

Resumen

En el año 2015 se llevó a cabo la instalación de una unidad de disco Stirling *TRINUM*, de *INNOVA Solar*, en el edificio de la *ETSEIB*, *UPC*, Barcelona, como parte del proyecto europeo *DIDSOLIT*, financiado por la Unión Europea, dentro del marco de referencia del programa *ENPI-MED*, basado en el estudio y desarrollo de tecnologías solares innovadoras con tal de estimular la descentralización del sistema eléctrico y promover el recorte de emisiones de gases dañinos para el medio ambiente.

Con tal de aprovechar la oportunidad de estudio que dicho proyecto ofrecía, se propuso un trabajo de final de grado sobre el disco Stirling instalado en particular y sobre la tecnología, su viabilidad y sobre el proyecto de ingeniería que requiere en general.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivos del proyecto	1
1.2. Alcance del proyecto	2
2. Estado del arte	3
2.1. Una alternativa sostenible	3
2.2. Recurso solar	4
2.3. El disco Stirling	5
2.4. Tecnologías renovables solares	5
2.5. Oferta comercial	9
2.6. Tecnología	12
2.6.1. Motor Stirling	12
2.6.2. Paraboloide	24
2.6.3. Receptor	33
2.6.4. Refrigerador	34
2.7. Generación eléctrica	36
2.7.1. Distribución eléctrica	37
2.8. Generación térmica	38
3. El disco Stirling TRINUM	43
3.1. INNOVA Solar	43
3.2. Objetivos de la instalación	43
3.3. TRINUM y sus sistemas asociados	44
3.3.1. Sensado	45
3.3.2. Control	46
3.3.3. Sistema eléctrico	47
3.3.4. Óptica	48
3.3.5. Motor Stirling	49
3.3.6. Sistema hidráulico	50
3.3.7. Estructura	52

4. Análisis de funcionamiento del disco Stirling	55
4.1. Cálculo de la radiación solar	56
4.2. Concentración solar	63
4.3. Motor Stirling	64
4.3.1. Receptor	64
4.4. Condiciones del estudio	65
4.5. Análisis de funcionamiento	68
4.5.1. Generación de energía	68
4.5.2. Estudio de otros parámetros relacionados	73
4.5.3. Seguimiento solar	74
4.5.4. Rendimiento	75
4.6. Extrapolación anual	78
5. Análisis económico y rentabilidad	83
5.1. Condiciones del estudio	84
5.2. Perspectivas económicas	86
5.2.1. Supuesto 1	86
5.2.2. Supuesto 2	86
5.2.3. Supuesto 3	88
6. Conclusiones y predicciones de futuro	95
Agradecimientos	I
Bibliografía	IX
A. Mapa de husos horarios	XI
B. Condicionamiento de los datos del coeficiente de turbidez de Angström	XIII
C. Gráficos de generación de Innova	XVII
D. Gráficos de generación diaria para los días válidos	XXI
E. Tablas de relaciones entre variables	XXVII
F. Análisis de correlación entre variables del disco Stirling	XXIX

Índice de figuras

1.1. Fotografía del disco Stirling instalado en la ETSEIB. Fotografía del autor.	2
2.1. Esquema de una célula de combustible tradicional y una solar. [62]	7
2.2. Sistemas solares de concentración instalados en la PSA [14].	8
2.3. Discos Stirling instalados en la PSA [14].	11
2.4. Esquema de un motor Stirling de tipo alpha [12].	14
2.5. Esquema de un motor Stirling de tipo beta [12].	15
2.6. Esquema de un motor Stirling de tipo gamma [12].	16
2.7. Ejemplo de un motor Stirling cinemático [52].	16
2.8. Ejemplo de un motor Stirling con pistón libre [73].	17
2.9. Esquema del funcionamiento de un motor Stirling de tipo alfa. El eje vertical representa el tiempo, con números indicando cada uno de los estados. A la izquierda se tiene el foco frío y a la derecha, el caliente [29].	20
2.10. Diagrama PV de un ciclo Stirling ideal.	20
2.11. Motor Stirling de tipo gamma con sistema pistón-desplazador sincronizado mecánicamente [70].	21
2.12. Gráfico de la eficiencia de un motor Stirling contra la efectividad del regenerador [52].	22
2.13. Representación gráfica del semiángulo entre la Tierra y el Sol [28].	25
2.14. Paraboloides según su ángulo de borde [63].	26
2.15. Dos ejemplos de las diferentes formas que pueden adoptar los reflectores [24].	28
2.16. Ángulos de elevación (α_s) y acimut (γ_s) [33].	29
2.17. Diagrama polar de la trayectoria solar para Barcelona. Nota: esta representación escoge el Norte como acimut de origen [21].	32
2.18. Diagrama cartesiano para la trayectoria solar [21]. Corresponde a la misma situación que la figura 2.17.	32

2.19. Anatomía de un receptor de cavidad interior [75].	34
2.20. Fotografía de un absorbedor de tipo de tubos directamente iluminados [66].	34
2.21. Esquema del circuito refrigerador para un disco Stirling de cogeneración.	35
2.22. Máquina rotativa elemental con circuito magnético usual [64].	36
2.23. Conversión de una máquina rotativa a una lineal [32].	37
2.24. Esquema del sistema de cogeneración utilizado en la instala- ción de Disco Stirling de la ETSEIB UPC.	39
2.25. Esquema de tres tipos de acumuladores: <i>Izquierda</i> : Acumula- dor con serpentín. <i>Centro</i> : Acumulador con doble serpentín. <i>Derecha</i> : Acumulador con doble cámara [33].	40
2.26. Sección transversal de un depósito de expansión. La mitad superior se encuentra conectada al circuito de cogeneración mientras que la inferior contiene nitrógeno [60].	41
3.1. Esquema de partes incluidas con TRINUM y aquellas que debe aportar el cliente [23].	45
3.2. Esquema mostrando la configuración de trabajo (izquierda) y de modo de seguridad (derecha) del disco Stirling TRINUM [22].	46
3.3. Esquema del montaje de los espejos [23].	48
3.4. Fotografía de la instalación del soporte del disco TRINUM. . .	54
4.1. Esquema del flujo de energía en el disco Stirling, con pérdidas (izquierda), componente que interviene en cada fase (centro) y factores determinantes (derecha), junto al rendimiento de cada transformación.	56
4.2. Esquema de entradas y salidas del sistema considerado. Tam- bién se analizarán variables internas del sistema, pero no los procesos, por lo que estas se relacionaran entre ellas o con las salidas o entradas.	57
4.3. Fotografía de la estación meteorológica de <i>Barcelona - Zona</i> <i>Universitària del servei meteorològic de Catalunya</i> . [11]	58
4.4. Gráfico de la evolución temporal mensual del coeficiente de perturbación de Angström para varios años.	59
4.5. Representación del ángulo de incidencia θ y ángulos auxiliares [33].	62
4.6. Gráfico relacionando la concentración solar máxima con el án- gulo de borde [56]	63
4.7. Gráfico con los porcentajes de días con datos incompletos, anó- malos o correctos.	67

4.8.	Perfil de generación del disco Stirling para el 22/05/15.	68
4.9.	Gráfico de la generación eléctrica y la temperatura del foco caliente del motor Stirling para el día 21/04/15.	69
4.10.	Gráfico que relaciona la producción eléctrica con la temperatura del foco caliente tomando datos del supuesto 1.	70
4.11.	Gráfico de la generación térmica y la temperatura del foco caliente del motor Stirling para el día 21/04/15.	71
4.12.	Gráfico que relaciona la producción térmica con la temperatura del foco caliente tomando datos del supuesto 1.	71
4.13.	Gráfico con la producción diaria de energía térmica y eléctrica contra la radiación solar captada para el supuesto 1.	72
4.14.	Gráfico con la producción diaria de energía térmica y eléctrica contra la radiación solar captada para el supuesto 2.	73
4.15.	Gráfico con la elevación y acimut solares para el día 22/05/15 contra la radiación directa neta captada.	74
4.16.	Gráfica con la evolución temporal de la acimut y la elevación solar y del disco Stirling para un intervalo de dos días, del 22/05/15 al 23/05/15. Es importante tener en cuenta que la acimut solar presenta errores explicados en el texto.	75
4.17.	Gráfico del rendimiento eléctrico contra la temperatura del foco caliente. Datos del supuesto 1.	77
4.18.	Gráfico del rendimiento térmico contra la temperatura del foco caliente. Datos del supuesto 1.	77
4.19.	Gráfico de la producción de energía eléctrica diaria para los tres supuestos.	80
4.20.	Gráfico de la producción de energía térmica diaria para los tres supuestos.	80
4.21.	Gráfico de la producción de energía total diaria para los tres supuestos.	80
5.1.	Gráfico de la evolución temporal del valor actual total acumulado durante el horizonte de inversión para el supuesto 1. El eje vertical utiliza una escala logarítmica.	87
5.2.	Gráfico de la evolución temporal de pagos y cobros actualizados durante el horizonte de inversión para el supuesto 1. . . .	87
5.3.	Gráfico de la evolución temporal del valor actual total acumulado durante el horizonte de inversión para el supuesto 2. El eje vertical utiliza una escala logarítmica.	88
5.4.	Gráfico de la evolución temporal de pagos y cobros actualizados durante el horizonte de inversión para el supuesto 2. . . .	89

5.5.	Gráfico de la evolución temporal del valor actual total acumulado durante el horizonte de inversión para el supuesto 3. El eje vertical utiliza una escala logarítmica.	90
5.6.	Gráfico de la evolución temporal de pagos y cobros actualizados durante el horizonte de inversión para el supuesto 3. . . .	90
B.1.	Evolución temporal mensual del coeficiente de Angström para los años 2007-2011. El eje horizontal está codificado de tal manera que los 4 primeros dígitos expresan el año y los dos últimos, el mes.	XV
C.1.	Gráfico que relaciona la irradiancia directa normal y la potencia eléctrica generada, para diferentes horas del día. [23]	XVIII
C.2.	Gráfico que relaciona la irradiancia directa normal diaria y la energía producida, tanto térmica como eléctrica. [23]	XIX

Índice de cuadros

2.1. Eficiencias relativas para distintos métodos de seguimiento solar [40].	10
2.2. Aplicaciones según su relación de concentración [28].	25
3.1. Cuadro de especificaciones del disco Stirling TRINUM [22]. . .	53
3.2. Cuadro de producción del disco Stirling TRINUM suministrado por <i>Innova</i> [22, 23]	54
4.1. Rectas de regresión para la generación energética diaria según la irradiancia para cada supuesto y su coeficiente de determinación.	72
4.2. Desglose de rendimientos medios para cada uno de los supuestos.	76
4.3. Media mensual de radiación diaria sobre una superficie horizontal, \bar{H} , y Índice de nubosidad, \bar{K}_T , para Barcelona [33]. . .	78
5.1. Perspectivas de flujos de caja para el supuesto 1	91
5.2. Perspectivas de flujos de caja para el supuesto 2	92
5.3. Perspectivas de flujos de caja para el supuesto 3	93
B.1. Medias aritméticas para los valores mensuales del coeficiente de perturbación de Angström.	XVI
E.1. Cuadro con la correlación entre diversos parámetros del disco Stirling. Los rótulos de las columnas han sido abreviados y las unidades suprimidas por temas de espacio, pero son los mismos que los utilizados para las columnas.	XXVIII
F.1. Análisis de correlación de temperatura del foco caliente contra potencia eléctrica	XXX
F.2. Análisis de correlación de la acimut solar contra la acimut del disco Stirling.	XXXI

F.3. Análisis de correlación de la elevación solar contra la elevación del disco Stirling.	XXXII
-------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------

Capítulo 1

Introducción

La tecnología de disco Stirling muestra gran potencial futuro si consigue reducir los costes de fabricación, permitiéndola competir contra otras soluciones, en especial con la fotovoltaica. Es todavía una tecnología nueva y no sería conveniente subestimarla por su rendimiento en los mercados, hasta ahora bastante mediocre, cuando la Tierra se enfrenta a un reto tan importante como combatir el impacto del cambio climático.

Es por esto y por la reciente instalación de un disco Stirling de cogeneración térmica en la *ETSEIB*, *UPC*¹, permitiendo un estudio más detallado y práctico de la tecnología en cuestión, que se ha decidido elaborar este proyecto. En dicho trabajo se evaluarán las características funcionales de la máquina, se estudiará del proyecto de ingeniería de la cual surgió y se evaluará el rendimiento del generador instalado en particular y de las perspectivas de futuro de esta tecnología.

1.1. Objetivos del proyecto

Así pues, la declaración concisa de los objetivos del proyecto sería la siguiente:

- Estudio del disco Stirling instalado en la *ETSEIB*, *UPC*, Barcelona. Funcionamiento, rendimiento, potencia y otras características.
- Estudio del proyecto de ingeniería realizado para la instalación del disco Stirling, procedimiento de elaboración de proyectos similares.
- Estudio de la viabilidad del proyecto y de la tecnología en general. Perspectivas de futuro.

¹*Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya*: universidad donde se realiza el proyecto y a la que pertenece el autor.



Figura 1.1: Fotografía del disco Stirling instalado en la ETSEIB. Fotografía del autor.

1.2. Alcance del proyecto

La realización del proyecto tendrá dos componentes principales. El primero será eminentemente bibliográfico, basada en la investigación sobre la tecnología de disco Stirling y documentación disponible sobre el ejemplar instalado. Sin embargo, el segundo tendrá un enfoque más práctico, ya que estará basado en resultados proporcionados por el disco Stirling de la *ETSEIB*, tales como lecturas de potencias y rendimientos. En conjunción con otros datos atmosféricos y de características de componentes, se evaluará su funcionamiento y viabilidad.

