendo la vegetación natural en el resto. Se crearán pantallas vegetales donde el terreno lo permita, para lo que se podrán utilizar especies existentes en los alrededores.

Los accesos a la instalación existen en la actualidad, por lo que se aprovecharán sin necesidad de realizar obras de ningún tipo. No se realizarán movimientos de tierras excepto los necesarios para la cimentación y además, todas las maniobras de mantenimiento de la maquinaria deben realizarse en instalaciones adecuadas para ello (cambios de aceite, etc.), evitando los posibles vertidos accidentales al medio. Se prohíbe el vertido de productos del movimiento de tierras y la localización de las instalaciones auxiliares, en áreas que puedan afectar al sistema fluvial. Así mismo, no se verterán a los cauces cercanos ningún tipo de materiales sólidos ni líquidos. En todas las edificaciones se emplearán materiales y colores que permitan su integración en el entorno y las grúas y elementos de elevación se posicionarán dentro del área de maniobra, en los lugares con menos vegetación y siempre evitando la tala de árboles.

Una vez terminada las obras se procederá a la limpieza general de las áreas afectada, retirando las instalaciones temporales, restos de máquinas y escombros, depositándolos en vertederos controlados e instalaciones adecuadas para su tratamiento. Para evitar elevados niveles de emisión de partículas en suspensión en la fase de obras, se procederá al riego sistemático de las superficies que puedan provocar este tipo de contaminación. Así, se controlará la emisión de gases y contaminantes de los vehículos y maquinaria con su continua puesta a punto, así como la generación de ruidos con la utilización de silenciadores.

Para finalizar se adoptarán todas las medidas necesarias para evitar la posible electrocución de las aves y para evitar accidentes de las mismas en el vallado de la instalación. Además, una vez finalizadas la actividad se procederá al desmantelamiento total de todos los elementos instalados y a la restauración del terreno afectado a la situación original.

- *Estudio de posibles alternativas.*

Desde un punto de vista económico se estudió como posible alternativa la utilización de una central térmica de carbón<sup>65</sup>, siendo los efectos de la construcción de esta instalación mucho más severos con el medio que lo rodea. Esto se debe a varios factores:

para amortizar económicamente la instalación de carbón se debe construir una instalación mucho mayor que la de 3'2 MW. Para ello se debería construir una de cientos de MW de potencia que asegurase su rentabilidad. Por lo tanto, en lugar de crear pequeñas instalaciones solares en los pueblos a los que se pretende dar cobertura, es necesario acometer un gran proyecto en una zona, creando a la vez una gran red de suministro que transporte la energía producida a cada punto de destino. Estas actividades crearán, sin posible remedio, una fuerte actuación en la zona en la que se decida acometer el proyecto.

Existencia de vertidos al ambiente en forma líquida, sólida y gaseosa. En forma líquida se deberá tratar el agua utilizada para limpieza de las instalaciones y de la maquinaria, el agua desechada por su uso en el sistema de producción y el agua utilizada durante las obras de construcción del complejo. En forma gaseosa aparecerán numerosas partículas asociadas a la

---

<sup>65</sup> Estudio de Impacto Ambiental de la central termoeléctrica de carbón Río Turbio, situada en Santa Cruz, Perú. Grupo Isolux Córstan.

combustión del carbón como el monóxido de carbono, dióxido de carbono, partículas de azufre, óxidos de nitrógeno y otras partículas en menor medida. En forma sólida se obtendrá una gran cantidad de suelo removido durante la construcción de la instalación y los residuos que queden almacenados en la caldera con el paso del tiempo.

Todos los demás efectos que se mostraban en la opción solar se incrementan en un nivel excesivo. Estos factores unidos a los cálculos que se muestran a continuación, desechan la posibilidad de construir una central térmica como alternativa.

La central solar térmica de dispositivos disco Stirling generará de manera anual 16.200 kWh<sup>66</sup> por cada módulo de 10 kW. Al tener la instalación 320 módulos, la instalación genera un total de 5.184 MWh anuales. Si se generasen esos mismos 5.184 MWh anuales con una caldera de carbón, dependiendo de la calidad del mismo se emitirían las siguientes cantidades de CO<sub>2</sub>.

Tipo de carbón	Kg de CO <sub>2</sub> /kWh producido	Emisiones totales de CO <sub>2</sub> en tm/año
Lignito	1'1	5.702
Carbón	0'95	4.924

Tabla 28. Emisiones de CO<sub>2</sub> al utilizar una caldera de carbón.

Además, como se comentó anteriormente, el tamaño de la central de carbón debería ser mucho mayor para amortizar su elevado coste, lo que supondría unas emisiones totales de CO<sub>2</sub> anuales del orden de varios cientos de veces más que las mostradas en la Tabla 2<sup>67</sup>.

Con una instalación solar de 3'2 MW, instalación que apenas podría suministrar la energía necesaria para consumo diario para una población de 1.000 habitantes, se dejarían de emitir a la atmósfera unas 2.000 toneladas de CO<sub>2</sub> de manera anual.

- *Inventario ambiental.*

El emplazamiento elegido es el municipio de Berja.



Identificación de los impactos y valoración de los mismos.

La identificación de impactos se realiza en una tabla de doble entrada en la que aparecen por un lado las acciones del proyecto susceptibles de producir impacto y por otra parte los elementos del medio susceptibles de ser alterados. Para cada celda de la tabla se dispone de

<sup>66</sup> Dato calculado en el Capítulo VI “Viabilidad económica”, del presente estudio.

<sup>67</sup> Datos obtenidos en la página Web [www.fornuclear.es](http://www.fornuclear.es), y más concretamente en el documento “Energía 2008”.

un valor que cuantifica el efecto producido por cada acción en los respectivos elementos del medio. Su valor se calcula como se explica en el apartado 4.1.

CENTRAL SOLAR DISCO STIRLING				
	Efluentes	Vertidos sólidos	Emisiones gaseosa	Alteración del paisaje
Hidrología	7			
Vegetación	7			9
Fauna	7			
Atmósfera				
Paisaje				12
Empleo				-16
Renta				-16
Fama				-13

Tabla 29. Evaluación de Impacto Ambiental de la instalación solar con unidades disco Stirling. Hidrología:

El único elemento de contaminación potencial es el vertido de lubricante en la zona cercana.

Vertido lubricante.

Intensidad = 1	Momento = 1	Persistencia = 1	Reversibilidad = 1	Extensión = 1
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 1 + 1 + 1 + 1 + 1 = 7$$

Vegetación:

Como posibles elementos de contaminación potencial se encuentra la eliminación de vegetación en la cimentación de la zona donde se instalan los módulos solares, junto con los posibles vertidos de lubricante.

Vertido lubricante.

Intensidad = 1	Momento = 1	Persistencia = 1	Reversibilidad = 1	Extensión = 1
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 1 + 1 + 1 + 1 + 1 = 7$$

Cimentación.

Intensidad = 1	Momento = 3	Persistencia = 1	Reversibilidad = 1	Extensión = 1
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 1 + 3 + 1 + 1 + 1 = 9$$

Fauna:

Como posibles elementos de contaminación potencial se encuentran con los posibles vertidos de lubricante.

Vertido lubricante.

Intensidad = 1	Momento = 1	Persistencia = 1	Reversibilidad = 1	Extensión = 1
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 1 + 1 + 1 + 1 + 1 = 7$$

Paisaje:

Como posibles elementos de contaminación potencial se encuentra el gran tamaño de las unidades de disco parabólico y la instalación del resto de elementos auxiliares.

Impacto en el paisaje.

Intensidad = 2	Momento = 3	Persistencia = 1	Reversibilidad = 1	Extensión = 2
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 2 + 3 + 1 + 1 + 2 = 12$$

*Empleo:*

A diferencia del resto de los indicadores, el empleo y la renta son factores positivos a la hora de evaluar el impacto de la central en la zona, y por eso aparecen en la tabla con valores negativos. En lugar de incluir todos los campos como campos afectados debido a las distintas tareas que generan los distintos tipos de vertidos, se utiliza únicamente el campo de alteración del paisaje como campo donde se agrupan todos los puestos de trabajo creados. Lo mismo ocurrirá con la renta.

Alteración del paisaje.

Intensidad = 2	Momento = 3	Persistencia = 3	Reversibilidad = 2	Extensión = 2
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 2 + 3 + 3 + 2 + 2 = 16$$

*Renta:*

Alteración del paisaje.

Intensidad = 2	Momento = 3	Persistencia = 3	Reversibilidad = 2	Extensión = 2
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 3 + 3 + 3 + 2 + 2 = 16$$

*Fama:*

La fama puede ser un factor positivo o negativo dependiendo del tipo de instalación construida y de la repercusión que tiene sobre el medio ambiente. En el caso de la instalación de generación solar suponemos que la fama de la empresa se ve favorecida.

Alteración del paisaje.

Intensidad = 2	Momento = 2	Persistencia = 2	Reversibilidad = 1	Extensión = 2
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 2 + 2 + 2 + 1 + 2 = 13$$

A continuación se muestra el impacto ocasionado por la central de carbón.

CENTRAL DE CARBÓN				
	Efluentes	Vertidos sólidos	Emisiones gaseosa	Alteración del paisaje
Hidrología	11	12	21	19
Vegetación	11	12	12	19
Fauna	9	12	10	11
Atmósfera			21	
Paisaje	9	12	10	19
Empleo				-19
Renta				-19
Fama				16

*Tabla 30. Evaluación de Impacto Ambiental de la instalación de una central de carbón.*

*Hidrología:*

Los elementos de contaminación potencial incluyen todos los ámbitos posibles.

Vertido líquido.

Intensidad = 2	Momento = 2	Persistencia = 1	Reversibilidad = 1	Extensión = 1
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 2 + 2 + 1 + 1 + 1 = 11$$

Vertido sólido.

Intensidad = 1	Momento = 1	Persistencia = 1	Reversibilidad = 1	Extensión = 1
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 2 + 2 + 1 + 2 + 1 = 12$$

Vertido gaseoso.