La síntesis de ambas partes resultará en un trabajo generalista sobre los discos Stirling centrado en un ejemplo real que será de utilidad para posteriores investigaciones sobre el tema.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Una alternativa sostenible

La humanidad se encuentra en un momento crítico para determinar el futuro de su planeta. Los efectos del cambio climático son cada vez más pronunciados y desastrosos, ejemplos de ellos son el clima anómalo presente en el hemisferio norte, con inviernos inusualmente cálidos y sequías en California, inviernos excesivamente húmedos en Inglaterra y Gales y efectos más devastadores en Noruega con sus peores incendios forestales desde que se tienen registros o las inundaciones en Bosnia, todo esto entre Noviembre de 2013 y Enero de 2014 [54]. Estos efectos son resultado del comportamiento anómalo de la *corriente en chorro*¹, que es a su vez causado, según la opción más probable expuesta por Shih-Yu (Simon) Wang y sus colaboradores de la universidad estatal de Utah en un estudio realizado en 2014, debido al cambio climático antropogénico [54].

Tales consecuencias eran casi inevitables, dado el consumo energético actual y la dependencia existente sobre los combustibles fósiles. Entre 1990 y 2010, las emisiones globales de CO₂ se incrementaron a un ritmo del 1.1 % anual, acelerándose al 3 % en los años siguientes [46]. En 2010, alrededor del 85 % de las emisiones de CO₂ mundiales tenían que ver con la producción o consumo de energía y el 41 % de estas emisiones provenían del sector energético [46]. La concentración atmosférica de CO₂ ha aumentado más del 40 % en los últimos 150 años [54] y se hace evidente que son necesarios pasos urgentes y decisivos para atajar una tragedia mayor.

Se trata de un problema complicado, y aunque se han dado pasos para solucionarlo, estableciendo objetivos como el de no superar un aumento de

¹La corriente en chorro es un flujo de aire que circunvala el planeta, de este a oeste a grandes altitudes, existe una para cada hemisferio.

2°C en la temperatura media terrestre, cota que se prevé se alcanzará en 2036 de continuar con la tendencia actual y la emisión de CO₂ no se limita a un máximo de 405 partes por millón [51], está claro que estos no son suficientes, son necesarios objetivos claros y concretos utilizando medidores ambientales más fiables, ya que la temperatura global tan solo está relacionada probabilísticamente con las emisiones y disposiciones legales y no es un resultado directo [77], tal como se puede observar en la denominada *pausa* del aumento de la temperatura global de la última década [51]. Durante este periodo las temperaturas no han aumentado tanto, pero se ha apreciado un aumento del forzamiento radiativo² [77].

Una de las principales razones por las que es tan difícil actuar sobre el cambio climático es porque en el sistema casi cerrado de la Tierra, la energía, el agua y los alimentos, tres de los recursos más importantes para el desarrollo humano, y figurantes en la lista de *los diez mayores problemas de la humanidad en los próximos 50 años*, en ese mismo orden, del ahora fallecido nobel Richard Smalley³ en su ponencia de 2003 [79] están fuertemente interconectados y se influyen mutuamente.

Es precisamente por esto último que la solución del disco Stirling se presenta tan prometedora, al disponer de una huella hídrica casi nula⁴, su fuente de energía inagotable, aislada y extraterrestre y su preferencia por terrenos donde el cultivo sería casi imposible. Se trata de una tecnología extrañamente al margen de cualquier tipo de competencia con otros sectores que no sean el energético.

2.2. Recurso solar

La humanidad se encuentra actualmente orbitando la mayor fuente de energía conocida, una fábrica de fusión nuclear capaz de proporcionar energía ilimitada mientras sea habitable la Tierra. Tanto es así que una cobertura de tan solo el 1 % de la superficie terrestre con colectores operando a tan solo un 1 % de eficiencia podría satisfacer todas las previsiones de consumo energético de la raza humana [47]. Si la eficiencia de estos convertidores alcanzara el 10 %, sería posible subministrar 10 kW a cada individuo de una población de 10 mil millones de habitantes [47].

El espectro de la radiación solar se asemeja mucho a la de un cuerpo negro

²Se trata de la capacidad en la que los gases de efecto invernadero afectan el equilibrio energético de la Tierra

³ Premio Nobel de Química del año 1996 por el descubrimiento de los fulerenos.

⁴Es necesario emplear una cantidad no despreciable de agua para efectuar labores de limpieza y mantenimiento, muy importantes en el rendimiento de los discos.

emitiendo a 5762 K [33], con un máximo de emisión en el espectro visible, para el cual la evolución humana se ha adaptado para ser más sensible. Esta similitud con un cuerpo negro aumenta más aún si se observa desde fuera de la atmósfera terrestre, que influye lo que llega a nivel de suelo, de manera que un 20 % de la radiación total incidente es reflejada hacia el espacio y un porcentaje más pequeño es absorbido [63]. El poder emisivo del cuerpo negro equivalente es denominado *constante solar*, definida más específicamente como la cantidad de energía recibida por unidad de tiempo por una unidad de superficie colocada perpendicularmente a los rayos solares, fuera de la atmósfera [58]. Tiene un valor de 1377 kW m, por lo que si se toma la distancia de la Tierra al Sol como 1.5×10^8 km, la potencia solar es de 4×10^{26} W, aunque solo 1 kW llega a nivel de mar [63].

Aún emitiendo en todo el espectro, es de especial interés la franja de radiación comprendida entre los 10^{-1} μ m y los 10^2 μ m de longitud de onda λ , ya que son las ondas de estas longitudes las emitidas por un cuerpo únicamente debido a su temperatura; la franja de radiación electromagnética delimitada entre estas longitudes de onda recibe el nombre de *radiación térmica* [59].

2.3. El disco Stirling

El concepto básico de funcionamiento de un disco Stirling consiste en concentrar la energía solar mediante el uso de materiales reflectantes en forma de paraboloide de tal modo que se alcanzan temperaturas muy elevadas en el foco de dicha paraboloide. Es en este foco donde se encuentra la *zona caliente* de un motor Stirling. Esta energía alimenta el motor que a su vez genera electricidad y normalmente alimenta un sistema de cogeneración.

Tal máquina está montada sobre un soporte móvil y monitorizado tal que pueda seguir la trayectoria del sol durante el día sobre normalmente dos ejes y de esta manera poder operar a la máxima potencia posible durante toda la jornada.

2.4. Tecnologías renovables solares

Con tal de situar el disco Stirling dentro del contexto de las energías renovables, en concreto de las solares, a continuación se expondrán las principales tecnologías de generación energética con las que comparte recursos y tecnología y contra las que debe competir más directamente en los mercados.

Dentro de la tecnología solar, en una clasificación por principio de funcionamiento, predominan la tecnología de concentración solar y la fotovoltaica,

aunque existen otras opciones menos potentes, como la de placas planas de generación solar térmica, o aún no desarrolladas plenamente, como la solar química.

Captadores de placa plana

Absorben la radiación solar y transfieren la energía a un fluido de trabajo circulando a través de un colector [28]. Consiguen atrapar la energía dentro de las placas al utilizar materiales selectivos con diferente reflectividad para diferentes longitudes de onda, tal que la radiación solar puede entrar en el captador, pero no salir, pues la radiación de la placa tiene otra longitud de onda y es reflejada otra vez para dentro, creando un *efecto invernadero* dentro del colector [50]. Al no concentrar la radiación incidente, pueden utilizar la radiación difusa y disponen de las mayores capacidades de captación térmica de entre las tecnologías solares, aunque también de las mayores pérdidas, por lo que no suelen operar a más de 80°C para eficiencias superiores al 25 % [28].

Tecnología fotovoltaica

Basada en la conversión directa de radiación solar a energía eléctrica mediante el uso de semiconductores y el efecto fotoeléctrico [48]. Tal efecto consiste en la absorción de fotones por parte de la unión entre semiconductores de tipo p y n, forzando el salto de un electrón entre las bandas de conducción y valencia, creando un hueco en esta última y generando un par electrón-hueco [50]. Si estos son entonces separados por el campo eléctrico debido a la unión p-n, se produce una circulación de electrones y una corriente eléctrica [50], que es consecuentemente aprovechada para la generación de electricidad. Una célula de silicio es capaz de aprovechar aproximadamente un 65 % del espectro de la radiación solar recibida [50], incluyendo la que no es directa.

Tecnología solar química

Aún muy inmadura y experimental, contempla el uso de la radiación solar para llevar a cabo reacciones químicas⁵ para obtener materiales deseados, entre los que se incluyen materiales de construcción tales como ladrillos, tiza, cemento, metales, vidrios o elementos cerámicos. [33].

Otra forma de aprovechar reacciones químicas impulsadas por la radiación solar es mediante el almacenamiento de la energía en forma de enlaces químicos, por ejemplo mediante las células solares mostradas en la figura 2.1, donde se utiliza la radiación solar para separar moléculas

⁵Reacciones de secado, deshidratación, calcinación, reducción, destilación y *cracking*

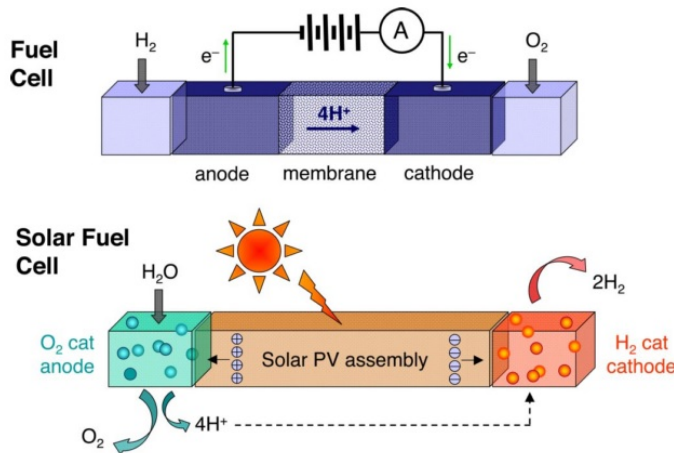
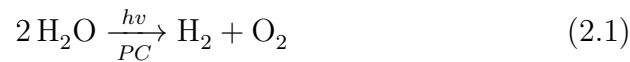


Figura 2.1: Esquema de una célula de combustible tradicional y una solar. [62]

de H_2O en sus componentes H_2 y O_2 (ver reacción 2.1) de tal manera que se puedan almacenar y recuperar la energía al recombinarlos mediante una reacción exotérmica al quemar el hidrógeno para formar agua [62].



Tecnología de concentración solar

A la cual pertenece el disco Stirling. Su principio de funcionamiento consiste en concentrar la radiación solar sobre una superficie. Esta energía concentrada puede utilizarse directamente para aumentar la eficiencia de células fotovoltaicas o bien para calentar un fluido de trabajo y extraer energía de él mediante un ciclo termodinámico dentro de un motor que éste acciona directa o indirectamente para extraer energía cinética y finalmente, energía eléctrica mediante un generador [38, 44, 45, 48].

Dentro de la tecnología de concentración solar, existen varias soluciones para el aprovechamiento de la radiación del sol. A continuación se expone las principales.

Torre central

Se trata de un sistema donde una disposición, normalmente circular, de helióstatos⁶ concentran la radiación solar sobre un receptor situado

⁶Nombre dado a espejos con seguimiento solar en dos ejes [50].

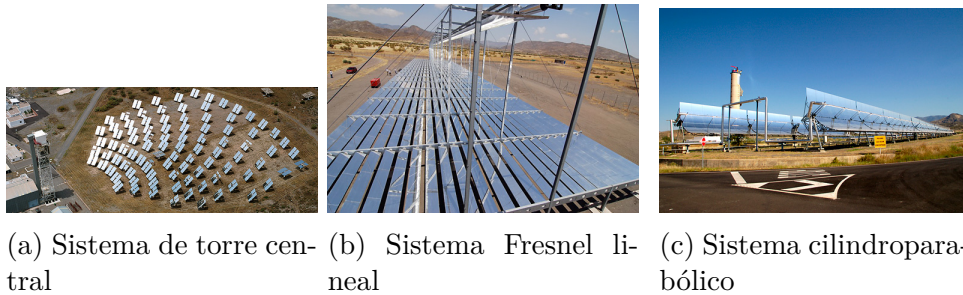


Figura 2.2: Sistemas solares de concentración instalados en la PSA [14].

en lo alto de una torre en el centro de dicho círculo, tal como se puede apreciar en la figura 2.2a. El receptor transmite el calor acumulado a un fluido que desempeña trabajo en un ciclo termodinámico que acaba generando electricidad. Muchas veces trabajan con sales fundidas, que les otorga la capacidad de almacenar energía térmica durante periodos de baja demanda para suministrarla después cuando la producción sea inferior. Lamentablemente, de todas las centrales de este tipo construidas por el mundo, solo una, la *Solar One*⁷, ha podido completar los objetivos de producción y coste asignados; todas las demás han sufrido de rendimientos inferiores a los esperados y costes que imposibilitaban la comerciabilidad [50].

Concentradores Fresnel

Este sistema de concentración está basado en el uso de la ley de refracción para concentrar la luz solar, normalmente mediante el uso de *lentes de fresnel* [50], que se orientan en dos ejes [28]. Estas lentes, producto de aproximar una lente equivalente a trozos rectos, son un conjunto de prismas de geometría radial con foco común capaces de concentrar la luz de la misma manera que una sola lente pero a una fracción de su peso [50] (figura 2.2b.). Es por esto y por sus dimensiones reducidas por lo que son comúnmente utilizadas en la tecnología de concentración fotovoltaica [28]. En el caso de concentración térmica, la luz concentrada es fijada sobre un receptor invertido donde calienta un fluido de trabajo (el más utilizado es el agua) que pasa a generar electricidad gracias a una turbina de vapor de Rankine [38, 44, 45].