Intensidad = 3	Momento = 3	Persistencia = 3	Reversibilidad = 3	Extensión = 3
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 3 + 3 + 3 + 3 + 3 = 21$$

Alteración del paisaje.

Intensidad = 3	Momento = 3	Persistencia = 3	Reversibilidad = 2	Extensión = 2
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 3 + 3 + 3 + 2 + 2 = 19$$

*Vegetación:*

Los elementos de contaminación potencial incluyen todos los ámbitos posibles.

Vertido líquido.

Intensidad = 2	Momento = 2	Persistencia = 1	Reversibilidad = 1	Extensión = 1
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 2 + 2 + 1 + 1 + 1 = 11$$

Vertido sólido.

Intensidad = 2	Momento = 2	Persistencia = 1	Reversibilidad = 1	Extensión = 1
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 2 + 2 + 1 + 1 + 1 = 12$$

Vertido gaseoso.

Intensidad = 2	Momento = 2	Persistencia = 2	Reversibilidad = 1	Extensión = 1
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 2 + 2 + 2 + 1 + 1 = 12$$

Alteración del paisaje.

Intensidad = 3	Momento = 3	Persistencia = 3	Reversibilidad = 2	Extensión = 2
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 3 + 3 + 3 + 2 + 2 = 19$$

*Fauna:*

Los elementos de contaminación potencial incluyen todos los ámbitos posibles.

Vertido líquido.

Intensidad = 2	Momento = 2	Persistencia = 1	Reversibilidad = 1	Extensión = 1
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 2 + 2 + 1 + 1 + 1 = 9$$



Vertido sólido.

Intensidad = 2	Momento = 2	Persistencia = 1	Reversibilidad = 2	Extensión = 1
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 2 + 2 + 1 + 2 + 1 = 12$$

Vertido gaseoso.

Intensidad = 2	Momento = 1	Persistencia = 1	Reversibilidad = 1	Extensión = 1
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 2 + 1 + 1 + 1 + 1 = 10$$

Alteración del paisaje.

Intensidad = 2	Momento = 2	Persistencia = 1	Reversibilidad = 1	Extensión = 1
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 2 + 2 + 1 + 1 + 1 = 11$$

*Atmósfera:*

Como elementos de contaminación potencial se incluyen los contaminantes originados en la combustión del carbón.

Vertido gaseoso.

Intensidad = 3	Momento = 3	Persistencia = 3	Reversibilidad = 3	Extensión = 3
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 3 + 3 + 3 + 3 + 3 = 21$$

*Paisaje:*

Los elementos de contaminación potencial incluyen todos los ámbitos posibles.

Vertido líquido.

Intensidad = 2	Momento = 2	Persistencia = 1	Reversibilidad = 1	Extensión = 1
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 2 + 2 + 1 + 1 + 1 = 9$$

Vertido sólido.

Intensidad = 2	Momento = 2	Persistencia = 1	Reversibilidad = 2	Extensión = 1
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 2 + 2 + 1 + 2 + 1 = 12$$

Vertido gaseoso.

Intensidad = 2	Momento = 1	Persistencia = 1	Reversibilidad = 1	Extensión = 1
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 2 + 1 + 1 + 1 + 1 = 10$$

Alteración del paisaje.

Intensidad = 3	Momento = 3	Persistencia = 3	Reversibilidad = 2	Extensión = 2
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 3 + 3 + 3 + 2 + 2 = 19$$

*Empleo:*

A diferencia del resto de los indicadores, el empleo y la renta son factores positivos a la hora de evaluar el impacto de la central en la zona, y por eso aparecen en la tabla con valores negativos. En lugar de incluir todos los campos como campos afectados debido a las distintas tareas que generan los distintos tipos de vertidos, se utiliza únicamente el campo de alteración del paisaje como campo donde se agrupan todos los puestos de trabajo creados. Lo mismo ocurrirá con la renta.

Alteración del paisaje.

Intensidad = 3	Momento = 3	Persistencia = 3	Reversibilidad = 2	Extensión = 2
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 3 + 3 + 3 + 2 + 2 = 19$$

Renta:

Alteración del paisaje.

Intensidad = 3	Momento = 3	Persistencia = 3	Reversibilidad = 2	Extensión = 2
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 3 + 3 + 3 + 2 + 2 = 19$$

Fama:

La fama puede ser un factor positivo o negativo dependiendo del tipo de instalación construida y de la repercusión que tiene sobre el medio ambiente. En el caso de la central de carbón suponemos que la fama de la empresa se ve perjudicada.

Alteración del paisaje.

Intensidad = 2	Momento = 2	Persistencia = 3	Reversibilidad = 2	Extensión = 3
----------------	-------------	------------------	--------------------	---------------

$$\text{Valoración} = 3 * 2 + 2 + 3 + 2 + 3 = 16$$

## 5.0 Conclusiones.

La tecnología solar de disco parabólico se sitúa en la actualidad en las puertas de la rentabilidad económica, preparando su salto definitivo al mercado eléctrico. Pronto, estos sistemas se convertirán en una realidad en el mercado de la generación, y gracias a sus características permitirán reducir de manera sustancial las emisiones de CO2 y el impacto medioambiental asociado a la generación de energía eléctrica. Además, como se pudo comprobar, el impacto que produce este tipo de centrales solares en el medio ambiente es mucho menor que el que producen las centrales convencionales, mientras que la generación de riqueza y de puestos de trabajo es similar. Todo esto se detallará más en profundidad en el próximo capítulo.