Concentradores cilindro-parabólicos

El colector más utilizado a escala mundial [28]; la superficie reflectora

⁷Central situada en el desierto de Mojave, EE.UU. Operó de 1982 a 1986 y después fue mejorada a *Solar Two* (1995-1999) al añadir más espejos [19].

es en este caso una parábola bidimensional alargada de tal forma que proporciona un foco lineal, sobre el cual se colocan tubos receptores de calor, que transportan un fluido de trabajo que después es utilizado para accionar un motor y generar electricidad (figura 2.2c). Son capaces de almacenar energía, durante un tiempo, almacenando el fluido caliente, y de cogeneración. Típicamente pueden operar hasta los 450°C. El seguimiento suele ser en un eje y en el eje norte-sur [38, 44, 45]. Al disponer de foco lineal, el valor de *concentración media máxima*⁸ es un cuarto del máximo teórico [50].

Discos parabólicos

La tecnología de discos Stirling se encuentra dentro de esta subcategoría que aplica captadores solares parabólicos rotados sobre su eje de simetría con tal de obtener un cuerpo tridimensional con un único punto focal por revolución sobre el cual concentrar la energía solar. Los materiales, forma y funcionamiento del captador están explicados en detalle en la subsección *Paraboloide* de la sección *Tecnología*, (sección 2.6.2) en este mismo capítulo. Sobre este punto focal se coloca un receptor que transfiere el calor recibido a un fluido de trabajo. Aunque es común el uso de motores Stirling en este tipo de concentradores debido a su alto rendimiento a las altas temperaturas que es capaz de proporcionar este sistema (con un máximo teórico de 4900 K correspondiente a un 70 % de la temperatura de la superficie solar [50]), también se pueden utilizar turbinas u otros tipos de motores y ciclos termodinámicos.

A efecto de poder comparar la eficiencia de los diferentes tipos de colectores, se incluye el cuadro 2.1, donde se pueden observar datos experimentales de eficiencias obtenidos para diferentes tipos de seguimiento.

2.5. Oferta comercial

La generación de energía eléctrica renovable mediante el uso de la tecnología basada en los discos Stirling tiene actualmente dificultades para introducirse en el mercado, debido en gran parte a la fuerte competencia que ofrecen otras soluciones energéticas, en especial las fotovoltaicas, que proporcionan un perfil de generación similar a costes menores. Tal situación se ejemplariza claramente en el cierre de compañías como *Stirling Energy Systems* o *Infinia*, la tecnología de esta última siendo adquirida por parte de *Qnergy*, o el

⁸Este término se explicará en más detalle en la sección 2.6.2, pero es una medida de la capacidad que tiene el captador de concentrar la radiación solar.

Tipo	Orientación	Eficiencia anual relativa
1 eje	Eje horizontal N-S	1.17
	Eje horizontal E-O	1.13
	Eje polar	1.4
2 ejes	Seguimiento continuo	1.45

Cuadro 2.1: Eficiencias relativas para distintos métodos de seguimiento solar [40].

anterior fracaso de *Stirling Energy Systems* y *Tessera Solar* en completar sus proyectos *Calico Solar Project* e *Imperial Valley*, adquiridos por sendas empresas fotovoltaicas, aunque es necesario remarcar que los proyectos fueron obstaculizados por temas ajenos a la tecnología de disco Stirling, tales como disputas sobre el terreno a explotar y problemas de financiación [34].

Sin embargo el interés por este sistema no está muerto, como se puede observar en proyectos tales como el llevado a cabo por la empresa Sueca *Cleanergy* en Dubái, donde está construyendo un parque de discos Stirling a modo de experiencia piloto para verificar su viabilidad [42]. De un modo más modesto, también se ha estudiado su uso para proporcionar energía a partes rurales de la India cuando la conexión directa a la red nacional resulta demasiado cara [71]. Estos estudios han concluido que se trata de una alternativa viable.

En España, seis discos de 10 kWe de tecnología de membrana tensada en la *PSA*⁹ han acumulado 40000 horas de funcionamiento y son los únicos a nivel mundial que han superado los ensayos de durabilidad y posibilidades de implantación [50], aunque esta tecnología ha sido reemplazada en nuevos modelos por moldes y material ‘*composite*’ [14]. En este mismo emplazamiento se dispone de discos *DISTAL I* (figura 2.3a), *DISTAL II* (figura 2.3b) y *EU-RODISH* (figura 2.3c), pudiéndose apreciar una clara evolución tecnológica de un diseño al siguiente, con el *DISTAL I* (1992) ofreciendo 40 kWt, 9 kWe y una capacidad de concentración de 12000 soles, ascendiendo a 50 kW, 10 kWe y 16000 soles con el *DISTAL II* (1996) [14], superado por las prestaciones del *EURODISH* (1999) [10], con una capacidad de 9 kWe y capaz de alcanzar los 650°C [67].

Y es que esta tecnología cuenta con el mayor potencial de eficiencia de

⁹Plataforma solar de Almería, un centro público de I+D tecnológico español, el mayor y más completo a nivel mundial en cuanto a sistemas termosolares de concentración [13].

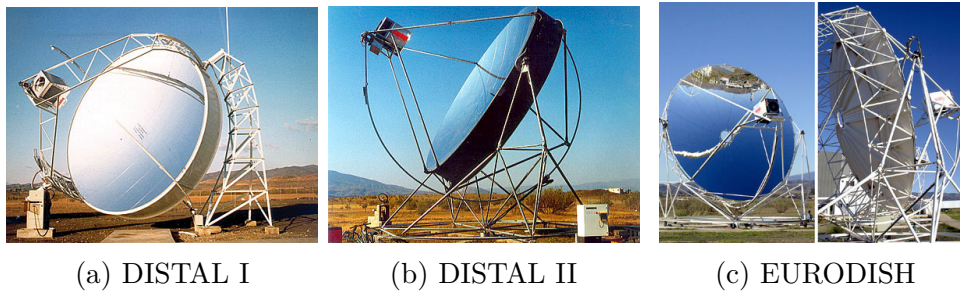


Figura 2.3: Discos Stirling instalados en la PSA [14].

conversión de energía solar a energía eléctrica del mercado, hasta un 32 % comparado con el 15 % o 16 % ofrecido por otras soluciones térmicas como las centrales solares de torre central o concentradores solares parabólicos lineales, aunque no se espera que supere el 25 % [35]. Este hecho, junto a un sistema modular que a la vez permite realizar instalaciones a la escala idónea para cada situación y actuar como un método de prevención de fallos, ya que un error en un modulo no afecta al resto. Este aspecto modular lo comparte con la tecnología fotovoltaica, su mayor adversario a día de hoy, aunque sí que poseer algunas ventajas sobre esta, como una menor sensibilidad a altas temperaturas ambientales (especialmente relevante en proyectos como el mencionado anteriormente en Dubái) y el seguimiento solar, que proporciona de una cobertura optima durante todo el día y por lo tanto una producción energética más homogénea y elevada comparada con soluciones fijas que presentan un pico al mediodía y una generación menos elevada durante el resto del tiempo. Sin embargo, la mayor ventaja que presenta sobre su competidor es la capacidad de cogenerar un suministro de agua caliente, lo que lo hace adecuado para instalaciones en edificios y aporta mucha más versatilidad.

Por su parte, la tecnología fotovoltaica no suele disponer de partes móviles, lo cual minimiza su mantenimiento, convierte la energía solar directamente a eléctrica, sin tener en cuenta la limitación impuesta por el *rendimiento de Carnot*, su cota de estimulación es muy bajo, por lo que es capaz de producir energía con radiación mínima y aprovecha la radiación difusa [33].

Comparado con otros sistemas de concentración solar, el disco Stirling carece de un sistema de almacenamiento de energía a gran escala, lo que otra vez hace que se comporte de manera similar a las fotovoltaicas. Sin embargo, se están ideando maneras de almacenar energía extra producida durante las horas de máximo rendimiento para poder suministrarla durante periodos de menor potencia, basadas en el calentamiento de sales (para soluciones con calentamiento de un fluido intermedio) o el almacenamiento de aire comprimido que después se puede liberar para accionar turbinas y recuperar parte

de la energía almacenada (aplicable a todas las soluciones solares) [82].

Las esperanzas en la tecnología de discos Stirling como solución competitiva parecen estar basadas en un abaratamiento de los costes debidos a la producción en masa y un avance de las tecnologías colaterales, lo cual permitiría que compitiera con la tecnología fotovoltaica, que dispone de subsidios y frente a la cual dispone de amplias ventajas medioambientales, en precio [74].

Puede que el panorama para las fuentes renovables en general no parezca muy prometedor, sobre todo para las de nueva generación, tales como la solar o la eólica, que tras más de 20 años de subvenciones solo cubren un 3.35 % de la producción eléctrica en los EE.UU., la solar contribuyendo un 0.16 % de la energía generada, de un valor de 102.7 EJ [72]. Sin embargo, cabe recordar que toda transición energética ha empezado de esta manera, abarcando un marco de entre 50 y 60 años y que los EE.UU. están en medio de otra transición, del carbón y el petróleo hacia el gas natural [72].

Son muchos los obstáculos que se deben afrontar para conseguir una transición rápida a fuentes de energía renovables, que se antojan más exigentes que otros recursos lo han sido en el pasado al realizar cambios de combustible. El principal problema es la escala, el simple volumen de generación energética que debe reemplazar es simplemente abrumador, 20 veces mayor al que se tuvo que enfrentar el carbón cuando desplazaba a la madera [72]. El segundo gran problema es inherente al funcionamiento de las nuevas renovables¹⁰, muy irregular al depender de factores como la irradiación solar o el viento, lo que a su vez conlleva a un nuevo planteamiento de toda la estructura energética e inversiones mucho más altas al sustituir no solo las centrales de hoy en día, sino también su organización e infraestructura existente [46, 72].

2.6. Tecnología

2.6.1. Motor Stirling

El motor Stirling es un motor térmico de combustión externa patentado en 1817 por Robert Stirling¹¹ [8].

Como cualquier motor, presenta una serie de ventajas y desventajas que hacen que sea más o menos adecuado para según qué trabajos. A continuación se enunciarán las principales [41, 52].

¹⁰Por nuevas renovables se entiende la solar y la eólica, en contraposición con las renovables tradicionales, tales como la hidráulica

¹¹Reverendo Doctor Robert Stirling (1790-1878), nacido en Methven, Perthshire, Escocia, fue ministro de la Iglesia de Escocia e ingeniero [18].

- Poseen la máxima eficiencia potencial posible para un motor térmico operando bajo las mismas condiciones.
- Al tratarse de un motor de combustión externa, puede utilizar una amplia variedad de fuentes de energía, como la biomasa, energía solar, calor residual y combustibles fósiles.
- Es relativamente silencioso y causa pocas vibraciones.
- Los motores Stirling de pistón libre son muy fiables.
- Pueden ser utilizados tanto como refrigerador como bomba de calor.
- Poseen la mayor cantidad de trabajo específico para cualquier ciclo regenerativo cerrado.
- Su vida útil es larga en comparación con otros motores.
- Suelen tener asociado un coste alto.
- Sufren un tiempo de respuesta lento a incrementos o decrementos de carga.
- Su trabajo específico es bajo por lo que su uso en medios de transporte es limitado debido al peso y volumen adicionales que requieren.
- Es problemático mantener la estanqueidad para motores Stirling cinemáticos con hidrógeno o helio como fluido de trabajo.

Debido a sus características, no es un motor de uso general, sino más bien se encuentra especialmente adaptado para cubrir necesidades específicas donde su funcionamiento es mejor que el de el resto de motores. Un claro ejemplo sería el del disco Stirling. Su habilidad de poder utilizar la radiación solar como fuente de combustible es la propiedad más importante en este aspecto, así como su alto rendimiento. Existen otros usos para la tecnología; NASA está interesada en la tecnología de motor Stirling de pistón libre para el desarrollo de *unidades Stirling de calor de radioisótopos*¹², que podría ser útil para la generación de energía en la exploración espacial [16]. El objetivo del proyecto es utilizar el motor Stirling para aumentar la eficiencia de la unidad de calor de radioisótopos al conseguir la misma potencia mediante el nuevo sistema utilizando un 25 % menos de *plutonio-238* [31]. El encargo

¹²Una *unidad de calor de radioisótopos* es un dispositivo que genera calor a partir de la descomposición radioactiva. Al añadir un motor Stirling que aproveche este calor se convierte en una *unidad Stirling de calor de radioisótopos*

del *conversor avanzado Stirling* a ser utilizado en el sistema corre a nombre de la empresa *SUNPOWER* [20]. Otras aplicaciones serían el suministro de energía eléctrica y térmica en ambientes donde no se disponga de conexión a la red o el coste de repostar sea demasiado alto (es el caso de campamentos aislados u operaciones militares) [20].

Tomando prestada la definición de un motor Stirling de W.Martini (1983) [52], este es aquel motor...

- cuyo fluido de trabajo está contenido en un cuerpo a una presión casi común para cada instante dentro del ciclo.
- cuyo fluido de trabajo es manipulado tal que generalmente es comprimido en la porción fría del motor y expandido generalmente en la porción caliente del mismo.
- la transferencia del fluido de trabajo desde el volumen frío al caliente del cual es realizado mediante la modificación de las fronteras del fluido sin el uso de válvulas o bombas reales. El flujo de el fluido expandido caliente hacia la zona fría se realiza de manera análoga.
- que admite un regenerador con tal de aumentar la eficiencia.

Existen tres tipos básicos de motor Stirling, los llamados *alfa*, *beta* y *gamma*:

Motor Stirling de tipo alfa

Se caracteriza por el uso de dos pistones para transferir el fluido de la zona caliente a la fría y viceversa, encontrándose un regenerador en serie entre ellos; los otros dos tipos utilizan un pistón y un desplazador [52]. Suele aplicarse solo en motores grandes donde un peso ligero no sea un factor decisivo, donde se desee la mayor libertad de diseño del sistema de transmisión que aporta el diseño con dos cilindros o donde se busque facilidad en la construcción y montaje [29]. Al disponer de pistones en ambos extremos, surgen problemas de estanqueidad en el foco caliente. Ver figura 2.4.

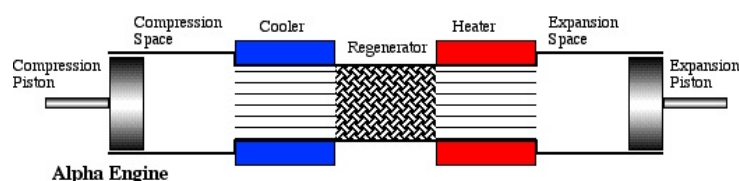


Figura 2.4: Esquema de un motor Stirling de tipo alfa [12].

Motor Stirling de tipo beta

En este esquema, solo trabaja un pistón, que lo hace a baja temperatura, por lo que se elimina el problema de estanqueidad presente en el tipo alpha [29]. Su funcionamiento es de cilindro único, al contrario que el tipo gamma, lo que le permite reducir las vibraciones y dimensiones, reduciendo a su vez el *volumen muerto*¹³. El desplazador no ejerce ningún tipo de trabajo sobre el sistema, pero es imprescindible para mover el fluido de trabajo de un foco a otro. Ver figura 2.5.

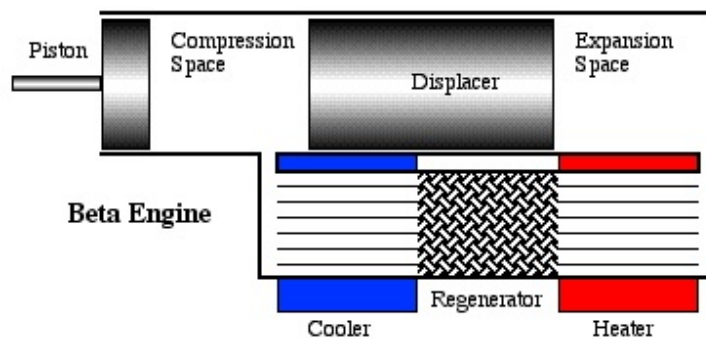


Figura 2.5: Esquema de un motor Stirling de tipo beta [12].

Motor Stirling de tipo gamma

Comparte las ventajas de tener un solo pistón del tipo beta, con la diferencia de que el desplazador y el pistón están situados en cilindros diferentes, lo cual empeora el ratio de compresión pero permite un montaje mecánico más sencillo [52]. Ver figura 2.6.

Existe una segunda clasificación para los motores Stirling, según el tipo de conexión existente entre el pistón y desplazador con el resto del sistema.

Motores Stirling cinemáticos

Son los motores Stirling tradicionales. El sincronismo de sus pistones o sistema pistón-desplazador está asegurado mediante conexiones mecánicas y normalmente utilizan una rueda inercial para almacenar y suministrar trabajo en los puntos del ciclo termodinámico en los que sea adecuado. Ver figura 2.7. Debido a la conexión mecánica de sus partes internas con la salida, es más fácil controlar la velocidad a la que trabaja el motor.

¹³El *volumen muerto* de un motor es aquel volumen que permanece inalterado durante el ciclo de funcionamiento.

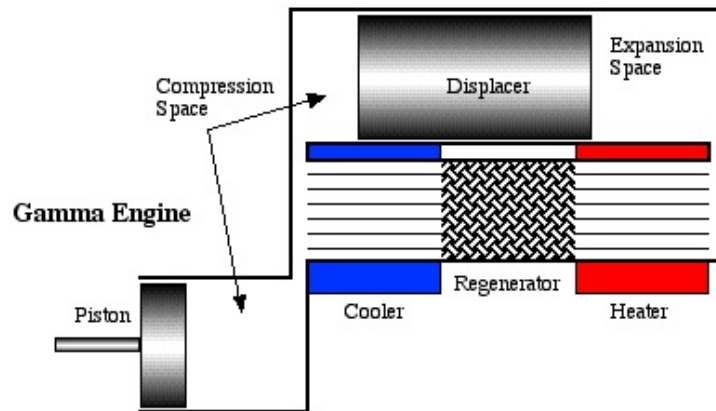


Figura 2.6: Esquema de un motor Stirling de tipo gamma [12].

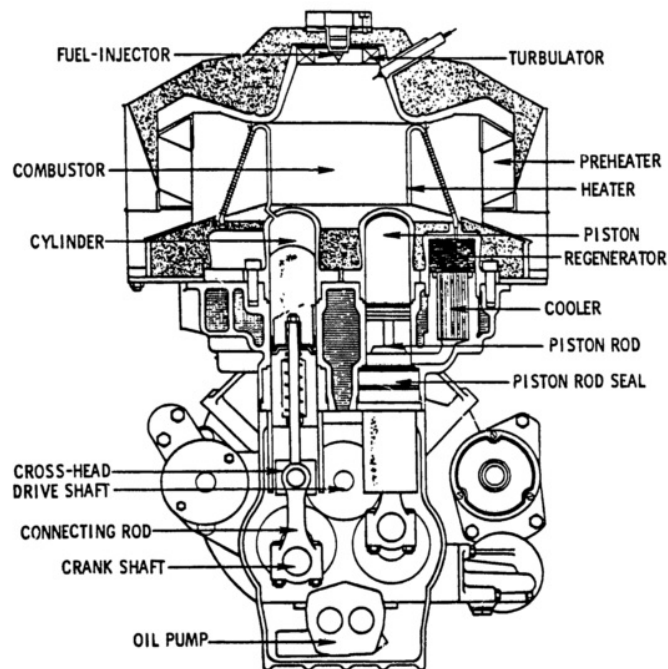


Figura 2.7: Ejemplo de un motor Stirling cinemático [52].

Motores Stirling de pistón libre

Ideados por William Beale en la universidad de Ohio a finales de los años sesenta antes de fundar la compañía *Sunpower*, están basados en la utilización de un alternador lineal para la generación eléctrica una vez retirado el sistema mecánico que impulsa los pistones / desplazadores [12]. Así pues, se consigue un motor herméticamente cerrado.

El pistón de este tipo de motor no está conectado al exterior, sino que oscila entre el fluido de trabajo y un muelle, a menudo otro gas [75]. El desplazador es permitido oscilar libremente contra gas o muelles y el sistema de masa y muelles controla la frecuencia y sincronismo entre el desplazador y el pistón [41]. La generación eléctrica es conseguida al añadir un imán al pistón y hacer que se mueva a través de un bobinado [41]. Ver figura 2.8.

Las grandes ventajas que este sistema ofrece son una reducción masiva de partes móviles, ningún sellado dinámico,¹⁴ no se requiere lubricación [75]. Gracias a estas características, este tipo de motor Stirling poseen una vida útil más larga, menor coste económico y un mantenimiento reducido en comparación con los cinemáticos [41].

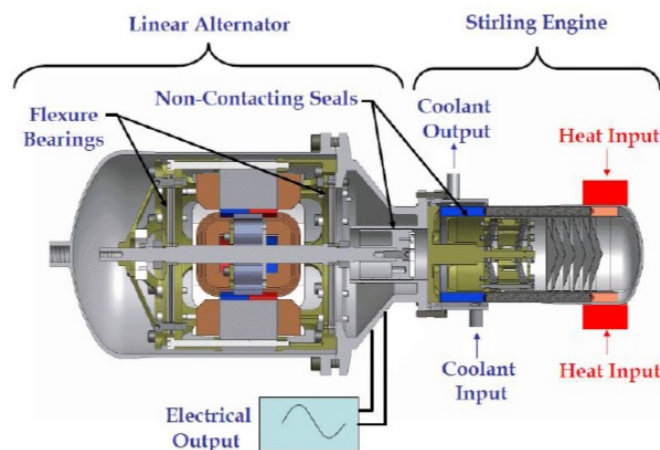


Figura 2.8: Ejemplo de un motor Stirling con pistón libre [73].

Otro parámetro de importancia es el fluido de trabajo, elección que alterará el comportamiento del ciclo termodinámico. Es habitual tener en cuenta los siguientes cuatro parámetros a la hora de decidir que fluido utilizar [69].

Capacidad calorífica: Modificará directamente el comportamiento termodinámico en las fases isocóricas. Suelen interesar valores elevados para un intercambio de calor más rápido.

Seguridad: Es conveniente no utilizar fluidos que puedan suponer un riesgo en caso de falla del sistema.

¹⁴Por sellado dinámico se entiende un sellado en el que los elementos que conforman el sello pueden poseer velocidad relativa los unos con los otros.

Coste: Como en toda elección de materiales, es importante escoger aquel que proporcione la mejor relación calidad-precio para su propósito.

Reactividad química: De utilizar un fluido que pueda reaccionar con los componentes del sistema es previsible que el funcionamiento del mismo se vea comprometido.

El helio es una buena elección, al ser el segundo gas con mayor capacidad calorífica, después del hidrógeno, pero sin su alta reactividad explosiva con el oxígeno atmosférico, aunque sea más caro que otras opciones, como el nitrógeno, cuya capacidad calorífica es muy inferior [69].

El uso de fluidos de trabajo líquidos en motores Stirling no es muy común, pero es posible, como demostró John Malone en 1931 al utilizar agua por encima del punto crítico como fluido de trabajo [29]. Aunque es verdad que ofrecen algunas ventajas sobre los gases, como una mayor conductividad térmica, mejor estanqueidad, autolubricación y autopresurización, las elevadas presiones a las que opera exigen un motor mucho más pesado y grueso, pistones largos y delgados para evitar pérdidas térmicas y su funcionamiento lento [29] no les ha permitido encontrar un sitio prominente en el mercado aún.

Es posible controlar la potencia de un motor Stirling de varias maneras. Las cinco principales son las siguientes [29]:

- Mediante la variación de la temperatura del foco caliente, por ejemplo desajustando la alineación de un disco Stirling con el sol. Es la más sencilla pero es una forma lenta de proceder y al bajar la temperatura se hiere el rendimiento del motor.
- Variando la presión interna mediante un circuito de válvulas. Al aumentar la presión se disminuye la velocidad y se aumenta el par.
- Mediante la variación del volumen muerto del motor, también con un sistema de válvulas. Su utilidad es hacer que la relación de compresión disminuya, pero añade peso y volumen al motor.
- Variando el ángulo de fase entre el sistema pistón-desplazador o pistón-pistón en discos cinemáticos es posible reducir la potencia generada hasta hacerla nula o incluso invertirla.
- Variando la carrera del pistón. Es aplicable para motores Stirling de pistón libre. Cambia la relación de compresión y el volumen muerto.

Con el objetivo de ilustrar el funcionamiento de un motor Stirling, se explicará paso a paso un ciclo de un motor Stirling tipo alfa [29] como el mostrado en la figura 2.4 mediante un esquema temporal de la configuración de los pistones ilustrado en la figura 2.9. Es recomendable observar el gráfico de la figura 2.10 para cada paso.

1. En la primera etapa del ciclo, todo el fluido de trabajo se encuentra en el foco frío.
1 \rightarrow 2 Se comprime el volumen del foco frío isotérmicamente. Si no se empieza desde el sistema en reposo, este proceso suele llevarse a cabo por una rueda de inercia en el caso de los motores cinemáticos, que almacenan en ella trabajo de la fase de expansión para ser reutilizada en esta etapa [70]. En caso de comenzar desde parada, se debe suministrar energía al motor para su arranque. En este proceso se extrae calor.
2. El fluido de trabajo se encuentra ahora a un volumen mínimo, pero aún en la cámara fría, puesto que el volumen del foco caliente continua siendo mínimo.
2 \rightarrow 3 El fluido fluye entonces de la cámara fría a la caliente de forma isocórica, pasando por el regenerador que le aporta el calor necesario para alcanzar la temperatura del foco caliente.
3. Se produce la misma situación que en la etapa 2, pero con las cámaras invertidas.
3 \rightarrow 4 Se produce una expansión isotérmica del fluido de trabajo, por lo que se absorbe calor de la fuente caliente y se realiza trabajo de expansión.
4. El volumen de la cámara caliente y fluido de trabajo se encuentran al máximo y la cámara fría a mínimo.
4 \rightarrow 1 El fluido se mueve de la cámara caliente a la fría de forma isocórica, pasando por el regenerador y cediéndole calor tal que entra en la fría a una temperatura próxima a la del foco. En el caso ideal, el calor cedido en este paso es idéntico al recibido en el paso 2 \rightarrow 3.

En el caso de motores Stirling cinemáticos, la sincronización de los pistones o sistema pistón-desplazador se suele realizar mediante juegos de engranajes o otro tipo de fijaciones mecánicas. Un ejemplo de un sistema de este tipo puede ser observado en la figura 2.11.

Los motores Stirling necesitan regeneradores muy efectivos¹⁵ para man-

¹⁵La efectividad de un regenerador se entiende como el cociente entre la diferencia de temperatura de los focos frío y caliente respecto la temperatura del fluido que sale del regenerador, en valor absoluto.

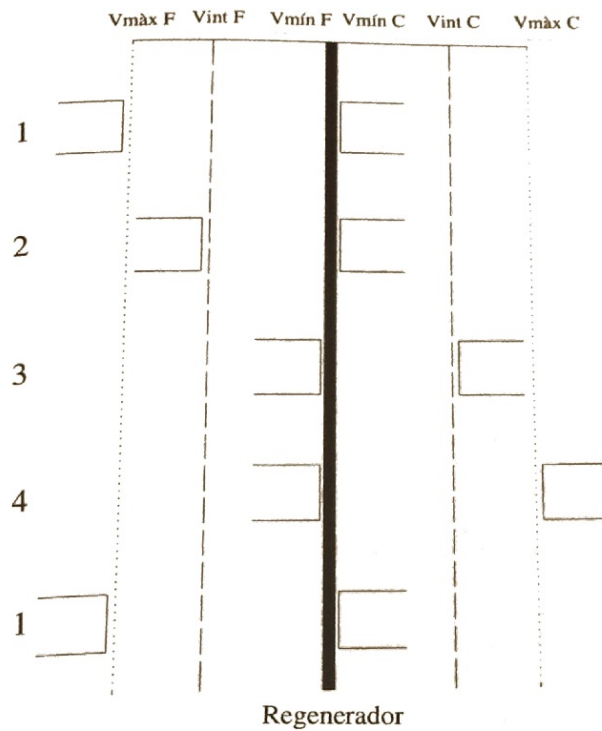


Figura 2.9: Esquema del funcionamiento de un motor Stirling de tipo alfa. El eje vertical representa el tiempo, con números indicando cada uno de los estados. A la izquierda se tiene el foco frío y a la derecha, el caliente [29].