## **CAPÍTULO VIII:**

## **CONCLUSIONES**

## **1.0 Conclusiones.**

Los actuales sistemas de producción de energía eléctrica presentan problemas a nivel económico, político y medioambiental. Estos problemas, lejos de disminuir, se acentúan cada año, por lo que se hace necesario encontrar nuevas formas de producción de energía. Estas nuevas formas de producción de energía eléctrica deben ser lo suficientemente efectivas como para sustituir a los sistemas basados en la quema de combustibles fósiles, además de ser respetuosas con el medio ambiente; son las denominadas energías renovables

De entre las distintas tecnologías renovables, el presente documento se centró en el estudio de la energía solar termoeléctrica, y más concretamente en el estudio de los sistemas disco Stirling como sistemas de generación de energía eléctrica. A continuación se presentan las principales conclusiones extraídas de dicho estudio.

### **1.1 Energía solar. Tecnología disco Stirling.**

La generación de electricidad con instalaciones solares a gran escala es tecnológicamente posible y podría llegar a ser competitiva en un plazo no muy largo de tiempo. Para ello, deben realizarse nuevos esfuerzos tanto en la investigación, como en la implantación de sistemas ya contrastados. Los sistemas disco Stirling, junto con otras tecnologías solares, pueden desarrollar un papel muy destacado en la sustitución paulatina de algunos sistemas fósiles.

En los sistemas solares es común distinguir entre dos tipos de instalaciones. Por un lado existen pequeñas instalaciones descentralizadas; por el otro grandes centrales de producción. Mientras que las pequeñas instalaciones son capaces de generar electricidad en un orden de kilowatios (con máximos de 100 kW), y pueden estar instaladas en áreas remotas alejadas de la red, las grandes instalaciones generan cientos de megavatios que suministran a la red. Las principales tecnologías solares disponibles son:

#### a) Grandes instalaciones:

- Sistema de receptor Central.
- Sistemas de colectores distribuidos.
- Sistemas de disco parabólico.

#### b) Pequeñas instalaciones:

- Sistemas de disco parabólico.
- Sistemas fotovoltaicos.

Como se puede observar, los sistemas de disco parabólico, en los que se incluyen los sistemas disco Stirling, son las únicas estructuras solares de generación de energía eléctrica que están preparadas para acceder al mercado tanto en pequeñas instalaciones aisladas, como en grandes centrales capaces de generar cientos de megavatios.

Los sistemas disco Stirling son sistemas que convierten la energía solar en energía eléctrica mediante el uso de un motor Stirling. La energía del sol es concentrada en un receptor, en el que se encuentra un absorbedor que suministra energía térmica al motor Stirling, donde se convierte en energía mecánica. Mediante la utilización de un generador eléctrico, la energía mecánica se convierte en eléctrica y se envía a la red.

El principal objetivo en la actualidad es conseguir sistemas solares con elevados rendimientos que puedan competir en precio con los actuales sistemas fósiles. Los materiales que componen los sistemas disco parabólico son relativamente baratos, y a medida que se perfeccionan los prototipos, los precios descienden al encontrarse materiales más efectivos y comunes. El mismo proceso ocurre con los diseños; estructuras cada vez más simplificadas y componentes cada vez más efectivos. Si se continúa en esta línea, futuras producciones en cadenas de montaje podrían abaratar aun más el producto, llegando a convertir a los sistemas disco Stirling en sistemas altamente competitivos.

El alto rendimiento de los sistemas disco Stirling les convierte en uno de los sistemas con más proyección en el futuro. Con rendimientos pico en prototipos de hasta el 30%, los sistemas disco Stirling poseen un atractivo mayor para el futuro que las instalaciones fotovoltaicas. El problema de aumentar su rendimiento, para conseguir sistemas más competitivos económicamente, pasa por seguir investigando la mejora de sus componentes.

Como se puede observar en la Figura 62, que muestra la evolución del rendimiento y de la potencia suministrada por una unidad de 10 kW en función de la irradiación directa recibida, a medida que aumentamos la irradiación recibida, aumenta la potencia suministrada.

El problema de la instalación es su rendimiento, que crece rápidamente para pequeños valores de irradiación normal recibida, tendiendo a estancarse su valor en torno a un 20% para valores mayores de irradiación, debido al límite técnico de sus componentes.