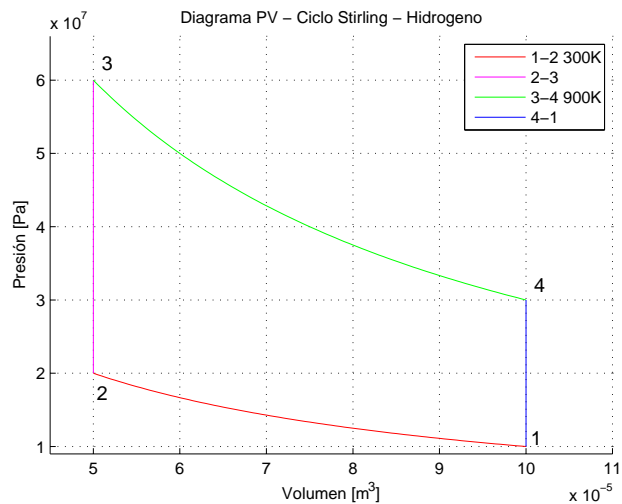


Figura 2.10: Diagrama PV de un ciclo Stirling ideal.

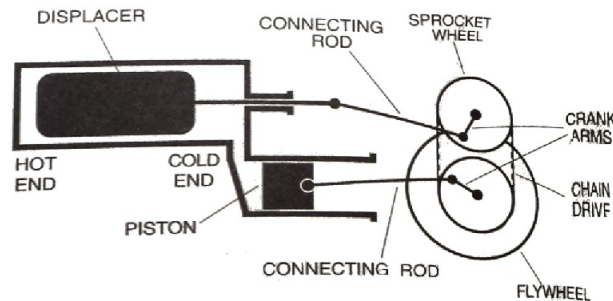


Figura 2.11: Motor Stirling de tipo gamma con sistema pistón-desplazador sincronizado mecánicamente [70].

tener una buena eficiencia, tal como se muestra en la figura 2.12. La misión de este regenerador es la de producir el salto térmico entre los dos focos sin aportación exterior de energía. EL calor que acumula durante el tránsito del fluido de la cámara de expansión a la de compresión es devuelto al fluido en su viaje de retorno tal que en un caso ideal se produce un reciclaje energético perfecto [29].

El funcionamiento de un motor Stirling presenta la mejor eficiencia potencial posible.

Teorema de comparación Stirling

De todos los motores térmicos cíclicos trabajando entre los mismos extremos de temperatura, y teniendo los mismos extremos de volumen, la misma masa de gas ideal, la misma constante de presión de búfer, y mecanismos con efectividad E o menor, el motor Stirling ideal con un mecanismo de constante de efectividad E tiene la máxima eficiencia mecánica. [70]

La eficiencia de un motor térmico está definida como el cociente entre el trabajo neto desarrollado por este y la cantidad de calor que le ha sido suministrado, tal que

$$\eta = \frac{\text{Trabajo neto}}{\text{Calor suministrado}} \quad (2.2)$$

A continuación se procederá a calcular la eficiencia de un ciclo Stirling genérico, como el mostrado en la figura 2.10. Se asume un comportamiento

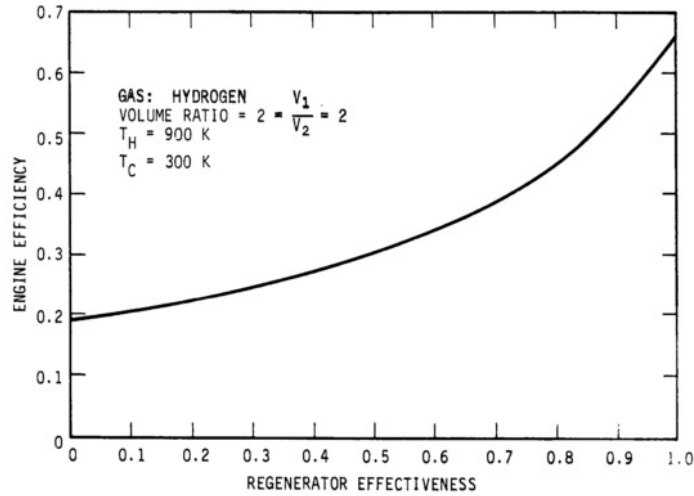


Figura 2.12: Gráfico de la eficiencia de un motor Stirling contra la efectividad del regenerador [52].

ideal del gas y regenerador en todo el cálculo. Se calcula el trabajo inyectado al ciclo durante el tramo $1 \rightarrow 2$. Si el incremento de trabajo es

$$dW = PdV \quad (2.3)$$

donde W es el trabajo, P es la presión del gas y V su volumen y según la *ley de Boyle*¹⁶ a temperatura constante el producto entre el volumen y la presión se mantiene constante:

$$P_1V_1 = k = cnt \quad (2.4)$$

por lo que es posible substituir P

$$P = \frac{k}{V} \quad (2.5)$$

al integrar se obtiene el trabajo de compresión

$$W_{compresión} = k \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = k \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (2.6)$$

¹⁶ Así llamada en honor a Robert Boyle (1627-1691), quien la publicó en la segunda edición de su libro *New Experiments Physico-Mechanicall, Touching the Spring of the Air*, 1662 [80].

La presión absoluta ejercida por una masa dada de gas ideal es inversamente proporcional al volumen que ocupa si la temperatura y la cantidad de gas permanecen constantes dentro de un sistema cerrado.

Utilizando la *ley de los gases ideales*, el valor de k es equivalente al de nRT , donde n es el número de moles de gas, T la temperatura del cambio isotérmico y R la *constante universal de los gases ideales*, de valor $8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$:

$$W_{\text{compresión}} = nRT_{1,2} \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (2.7)$$

El calor que debe recibir ahora el gas del regenerador ($2 \rightarrow 3$) es

$$Q_{2 \rightarrow 3} = n \cdot cv(T_3 - T_2) \quad (2.8)$$

donde T_i es la temperatura del gas en el estado i y cv es el coeficiente de calor específico a volumen constante; depende del fluido.

El proceso $3 \rightarrow 4$ se rige por la misma dinámica que la compresión $1 \rightarrow 2$, tal que

$$W_{\text{expansión}} = nRT_{3,4} \ln \left(\frac{V_4}{V_3} \right) \quad (2.9)$$

Por último, el calor intercambiado durante la transición entre los estados $4 \rightarrow 1$ es de

$$Q_{4 \rightarrow 1} = n \cdot cv(T_1 - T_4) \quad (2.10)$$

Como se ha asumido un regenerador ideal y $T_1 = T_2$, $T_3 = T_4$, el calor intercambiado por el regenerador entre los estados $2 \rightarrow 3$ y $4 \rightarrow 1$ se cancelan el uno al otro.

Por lo tanto, para calcular la eficiencia del ciclo se calcula como

$$\eta = \frac{\text{Trabajo neto}}{\text{Calor suministrado}} \quad (2.11)$$

$$\eta = \frac{W_{\text{compresión}} + W_{\text{expansión}}}{W_{\text{expansión}}} \quad (2.12)$$

$$\eta = \frac{nRT_{1,2} \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) + nRT_{3,4} \ln \left(\frac{V_4}{V_3} \right)}{nRT_{3,4} \ln \left(\frac{V_4}{V_3} \right)} \quad (2.13)$$

Pudiéndose simplificar como

$$\eta = \frac{T_{1,2} - T_{3,4}}{T_{3,4}} \quad (2.14)$$

Obteniendo así la *formula de eficiencia de Carnot* [52], por lo que queda demostrado que la eficiencia límite de un ciclo Stirling es la máxima alcanzable.

2.6.2. Paraboloide

A la hora de idear un concentrador solar, la primera y más fundamental cuestión que surge es la de la forma de dicho concentrador, junto a los materiales a utilizar. En el caso del disco Stirling, el objetivo es el de concentrar la mayor energía posible en un mismo punto, por lo que la elección de una paraboloide para el captador es natural, debido a la propiedad que poseen de reflejar cualquier haz de luz incidente sobre un mismo punto, denominado *foco* de la paraboloide.

Es sencillo llegar a tal conclusión si se tiene en cuenta la geometría de una parábola, que sigue un polinomio de segundo grado, y la ley de la reflexión¹⁷ que indica que el ángulo de incidencia debe ser idéntico al de reflexión. En la práctica, es complicado fabricar una paraboloide perfecta, por lo que se suelen realizar aproximaciones tal que los costes sean razonables, usualmente dividiendo la geometría en piezas más manejables.

Los concentradores solares se suelen catalogar según su poder de concentración, siendo frecuente el uso de la *relación de concentración* en literatura relacionada. Esta relación de concentración, R_c , se define como *el cociente entre la intensidad de radiación solar que incide sobre el área del concentrador proyectada normalmente a la placa absorbente y la intensidad de radiación normal que incide directamente sobre dicha placa*¹⁸; valor que coincide con el cociente entre el área proyectada del sistema óptico, normal al captador, y el área de este si no existen sombras u otras pérdidas de energía [63]. En el cuadro 2.2 se encuentran clasificados diferentes aplicaciones solares según su poder de concentración.

Si se toma θ como el semiángulo formado entre el Sol y la Tierra¹⁹, r como el radio del Sol y R como la distancia entre los dos astros (figura 2.13), tenemos en cuenta que el flujo de energía solar disminuye al cuadrado con la distancia desde el origen y asumimos que no es posible aumentar la concentración más allá de la encontrada en la superficie solar, se obtiene un límite teórico de concentración media máxima de valor $\frac{1}{\sin^2 \theta}$, también conocida como la *ley del seno de la concentración* [28].

$$C_{MAX} = \frac{1}{\sin^2 \theta} \quad (2.15)$$

Es posible clasificar las paraboloides utilizadas en concentradores solares según su *ángulo de borde*, Φ , definido por el ángulo entre el eje de la parábola

¹⁷El tipo de reflexión deseado en este caso es la especular, entendida como reflexión respecto a la superficie media del material, en contraposición a la difusa debida a la rugosidad del material mismo [37].

¹⁸ [63]J. Prieto García (1998), página 73.

¹⁹De valor 0.265° [57]

Flujo [Soles]	Condiciones	Aplicaciones
1-2	Concentrador fijo	Calefacción y refrigeración
2-100	Sin seguimiento / Con seguimiento de foco lineal	Generación / Calefacción y refrigeración
500-10000	Disco o torre con seguimiento	Generación
20000-50000	Horno solar	Materiales, láseres, propulsión espacial
70000-100000	Horno solar especializado	Materiales, láseres, experimentos

Cuadro 2.2: Aplicaciones según su relación de concentración [28].

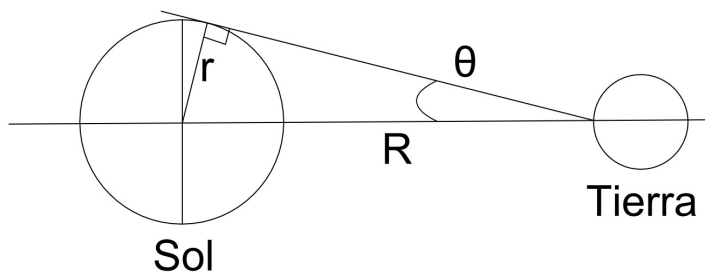


Figura 2.13: Representación gráfica del semiángulo entre la Tierra y el Sol [28].

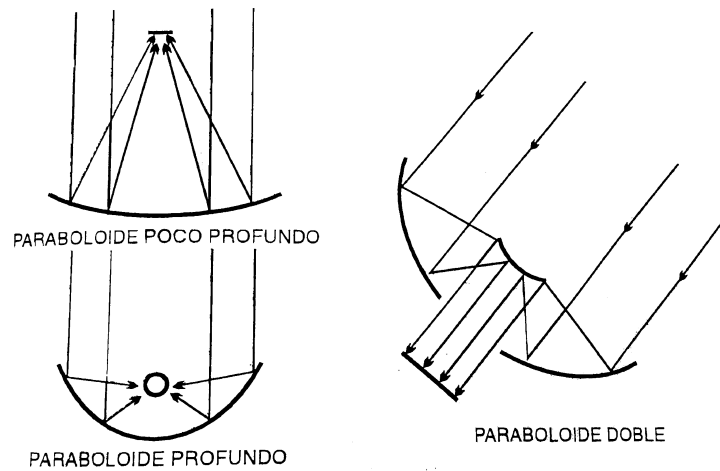


Figura 2.14: Paraboloides según su ángulo de borde [63].

de revolución y la línea que une el borde del espejo y el foco [63]. De este modo se catalogan en paraboloides poco profundos ($\Phi < 90^\circ$) y paraboloides profundos ($\Phi > 90^\circ$) [63]. Los poco profundos necesitan una orientación solar más precisa, pero son capaces de acomodar receptores planos, como también es el caso de los paraboloides dobles [63] (figura 2.14).

En un espejo paraboloide y tomando $\gamma = 0^\circ 32'$ como el valor del ángulo plano del haz de luz solar incidente en el espejo, la relación de concentración se puede aproximar como el cociente entre las áreas de dos círculos de diámetros $2d \sin \Phi$ y $2d \tan \frac{\gamma}{2}$ [63]:

$$Rc = \left[\frac{\sin \Phi}{\tan \frac{\gamma}{2}} \right]^2 \quad (2.16)$$

Materiales

Los materiales empleados para construir las paraboloides de los discos Stirling están sujetas a exigencias muy estrictas y específicas, pues es común que deban soportar condiciones meteorológicas extremas, como las halladas en los desiertos o entornos similares, mientras conservan propiedades clave, tales como una alta reflectividad en el caso de los espejos o una estabilidad estructural adecuada para la armadura.

La elección de materiales siempre es un juego de equilibrio [43] entre:

- La habilidad del material para aguantar las condiciones de servicio.
- Los métodos de conformación.

- El coste de los materiales y de su conformado.

Se trata de equilibrar las propiedades requeridas o deseadas con las limitaciones impuestas, sobre todo en costes; pero si hay un área en específico donde los materiales juegan un papel fundamental, es en el de los espejos de la paraboloide, que debe proporcionar una reflectividad de entre el 90 % y 94 % [36], con un diámetro de entre 3 m y 20-25 m [75]. Los materiales en si varían mucho de fabricante a fabricante, desde una combinación de vidrio y plata a materiales poliméricos capaces de reflejar la radiación solar. En todo caso, los dos factores más importantes es que posean una superficie pulida para reducir la dispersión de la luz y que sean dimensionalmente estables con tal de evitar el deterioro de las propiedades de las imágenes [55]. Debido a la difícil producción de espejos con forma de paraboloide, la forma se suele fragmentar en trozos de geometría más sencilla de fabricar, como varios espejos cuadrados, membranas tensionadas sobre esqueletos parabólicos, matrices de discos más pequeños o una serie de espejos trapezoidales, como se puede observar en la figura 2.15; dependiendo de las capacidades del productor y del material.

Los metales pueden constituir una fuente de sustratos para los espejos, por ejemplo con aluminio pulido electrolíticamente²⁰, como es el caso del *Alzak* (producto comercial), aunque es cierto que al doblar el metal en 2 dimensiones, la calidad óptica sufre [55]. Es por esto que para la elaboración de concentradores paraboloides, se emplean otras técnicas, como la fundición para la obtención de cáscaras, posible en algunos metales, tales como el aluminio y el *Tenzalloy* en concreto, que es capaz de ser pulido ópticamente, proceso difícil en el caso de metales blandos, que incluyen a todos los que tienen alto poder de reflexión, por lo que es conveniente utilizar un recubrimiento de material duro, como el *Kanigen*, a pesar de elevar el costo considerablemente [55].

Como se ha mencionado con anterioridad, también es posible utilizar un sustrato de plástico, con la principal ventaja de posibilitar la construcción de espejos delgados y ligeros, a modo de membrana tensada, aunque este peso reducido se ve en parte compensado por el anillo estructural que mantiene tensado el espejo en sí. [55].

Otra opción son el vidrio o las cerámicas vítreas, estables dimensionalmente y relativamente fáciles de conformar en formas bidimensionales sin dañar la superficie externa, aún a un precio más elevado que un espejo equivalente con sustrato de plástico [55]. La superficie reflectora puede ser la

²⁰Es incluso posible crear espejos directamente con aluminio desnudo, cuyo óxido es relativamente transparente. Es el único metal que se presta a esta aplicación sin un recubrimiento especial [55].

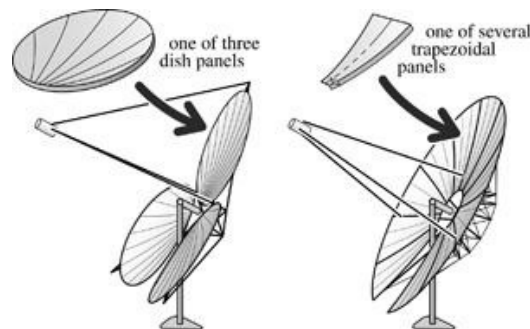


Figura 2.15: Dos ejemplos de las diferentes formas que pueden adoptar los reflectores [24].

externa o la interna, dependiendo de la cual se le aplique un recubrimiento reflectivo. De ser la externa, el espejo es mucho más propenso a sufrir daños y ver mermada su capacidad reflectante, pero si es la segunda cara la que está recubierta, la luz debe pasar por el cuerpo del vidrio, aumentando las pérdidas por absorción, cerca del 5-7 % [55].

Los recubrimientos anteriormente mencionados pueden ser metálicos, como la plata o el aluminio, debidamente protegidos para evitar el óxido y la consecuente pérdida de calidad reflejante (el mejor tipo de espejo de este tipo es el recubierto de plata por la superficie posterior), depositados normalmente al vacío o químicamente. Con tal de proteger la superficie exterior del espejo y aumentar su esperanza de vida, es común utilizar un recubrimiento protector. El más sencillo para el caso de espejos de aluminio es el de una capa de material dieléctrico como el fluoruro de magnesio (MgF_2) o el monóxido de silicio (SiO) [55].

Seguimiento solar

Realizar un buen seguimiento solar es de vital importancia a la hora de maximizar la potencia generada por el disco Stirling. Para ello se emplean combinaciones de GPS y sensores solares. Existen dos métodos principales para orientar el disco hacia el Sol [75]:

Seguimiento acimut-elevación

El disco rota en un plano paralelo a la Tierra y en otro perpendicular a éste.

Seguimiento polar

El disco rota alrededor de un eje paralelo al eje de rotación de la Tierra al mismo ratio de rotación que ella. El segundo eje, de declinación, es perpendicular al eje polar.

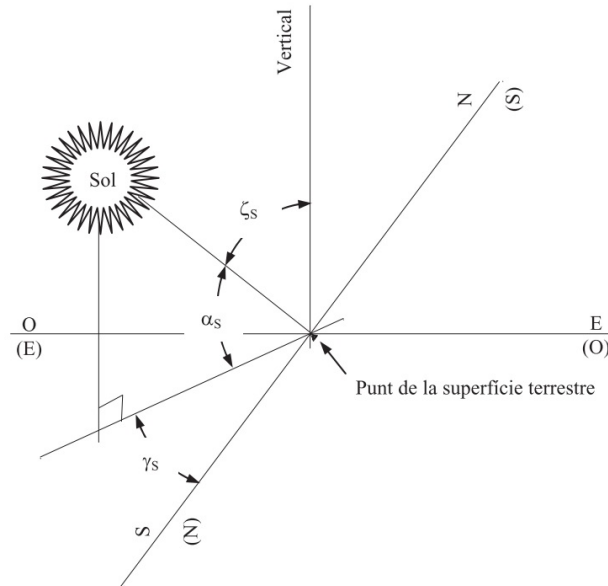


Figura 2.16: Ángulos de elevación (α_s) y acimut (γ_s) [33].

En ambos casos son necesarios dos ejes de rotación para alinear el disco con el Sol, y es que se puede considerar el Sol como un foco puntual que se mueve por la superficie de una esfera celeste, en el centro de la cual se encuentra el punto de interés. Así pues, es común utilizar un marco de referencia acimut-elevación, donde la acimut está definida como el ángulo formado entre la proyección sobre el plano de la recta que une el Sol con el origen y la dirección Sur (Norte en ciertos casos) y la elevación está definida como el ángulo formado entre la recta que une el Sol origen y el plano horizontal [58] (figura 2.16).

Sería posible orientar un disco si se dispone de estos dos valores, deducibles según la localización del punto de interés si se definen otras dos variables [58]:

Ángulo horario ω

Ángulo formado por las proyecciones sobre el plano del ecuador, del meridiano del punto considerado y de la recta que une los centros de la tierra y el Sol en ese instante.

Declinación solar δ

Ángulo formado entre el rayo incidente procedente del Sol y el plano del ecuador.

Sabiendo que la declinación solar se puede calcular mediante la *ecuación de Cooper* para un día n del año [58]:

$$\delta = 23,45^\circ \sin \left[360 \frac{284 + n}{365} \right] \quad (2.17)$$

El ángulo horario es una medida que relaciona el tiempo solar con la posición de la estrella en el cielo. Así pues está definido como 0° en el mediodía solar local²¹ y aumenta 15° por hora [33]. Este valor es fácilmente demostrable al saber que la Tierra completa una rotación sobre su propio eje cada veinticuatro hora, por lo que cada hora debe corresponder a una rotación de $\frac{360}{24} = 15^\circ$. De esta manera una fórmula para calcular el ángulo horario podría ser:

$$\omega = (12\text{h} - \text{Hora solar}) \cdot 15^\circ \quad (2.18)$$

Sin embargo, la hora solar (H_S) y la local (H_L) no siempre concuerdan y pueden haber discrepancias, por lo que se le aplican un seguido de correcciones [33]:

$$H_S = H_L - \epsilon + ET + \frac{1}{15}(L_{REF} - L_{LOC}) \quad (2.19)$$

Donde L_{REF} es la longitud del meridiano de referencia, L_{LOC} la longitud del meridiano local²² (ambos en grados), ϵ es una corrección de horario, de valor -1 para horario de invierno y -2 para horario de verano *para Barcelona*²³ y ET se conoce como *ecuación del tiempo* y se calcula según:

$$ET = 0,0072 \cos C - 0,0528 \cos(2C) - 0,0012 \cos(3C) - 0,1229 \sin C - 0,1565 \sin(2C) - 0,0041 \sin(3C) \quad (2.20)$$

Cuando C , es igual a:

$$C = \frac{2\pi n}{366} \quad (2.21)$$

y por último, n vuelve a ser el día del año.

²¹Hora correspondiente a una acimut igual a cero.

²²La longitud local de Barcelona es $2^\circ 11' 0''$ E [9] y la longitud de referencia es la del *meridiano de Greenwich*, que adopta un valor de 0° .

²³Valores derivados de la diferencia entre el *tiempo universal* y el huso horario de la zona. Barcelona utiliza la *hora central europea*. Para un mapa de los diferentes husos horarios consultar el anexo A

La altura solar α_s para un punto situado en una latitud ϕ ²⁴ para un día n y un ángulo horario ω se puede encontrar mediante la siguiente expresión [58]:

$$\alpha_s = \arcsin(\sin \delta \sin \phi + \cos \phi \cos \omega \cos \delta) \quad (2.22)$$

Y el ángulo acimutal solar γ_s se obtiene mediante [58]:

$$\gamma_s = \arcsin \left(\frac{\sin \omega \cos \delta}{\cos \alpha_s} \right) \quad (2.23)$$

Con estas coordenadas definidas, es posible dibujar lo que se conocen como *diagrama de la trayectoria solar* [50]. Existen dos tipos de diagramas, los denominados diagramas *polares* de trayectoria solar y los *cartesianos*.

En el caso de los diagramas polares, la elevación solar es representada mediante una sucesión de círculos concéntricos, mientras que el acimut corresponde al ángulo del disco [21]. La trayectoria del sol a lo largo del año está contenida entre las trayectorias de los solsticios de verano e invierno. Es una representación cómoda, pues permite ver las direcciones cardinales de manera natural. La figura 2.17 es un ejemplo de dicho diagrama para la ciudad de Barcelona.

Los diagramas cartesianos de la trayectoria solar dibujan la acimut a lo largo del eje de ordenadas mientras que la elevación se dibuja a lo largo del eje de abscisas [21], tal como se puede comprobar en la figura 2.18.

Estructura y soporte

La fijación de los discos sobre el terreno puede ser o mediante un anclaje sobre un edificio, en cuyo caso se utiliza la estructura del mismo para soportar el mecanismo, o pueden ser *autosoportados*, es decir, anclados sobre una zapata de hormigón que les proporcione la estabilidad necesaria [50]. La armadura que mantiene las diferentes partes unidas está sujeta al pie del disco y suele adoptar una de las tres siguientes formas [75]:

Paneles reflectantes como estructura

En este tipo de disco Stirling, los paneles reflectantes en sí son parte de la estructura, de tal forma que están expuestos a deformaciones debidas a tensiones internas; no es un sistema común.

Armadura con membrana

Basada en la utilización de membranas estiradas sobre una estructura a forma de paraboloide. El aparato resultante es muy ligero, el disco

²⁴La latitud de Barcelona es 41°23'0" N [9]

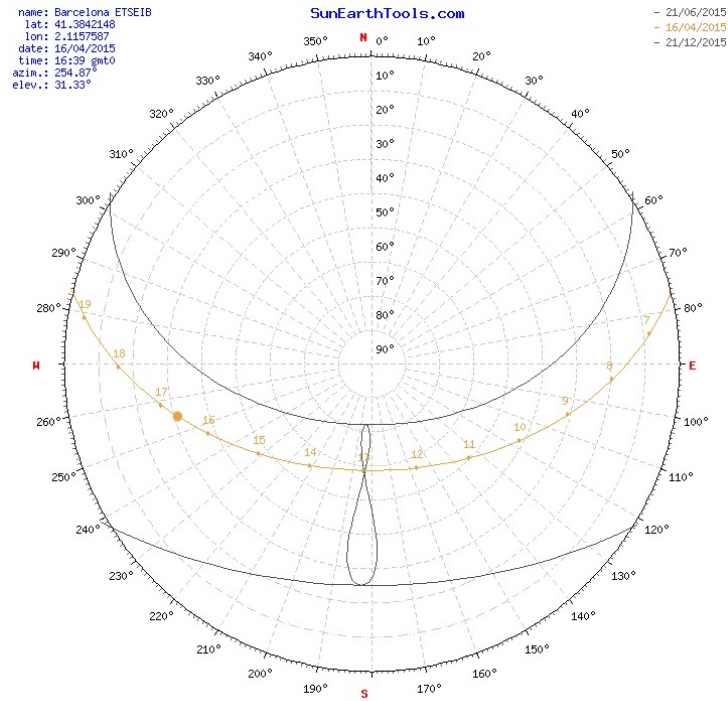


Figura 2.17: Diagrama polar de la trayectoria solar para Barcelona. Nota: esta representación escoge el Norte como acimut de origen [21].