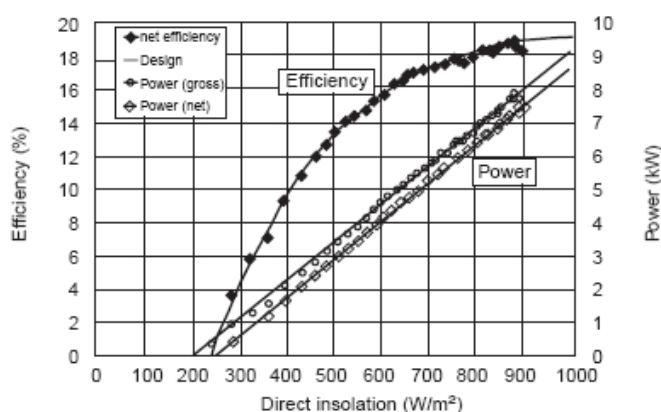


Figura 62. Evolución de la potencia y del rendimiento de una unidad de 10 kW en función de la irradiación normal directa.

## 1.2 Viabilidad económica de los sistemas disco Stirling.

En lo referente a los costes, los sistemas disco Stirling se muestran como una alternativa de futuro altamente competitiva. Como se estudió en el Capítulo VI del presente documento, la viabilidad de estos sistemas, en un hipotético caso de producción en cadena que reduzca los costes de producción, es similar a la de las instalaciones fotovoltaicas. En la Figura 63 se muestra una estimación de la tendencia del coste de la unidad energética generada con sistemas disco Stirling. Se espera que la producción en serie de miles de unidades anuales reduzca los costes de manera muy significativa, reduciéndose de manera especial los costes del motor, del sistema de seguimiento y del conjunto concentrador-receptor-absorbedor.

Si comparamos los costes esperados para los sistemas disco Stirling, con los costes actuales de los sistemas de generación fotovoltaicos (tecnología plenamente desarrollada con pocas posibilidades de reducir costes), o con los costes de los sistemas basados en generadores diesel (costes que debido al encarecimiento del combustible irán creciendo en los próximos años), observamos que los sistemas disco Stirling pueden ser altamente competitivos en el mercado de las pequeñas instalaciones.

En grandes instalaciones generadoras existen diversas posibilidades para el futuro, siendo las alternativas solares las que presentan mayores posibilidades de desarrollo. En la actualidad se encuentran en fase de desarrollo las dos únicas plantas comerciales de producción con tecnología disco Stirling en el mundo. Se ubicarán en California y sus potencias respectivas son de 350 y de 500 MW. Los costes de la energía obtenida se espera que ronden los 15 cent.\$/ kWh. La Figura 4 muestra la tendencia que se espera en distintas tecnologías renovables que aun no se encuentran plenamente desarrolladas.

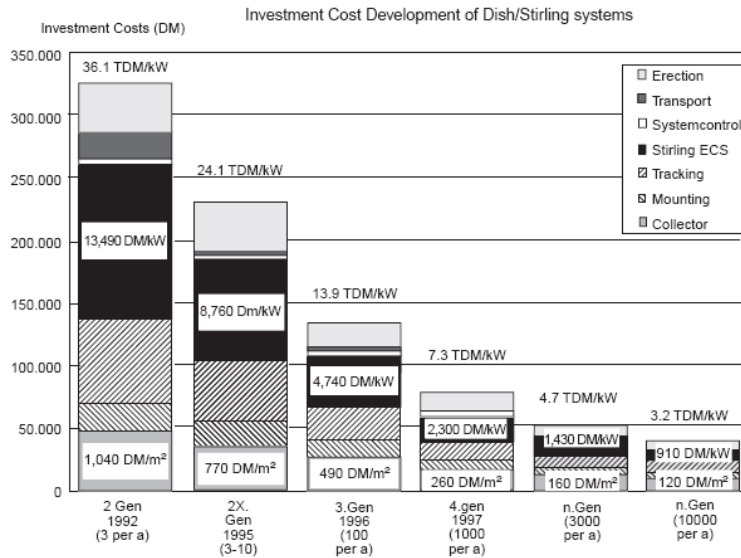


Figura 63. Evolución del coste del kW en las distintas generaciones de sistemas disco Stirling.

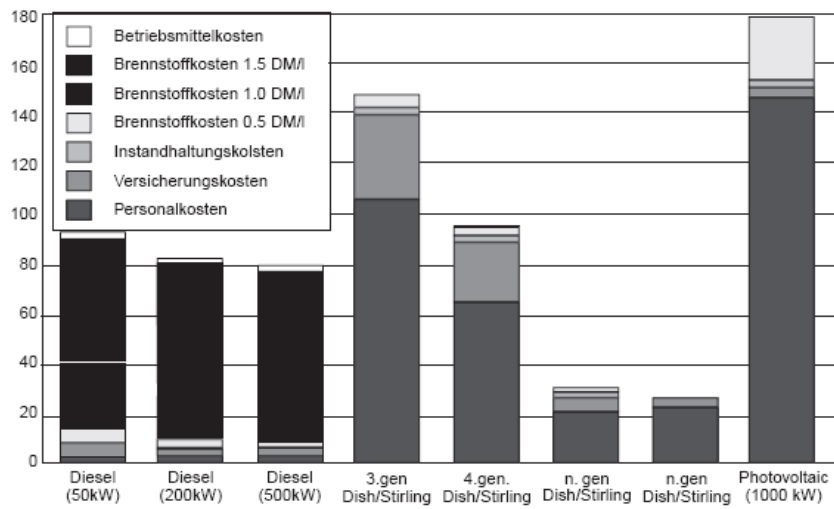


Figura 64. Comparación de la evolución del precio del kWh diesel, fotovoltaico y disco Stirling.