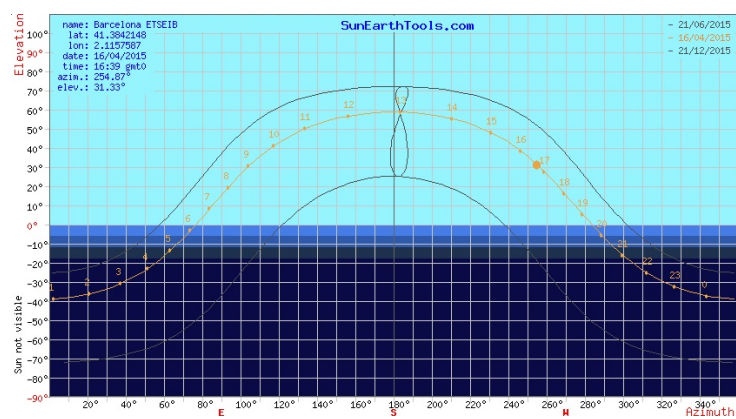


Figura 2.18: Diagrama cartesiano para la trayectoria solar [21]. Corresponde a la misma situación que la figura 2.17.

consta de una sola parte y el mantenimiento es sencillo. También es más difícil de fabricar.

Malla espacial

Consiste en separar los elementos ópticos de los estructurales, de tal forma que se construye una armadura de sujeción que mantiene los diferentes elementos del disco unidos. Es recomendable para sistemas de alta potencia y es robusta y eficiente.

2.6.3. Receptor

El receptor es el elemento del disco Stirling situado adyacente al foco caliente del motor Stirling y cuyo trabajo es el de transferir la energía concentrada del sol al motor.

Existen dos tipos principales de receptores, los externos y los de cavidad interior. Los receptores externos son capaces de aprovechar la radiación solar concentrada de una manera más eficiente al poder recibir los rayos de cualquier dirección gracias a su forma esférica, aunque también comportan mayores pérdidas térmicas que los de cavidad interior.

Los de cavidad interior reciben los rayos solares internamente, como se puede apreciar en la figura 2.19. Este diseño permite reducir las pérdidas por efecto de factores ambientales como podría ser la acumulación de polvo sobre la superficie receptora y sirve para homogeneizar el flujo de energía radiante [65] al disponer de un área de intercambio mayor con el foco caliente del motor, reduciendo así el estrés térmico de los materiales. La temperatura de trabajo suele ser de 800°C [65]. Como inconveniente, recibe menos radiación que el receptor externo.

La elección de materiales para este elemento es crítica, pues suelen ser el que más fatiga térmica de todo el sistema. Suelen escogerse materiales cerámicos [65].

El absorbedor es el elemento encargado de transferir la energía térmica captada por el receptor al fluido de trabajo. Existen dos especies principales, la de reflujo y la de tubos iluminados directamente.

Los absorbedores de reflujo utilizan un sistema intermedio con otro fluido de trabajo e intercambiador de calor para transferir el calor al fluido del motor Stirling. Este tipo de sistema presenta menor sensibilidad a diferencias de irradiación sobre su superficie, es compacto, poseen una capacidad de transmisión de calor muy elevada y son capaces de utilizar diferentes fuentes de energía (útil si se desea un sistema híbrido que pueda utilizar otras fuentes en momentos de producción solar escasa, como podría ser la quema de gas

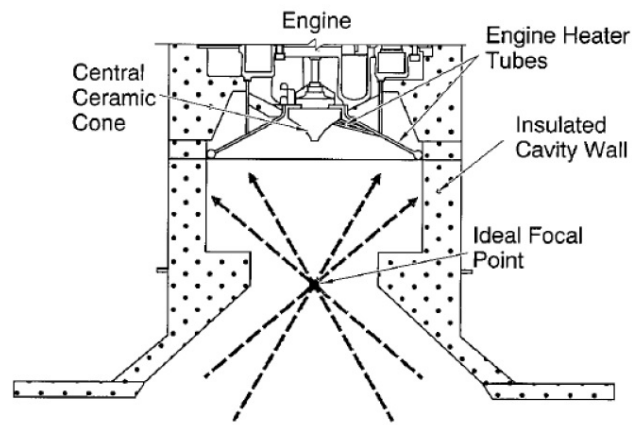


Figura 2.19: Anatomía de un receptor de cavidad interior [75].

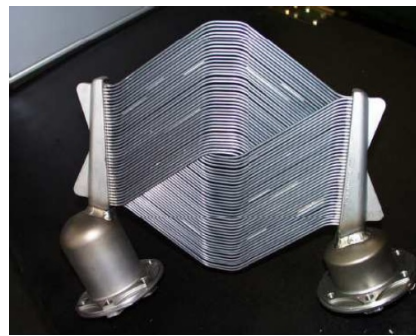


Figura 2.20: Fotografía de un absorbente de tipo de tubos directamente iluminados [66].

natural por la noche) [65]. Sin embargo, debido a su complejidad, aún no se han desarrollado alternativas fiables para su uso en discos Stirling [65].

La solución de tubos directamente iluminados no posee de un sistema intermedio para transferir el calor y transfiere la energía térmica directamente al fluido de trabajo, pues este fluye a través de dichos tubos. En la figura 2.20 es posible observar los tubos por los que circula el fluido de trabajo y los cabezales que van conectados a los cilindros de trabajo del motor.

2.6.4. Refrigerador

El refrigerador es el elemento encargado de mantener la temperatura del foco frío a los niveles necesarios para asegurar un buen funcionamiento del motor Stirling. Es común el uso de un intercambiador de carcasa y tubos con el fluido de trabajo circulando por tubos y un fluido secundario de refrigera-

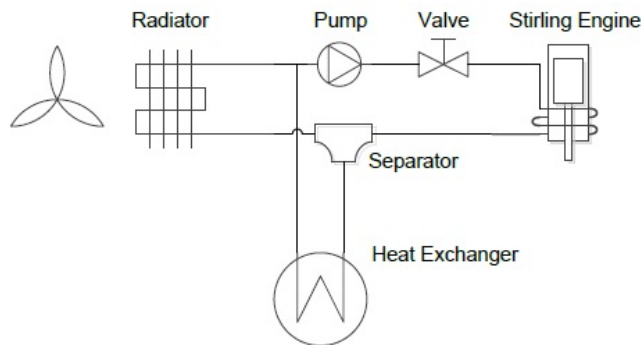


Figura 2.21: Esquema del circuito refrigerador para un disco Stirling de cogeneración.

ción por la carcasa [75].

Este fluido de refrigeración, normalmente agua con una proporción de anticongelante [60], circula por un circuito cerrado donde puede perder el calor acumulado directamente al ambiente mediante el uso de un radiador y ventilador o puede ser utilizado para alimentar un sistema de cogeneración. En este último caso, el radiador y el ventilador se convierten en elementos auxiliares a utilizar en caso de que el líquido a calentar en el sistema de cogeneración ya se encuentre a la temperatura deseada o dejara de funcionar, para permitir la correcta operación del disco (que aún puede producir electricidad).

Suele ser común el uso de una bomba para asegurar el flujo del fluido de refrigeración. Un esquema de un sistema de refrigeración ha sido ilustrado en la figura 2.21. Se trata de un sistema pensado para cogeneración, aunque la única diferencia con un circuito ideado para la producción exclusiva de electricidad por parte del Disco Stirling es la inclusión del intercambiador de calor secundario situado en la parte inferior de la figura.

El uso del disco Stirling como sistema de cogeneración también aporta una reducción de la potencia consumida por el mismo, pues el ventilador para refrigerar el líquido del circuito de refrigeración es normalmente el elemento que consume la fracción más grande de *potencia parásita*²⁵ [41] y al convertirlo en un elemento auxiliar, su uso se ve reducido.

²⁵Por *potencia parásita* se habla de potencias consumidas por el mismo sistema para permitir su funcionamiento, disminuyendo así su potencia de salida final.

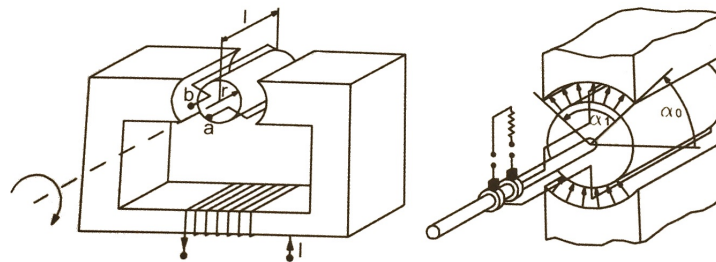


Figura 2.22: Máquina rotativa elemental con circuito magnético usual [64].

2.7. Generación eléctrica

Con tal de convertir la energía cinética del motor Stirling a energía eléctrica, es necesario incorporar un tipo de generador. Existen varios tipos de generador, pero el principio de funcionamiento básico es el mismo; una máquina eléctrica rotativa elemental consiste de una espira de hilo conductor rotando en el interior de un campo magnético [30]. En la figura 2.22 se puede observar un ejemplo de máquina rotativa elemental.

Existen tres grandes grupos en los que se pueden clasificar las máquinas eléctricas:

- Máquinas síncronas.
- Máquinas de corriente continua.
- Máquinas asíncronas o de inducción.

Las máquinas síncronas suelen ser generadores, pues presentan problemas de arranque y estabilidad cuando son usadas como motores; giran a una velocidad constante [30]. Las de corriente continua rectifican las semiondas negativas y buscan proporcionar una tensión lo más constante posible, son muy indicadas para motores [30].

De los tres tipos, las más interesantes como generadores, especialmente para uso en discos Stirling, son las *máquinas de asíncronas o de inducción*, ya que poseen la propiedad de poder empezar a trabajar a la frecuencia de la red [81], ya que la constancia de deslizamiento está garantizada por la central con un generador síncrono [64] o mediante la red. Esto último es debido a que no poseen funcionamiento autónomo, deben obtener la corriente de excitación de una fuente externa [64]. Su principio de funcionamiento es el siguiente: Poseen una espira de rotor en cortocircuito, en la cual se induce una *f.e.m.*²⁶

²⁶Fuerza electromotriz; definida por la cantidad de trabajo por unidad de carga necesaria para un aumento de potencial eléctrico de la carga [49]. Se trata del voltaje inducido.



Figura 2.23: Conversión de una máquina rotativa a una lineal [32].

en ella que hará circular una corriente, en sentido opuesto al de la variación de flujo a su través, por la ley de *Lenz*²⁷, debida a la rotación del campo magnético causado por el movimiento relativo entre rotor y estator [30]. Otros atractivos de este tipo de máquina son su sencillez, al no necesitar dispositivos de arranque, sincronización y regulación y proporcionar potencia completamente activa, lo que resulta en un generador considerablemente más sencillo y barato que el resto de alternativas [64]. Como desventajas, necesita corriente de excitación completamente reactiva [64] cuyo consumo no se puede controlar [81] y existe peligro de embalamiento si la carga se reduce drásticamente [64].

Es posible «desenrollar» una máquina rotativa tal que se obtiene una lineal, tal como se puede observar en la figura 2.23, lo cual es útil en el caso de motores Stirling de pistón libre. Dichas máquinas operan bajo el mismo principio de inducción electromagnética, aunque debido a su geometría, presentan efectos especiales y su diseño y construcción se complican [32].

2.7.1. Distribución eléctrica

La distribución eléctrica de parques solares se presenta muy problemática. Dados volúmenes pequeños, los problemas surgidos de la variabilidad de la radiación solar son despreciables, siendo absorbidos por la red eléctrica existente. Sin embargo, si se progresa hacia un modelo de generación donde este tipo de tecnologías se vuelva más importante, será necesario otro sistema de organización en lo que se refiere a la infraestructura de distribución eléctrica.

Dada su naturaleza, de potencia variable y localización descentralizada, un uso extensivo de las nuevas energías renovables requerirá métodos de almacenamiento de energía y la creación de redes eléctricas inteligentes, que sean capaces de administrar la distribución de electricidad, resultando en un sistema mucho más flexible capaz de asimilar la variabilidad de estas nuevas fuentes [46]. De acuerdo con la *Agencia Internacional de la Energía*:

²⁷Nombrada así en honor a Heinrich Lenz, enuncia que *Si circula una corriente inducida, su dirección será siempre tal que se opondrá al cambio que la produjo*. [68]

*“Una red eléctrica inteligente es una red que utiliza tecnología digital para monitorizar y administrar el transporte de electricidad desde todas las fuentes de generación para cumplir las demandas eléctricas variables de los usuarios finales. Tales redes serán capaces de coordinar las necesidades y capacidades de todos los generadores, operarios de red, usuarios finales y actores del mercado de la electricidad de tal manera que pueda optimizar el uso y operación de activos y, en el proceso, minimizar tanto los costes e impacto ambiental a la vez que se mantiene la fiabilidad, resiliencia y estabilidad.”*²⁸

2.8. Generación térmica

Con tal de aumentar el rendimiento del sistema, es común aprovechar las pérdidas de energía térmica correspondientes a flujos de calor disipados. A este concepto se le conoce como *cogeneración* [30] y es utilizado en toda clase de máquinas térmicas. En el caso de los discos Stirling, cobra especial importancia, pues son capaces de producir más potencia térmica que eléctrica y les colocan por encima de otras tecnologías solares, como la fotovoltaica, para ciertas aplicaciones donde la producción de energía térmica sea demandada.

En el apartado 2.6.4 **Refrigerador** se ha hablado sobre el circuito de refrigeración del motor Stirling. A continuación se explicará en más detalle el sistema al que cede su energía térmica en caso de tratarse de un sistema de cogeneración.