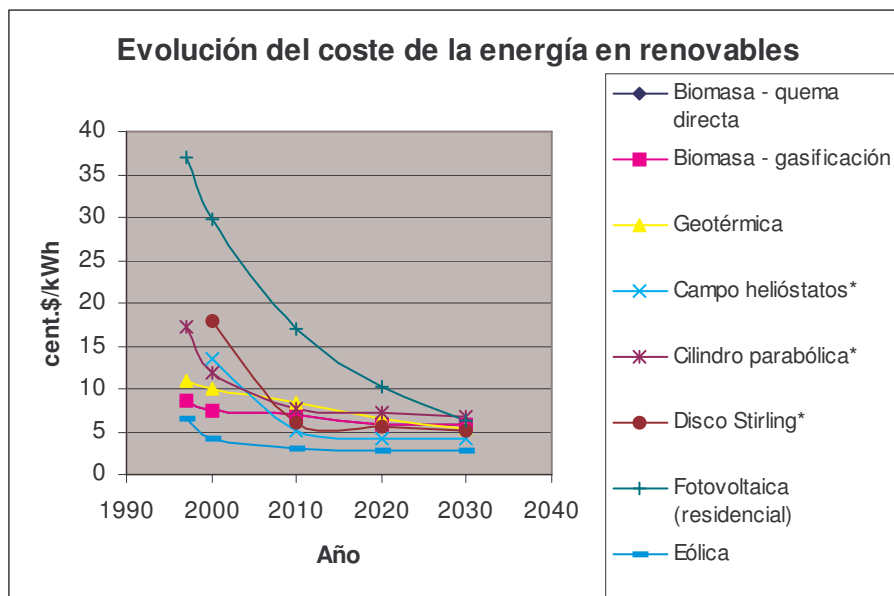


Figura 65. Evolución de los costes en tecnologías renovables.

En la figura se observa que la energía eólica se encuentra en la actualidad plenamente desarrollada, con unos costes de producción de la energía competitivos incluso con los sistemas basados en combustibles fósiles. También destaca el precio del kWh producido con tecnología fotovoltaica, cuyo valor es muy superior en la actualidad al del resto de tecnologías. Se espera que el coste de la energía producida con paneles fotovoltaicos se reduzca gracias al aumento de su rendimiento con el uso de paneles multicapa, y con la reducción de sus costes al incorporar láminas delgadas de silicio.

En lo referente a la energía solar termoeléctrica se espera que los sistemas disco Stirling, a pesar de partir de un desarrollo comercial posterior, logren alcanzar en competitividad en las próximas décadas a los sistemas de concentradores cilíndrico parabólico y a los campos de helióstatos.

### 1.3 Evolución en el diseño de los componentes.

Desde el punto de vista del diseño los principales objetivos son conseguir componentes con rendimientos mayores, un mejor sistema de seguimiento y una estructura más ligera que permita reducir la cantidad de material utilizado, y por lo tanto, los costes del sistema. Los componentes con menores rendimientos son el motor y el conjunto receptor-absorbedor. La futura utilización de los receptores basados en heat pipe, en lugar de los tubos directamente iluminados utilizados en la actualidad, podría suponer una mejora significativa en el aumento del rendimiento del motor Stirling. Sin embargo, el calor cedido por el receptor sería menor, por lo que la mejora del rendimiento global de la instalación está aún por demostrar.

En la actualidad el objetivo principal es la reducción de los costes de la energía. Todos los esfuerzos en diseño, en fabricación y en el resto de áreas van en esa dirección y la tendencia es abaratar los costes aunque sea a costa de un rendimiento menor de la instalación.

### 1.4 Impacto ambiental.

La instalación de módulos disco Stirling aislados tiene un impacto ambiental bastante reducido. Si lo comparamos con una instalación fotovoltaica, el sistema disco Stirling tiene la ventaja de estar compuesto por materiales mayoritariamente fáciles de reciclar, y poco contaminantes en situaciones de abandono. No ocurre lo mismo con las placas de silicio que componen los módulos fotovoltaicos, ya que son costosas de reciclar y altamente contaminantes en caso de abandono.

En el caso de las grandes centrales compuestas por numerosos módulos disco Stirling, el impacto producido es pequeño si lo comparamos con las centrales térmicas de la actualidad, pero es considerable cuando se introduce en un medio virgen.

Desde el punto de vista de las emisiones, una unidad de 10 kW es capaz de evitar la emisión anual de seis toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Esto supone la ventaja de disponer de los ingresos por venta de derechos de emisiones establecidas en el Protocolo de Kioto, a la vez que se evita la emisión de contaminantes como el ya mencionado dióxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre, el monóxido de carbono, etc. altamente contaminantes y perjudiciales para la salud.

Con todo ello se concluye que los sistemas disco Stirling son una buena opción de futuro, especialmente en España debido a sus características climatológicas, ya que aseguran una manera limpia y eficaz de producción de energía eléctrica, a la vez que aseguran ser económicamente competitivos frente a otros tipos de producción. Además, su capacidad híbrida permitirá en el futuro disponer de sistemas auxiliares basados en la quema de biomasa, lo cual permitirá disponer de energía eléctrica obtenida de manera renovable las 24 horas del día.

## Bibliografía

- *Apuntes de la asignatura "Ingeniería Energética"*-. Antonio Lecuona Neuman.
- *Apuntes de la asignatura "Instalaciones Fluidotérmicas"*-. Pedro Rodríguez Aumente.
- *Apuntes de la asignatura "Oficina Técnica"*-. Manuel de Dos Castillos.
- *A compendium of Solar Dish Stirling Systems* -. William B. Stine, California State Polytechnic University and Richard B. Diver, Sandia National Laboratories. January 1994.
- *Advances in solar thermal electricity technology*-. D. Mills, University of Sydney, Australia 2003.
- *Análisis económico de instalaciones fotovoltaicas*. Publicación de Icarus Solar.
- *Análisis económico y de rentabilidad de la producción de energía fotovoltaica conectada a la red eléctrica para la isla de Lanzarote* -. Cabildo de Lanzarote. Enero 2006
- *Analysis and design consideration of mean temperature differential Stirling engine for solar application* -. Iskander Tliti, Youssef Timoumi and Sassi Ben Nasrallah, University of Tunisia, November 2007.
- *Aprovechamiento de la energía en forma térmica para la producción de energía eléctrica* -. Jorge Horacio Barón, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo, 2004
- *Aspectos medioambientales de la energía solar fotovoltaica. Regulación de las ubicaciones de las centrales fotovoltaicas* -. Dryas, Estudios y proyectos medioambientales.
- *The Boeing / SES DECC Project* -. Department of energy of the United States of America.
- *Detailed Performance Analysis of a 10 kW Dish STirling System* -. W. Reinalter, S. Ulmer and P. Heller, German Aerospace Center and the Plataforma Solar de Almería; J. M. Gineste, A. Ferriere and F. Nepveu of the CNRS-PROMES Laboratory, January 2008.
- *Dish Stirling Hybrid Heat Pipe Receiver Design and Test Results* -. James Moreno, Sandia National Laboratories, 2002.
- *Dish Stirling activities at SBP* -. SBP, March 2007.
- *Evaluación de Impacto Ambiental de la central solar termoeléctrica ANDASOL* -. Boletín Oficial de la Provincia de Granada, año 2004, número 203.
- *Energía Solar Fotovoltaica* -. CECU.
- *Energías Renovables: Energía Solar* -. Silvia Palero, CIEMAT, 2006.
- *Energía Solar en España 2007. Estado actual y perspectiva* -. Publicación del IDAE, 2007.
- *Energía Solar Termoeléctrica* -. Manuel Romero Álvarez, PSA-CIEMAT, 2002.
- *EnviroDish and EuroDish: system and status* -. Thomas Keck and Wolfgang Schiel, SBP. 2002.
- *Estudio de Impacto Ambiental de la central termoeléctrica a carbón Rio Turbio* -. Publicación de Isolux Corsán.
- *EuroDish System description* -. Publicación de SBP. 2002
- *EuroDish – The next milestone to decrease the costs of Dish Stirling systems towards competitiveness* -. Peter Heller, Plataforma Solar de Almería, Andreas Baumüller, SOLO, and Wolfgang Schiel, SBP. 1999.
- *Evaluación de Impacto Ambiental* -. Luis Enrique Sánchez, Universidad Politécnica de Sao Paulo.
- *Experimental results at PSA facilities estimation of implementing dish Stirling system in Romania* -. Mihai Macavescu, University of Bucarest. 2001.
- *Energía Nuclear y Cambio Climático* -. Foro Nuclear. 2008.
- *Energía 2008* -. Foro Nuclear. 2008.
- *Energía Solar Termoeléctrica* -. Publicación de Greenpeace. 2007.
- *Guía Solar Completa* -. Publicación de Greenpeace. 2007.
- *High Temperature Solar Thermal Roadmap* -. Wyld Group. 2008.
- *Hybrid sodium heat pipe receivers for dish\_stirling systems* -. Doerte Laing and Michael Reusch, Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart. 1996.
- *Informe final RENOVALIA* -. 2005.



- *Mass Transport, Corrosion, Plugging, and Their Reduction in Solar Dish/Stirling Heat Pipe Receivers* -. James Moreno, Sandia National Laboratories, Albuquerque. 1997.
- *Progress in the European dish Stirling technology the Eurodish project* -. Vittorio Brignoli, Centro Electrtecnico Sperimentale Italiano, Milano. 2001.
- *Project financials evaluation* -. Department of Energy of the U.S.A.
- *Plan de Energías Renovables 2005-2010* -. IDAE. Julio 2005.
- *REAL DECRETO LEGISLATIVO 1\_2008, de 11 de Enero. Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos* -.
- *Sistemas solares de concentración. Unidad de disco parabólico* -. Félix Tellez, Plataforma Solar de Almería. 2006.
- *Solar Dish Stirling Systems Report* -. Stirling Engine Systems, March 2007.
- *Solar dish engine* -. Department of Energy of the U.S.A.
- *Tecnología Termosolar Andalucía* -. Junta de Andalucía. Enero2008.
- *Tension structures for solar generation* -. Jörg Schlaich, University of Stuttgart. 1999.
- *Energía Solar Térmica de Concentración 2006* -. Juan Antonio Cabrera Jiménez, María José Cuesta Santianes y Marta Pérez Martínez, CIEMAT .2006.
- *Thermal Model of the EuroDish Solar Stirling Engine* -. Francisco J. García Granados, Manuel A. Silva Pérez y V. Ruiz-Hernández, Grupo de Termodinámica y Energías Renovables, Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla. 2008.

### Páginas Web

- *Ministerio de Industria, Turismo y Comercio* -. [www.mityc.es](http://www.mityc.es)
- *Ministerio de Medio Ambiente* -. [www.mma.es](http://www.mma.es)
- *Centro de investigaciones CIEMAT* -. [www.ciemat.es](http://www.ciemat.es)
- *Empresa SBP* -. [www.sbp.de](http://www.sbp.de).
- *Motores Stirling* -. [www.soloengine.com](http://www.soloengine.com) y [www.stirlingengine.com](http://www.stirlingengine.com)
- *Departamento de Energía de Estados Unidos* -. [www.eere.energy.gov](http://www.eere.energy.gov)
- *Foro Nuclear* -. [www.foronuclear.es](http://www.foronuclear.es)
- *Red Eléctrica Española* -. [www.ree.es](http://www.ree.es)
- *Ministerio de Industria, Turismo y Comercio* -. [www.mityc.es](http://www.mityc.es)
- *Recursos electrónicos del servicio de biblioteca de la Universidad Carlos III de Madrid.*
- *Plataforma solar de Almería* -. [www.psa.es](http://www.psa.es)

### Origen de las figuras

- Figuras 1, 3 procedentes del documento “*Energía Solar Termoeléctrica 2020*” de *Greenpeace*.
- Figuras 2, 4 procedentes del documento “*Energía Solar Termoeléctrica*” de Manuel Romero Álvarez, publicaciones del Ciemat.
- Figuras 5, 7, 8, 12 y 13 procedentes del documento “*EuroDish Stirling System Description*” de SBP.
- Figuras 6, 9 y 14 procedentes del documento “*Solar Dish Engine*” del departamento de Energía de los Estados Unidos de América.
- Figuras 11 y 54 procedentes del documento “*Mass transport, corrosion, plugging and their reduction in solar dish Stirling heat pipe receiver*”.
- Figuras 10 y 12 procedentes de la página web del fabricante de motores Stirling SOLO.
- Figuras 15, 16, 17, 18 y 19 procedentes del documento “*Detailed Performance Analysis of a 10 kW Dish/Stirling System*”.
- Figuras 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 y 27 procedentes del documento “*Thermal model of a dish/Stirling system*”.
- Figuras 28, 29, 30 y 31 procedentes del documento “*Operación rutinaria de un disco parabólico con motor Stirling conectado a red, en la Escuela de Inegieros de Sevilla*”, Valeriano Ruíz, XIV Congreso Ibérico de Energía Solar, Vigo, junio 2008.
- Figuras 32, 33 y 35 procedentes del documento “*Experimental results at PSA facilities, estimation of implementing dish Stirling system in Romania. IHP programme*”

- Figuras 34 y 36 elaboración propia.
- Figuras 37, 38, 39, 40, 41, 49 y 57 procedentes del documento *“Sistemas solares de concentración. Unidad de disco parabólico.* Félix Tellez.
- Figuras 42, 46 y 47 procedentes del documento *“Analysis and design consideration of mean temperature differential Stirling engine for solar application”.*
- Figuras 45 (a), 45 (b) y 45 (c) procedentes del documento *“Thermal Model of the EuroDish Solar Stirling Engine”.*
- Figuras 43 y 44 procedentes de la página Web [www.solokleinmotoren.com](http://www.solokleinmotoren.com).
- Figura 48 procedente de la página Web [www.sbp.de](http://www.sbp.de).
- Figura 50 procedente de la página Web de la Plataforma Solar de Almería.
- Figuras 51 y 53 procedentes del documento *“EuroDish – The next milestone to decrease the costs of Dish Stirling systems towards competitiveness”.*
- Figura 52 procedente del documento *“Solar Dish Stirling Systems Report”.*
- Figuras 55, 56, 59, 60 y 65 elaboración propia.
- Figura 61 procedente de la Web [www.foronuclear.es](http://www.foronuclear.es)
- Figura 58 procedente del documento *Energía Solar en España 2007. Estado actual y perspectiva.*
- Figuras 62, 63 y 64 procedentes del documento *“EnviroDish and EuroDish: system and status”.*