A la hora de diseñar un sistema de distribución del calor cogenerado, se puede optar por uno de dos sistemas para conducir el fluido portador, normalmente agua [33]. Mediante termosifón no es necesario el uso de válvulas, pues el fluido circula por diferencias de temperatura y densidad de manera natural, ahorrando energía. Sin embargo, es necesario que los conductos de circulación sean lo más cortos posible, con diámetro de más de una pulgada y el acumulador debe situarse a una altura de entre 30cm y 70cm por encima de los captadores [33]. Si estas condiciones no se cumplen, es necesario recurrir a la circulación forzada mediante el uso de bombas.

Es posible clasificar los sistemas en abiertos y cerrados. Los abiertos calientan el fluido que será utilizado directamente y presentan el mejor rendimiento coste y sencillez, aunque también acarrearán problemas propios de un sistema abierto, como la corrosión, incrustaciones minerales y peligro de congelación del fluido [33]. Un sistema cerrado elimina estos problemas a cambio de introducir un mayor coste y complejidad estructural.

²⁸ [46]International Energy Agency (2010), página 151, traducido por el autor.

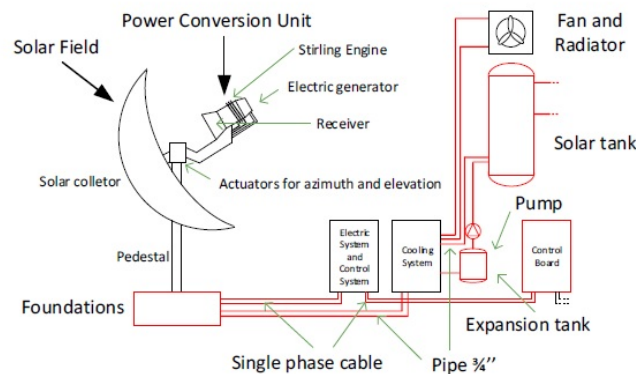


Figura 2.24: Esquema del sistema de cogeneración utilizado en la instalación de Disco Stirling de la ETSEIB UPC.

Aun existiendo muchos tipos de sistemas de cogeneración, todos suelen presentar una serie de elementos comunes y un funcionamiento similar. Para un sistema de ACS²⁹ como el de la figura 2.24, estos son [33]

- Depósito acumulador.
- Conducciones.
- Bombas.
- Válvulas.
- Depósitos de expansión.
- Purgadores.
- Termostatos.

El funcionamiento de este sistema es relativamente sencillo. El fluido a calentar (agua en el caso de ACS) entra en el intercambiador de calor (que puede estar contenido dentro del acumulador), se calienta y retorna al sistema al que suministra. El resto de elementos son de seguridad o permiten que el fluido calorportador del disco Stirling llegue hasta el intercambiador.

El acumulador se encarga de almacenar la energía térmica aportada por el disco Stirling. De contener el intercambiador de calor en su interior, se dice que posee un *intercambiador interno*. Un *intercambiador externo* supone inyectar la energía térmica a la red, sin acumulación previa. Se dimensiona

²⁹Agua Caliente Sanitaria.

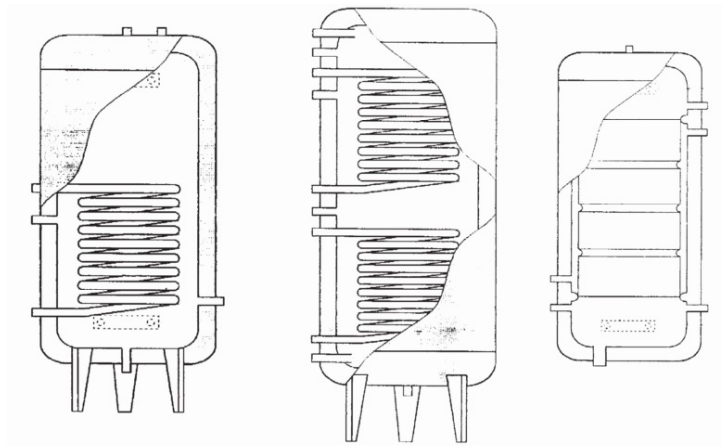


Figura 2.25: Esquema de tres tipos de acumuladores: *Izquierda*: Acumulador con serpentín. *Centro*: Acumulador con doble serpentín. *Derecha*: Acumulador con doble cámara [33].

según las necesidades térmicas de consumo diario para evitar desfases entre la demanda y la oferta instantáneas [60]. Otro método auxiliar para poder satisfacer la demanda térmica consiste en la instalación de resistencias eléctricas en el acumulador con tal de generar el calor demandado si este no pudiera ser satisfecho por la producción del disco Stirling [33]. En el caso de contener un intercambiador de calor, este suele adoptar la forma de un serpentín, un doble serpentín o sistema de camisa donde dos cámaras envuelven el depósito acumulador [33], tal como se ha ilustrado en la figura 2.25.

La función de las bombas de circulación es la de asegurar el flujo del líquido calorportador y compensar las pérdidas de carga debidas al resto de elementos, por lo que sus características dependerán del conjunto del sistema, sobre todo de la longitud de las conducciones.

El funcionamiento de las bombas viene dirigido por un sistema de control que obtiene datos sobre la temperatura del fluido gracias al uso de termostatos diferenciales. Gracias a esta información, la bomba puede encenderse e impulsar el fluido calorportador hacia el acumulador cuando este pueda ser calentado, o apagarse cuando no se genere energía térmica suficiente como para alimentarlo [60]. Suelen estar compuestos por dos sondas, una situada cerca de la fuente de fluido caliente y otra en el acumulador con tal de poder leer diferenciales de temperatura [60].

Las válvulas permiten un control preciso del funcionamiento del sistema, permitiendo por ejemplo redirigir el flujo normal del fluido hacia el acumulador para que circule por el disipador y se libere esta energía térmica al ambiente en caso de error en el sistema.

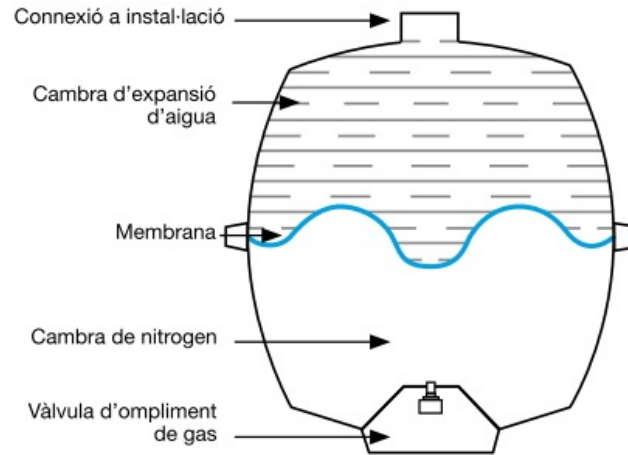


Figura 2.26: Sección transversal de un depósito de expansión. La mitad superior se encuentra conectada al circuito de cogeneración mientras que la inferior contiene nitrógeno [60].

Los purgadores permiten la retirada de burbujas de aire que puedan ocasionarse en el seno del sistema de cogeneración e interfieran con su normal funcionamiento al dificultar el intercambio de calor, tanto en el circuito primario, entendido como aquel que interacciona con el disco Stirling directamente, como en el secundario en el caso de que se trate de un sistema abierto [60].

Con tal de contrarrestar las diferencias en densidad y volumen de los fluidos del sistema al ser sometidos a cambios de temperatura debidos a factores externos, se hace necesaria la instalación de depósitos de expansión. Estos elementos son depósitos estancos divididos internamente por una membrana. Una división está conectada al circuito exterior, mientras que la otra contiene un gas, habitualmente nitrógeno [60], tal como se puede observar en la figura 2.26. De esta manera, al dilatarse el fluido deforma la membrana y se expande, permitiendo que conserve una presión adecuada para el sistema.

Una buena elección del material de los conductos del sistema es de vital importancia, pues serán fuente de pérdidas importantes térmicas y de carga. Actualmente, los más utilizados son los siguientes [33].

Cobre

Alta resistencia a la corrosión, maleable y dúctil, lo que lo hace fácil de trabajar. Su baja rugosidad minimiza las pérdidas de carga y es capaz de soportar heladas.

Acero galvanizado

Habitual en el transporte de agua caliente. Sin embargo, no debe exponerse a temperaturas más elevadas que 60°C o el zinc presente en el acero se deteriorará. Es más económico que el cobre, aún siendo más difícil de trabajar. Su resistencia térmica es menor que la del cobre.

Plásticos

De características similares al cobre, tanto térmicamente como en coste. El polietileno reticulado y el propileno son dos ejemplos de plásticos utilizados para tal fin.

Los elementos del sistema de cogeneración suelen estar aislados térmicamente con tal de intentar reducir las pérdidas térmicas, sobre todo las conducciones pues son la mayor fuente de este tipo de pérdidas, por lo que impera además la minimización de su longitud [60].

Capítulo 3

El disco Stirling TRINUM

Esta sección expondrá las características y propiedades del disco Stirling instalado en la ETSEIB según han sido proporcionadas por el fabricante, tal que se puedan realizar comparaciones con el funcionamiento real de la instalación.

3.1. INNOVA Solar

El disco Stirling *TRINUM* es un producto de la compañía italiana *INNOVA Solar*, establecida en el año 2000 [26] y basada en la búsqueda de alternativas de tecnología de concentración desde el 2005, con instalaciones piloto en ciudades como Lettomanoppello (Pescara), Monteodorisio (Chieti), Torino di Sangro (Chieti) y Roccamontepiano (Chieti), entre otras [6].

3.2. Objetivos de la instalación

El objetivo del proyecto ha sido explicado con anterioridad, se trata de un estudio sobre tecnologías energéticas innovadoras. Este apartado trata sobre los objetivos que debía cumplir la instalación particular de este trabajo, que uso y justificación se le da a la potencia generada.

De este modo, la finalidad asignada al disco Stirling en el contexto de la ETSEIB, donde está instalado, es la del uso de la energía térmica generada para el precalentado del agua sanitaria para uso del gimnasio de la ETSEIB, en el mismo edificio, con tal de prevenir la contaminación de la misma (Legionela). Se trata de un sistema de ACS. El agua proviene de la red y el calentamiento final es llevado a cabo por una caldera, Así mismo, el proyecto también presenta unas dificultades a superar.

- No está permitido el cambio de las condiciones normales del edificio.
- Gran distancia entre la generación y el consumo de la energía térmica, pues el gimnasio se encuentra en una zona con mucha sombra.
- Conexiones eléctricas en varios puntos diferentes.
- El proyecto está restringido por la regulación de la legionela.

3.3. TRINUM y sus sistemas asociados

El disco solar instalado en la ETSEIB es el denominado *TRINUM* de *INNOVA Solar*. Se trata de un disco Stirling italiano de cogeneración de pequeña capacidad, siendo capaz de proporcionar 3kW térmicos y 1kW eléctrico. Los puntos fuertes remarcados por la empresa son una alta eficiencia, un 40 % más eficiente que 1kW de energía fotovoltaica, su tamaño reducido, seguimiento en dos ejes y no necesitar un inversor para inyectar directamente la electricidad generada en la red deseada [26], pues la genera a 230V/50Hz [22].

El sistema ha sido testado en Calabria y ha sido capaz de generar 2100kWh eléctricos anuales y 6400kWh térmicos como agua caliente sanitaria a 45°C [22].

INNOVA sostiene que la eficiencia global del sistema es del 55 %, siendo 13.8 % eléctrica y 41.4 % térmica [22].

Se trata de un sistema modular, por lo que dependiendo de la potencia deseada, se pueden montar series de aparatos. En el caso de la ETSEIB, solo fue instalado un ejemplar, por lo que los problemas asociados a la integración de más de un disco, como el de conexiones entre los sistemas térmicos y eléctricos o el problema de proyección de sombras no fueron estudiados.

Innova no proporciona todos los elementos del sistema de cogeneración, ya que muchos de estos dependen del caso concreto al que se enfrente el cliente. Así pues se detalla a continuación el seguido de componentes proporcionados con TRINUM:

- Disco Stirling
- ECU¹ - Unidad de control del motor (Stirling).
- HCU² - Unidad de control hidráulico.
- Tanque de expansión.

¹De *Engine Control Unit*.

²De *Hydraulic Control Unit*. Incluye una válvula de 3 vías y una bomba.

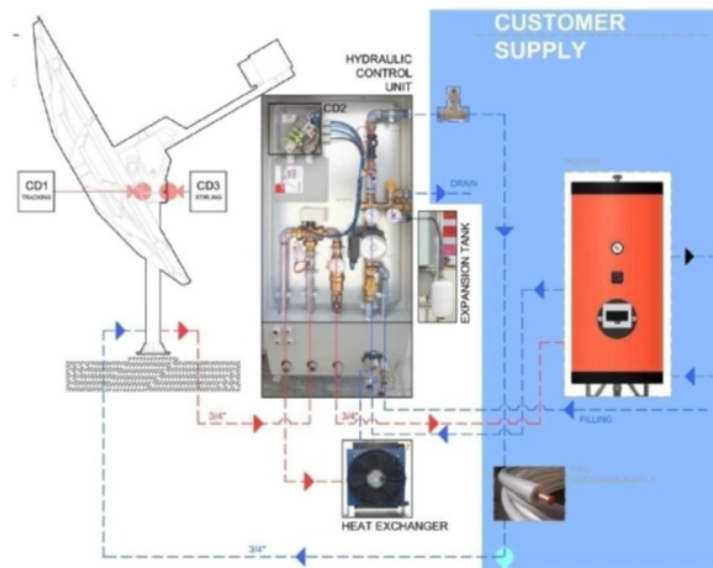


Figura 3.1: Esquema de partes incluidas con TRINUM y aquellas que debe aportar el cliente [23].

- Refrigerador.

En cambio, no están proporcionadas las siguientes partes, como se puede observar en la figura 3.1.

- La estructura (base).
- El acumulador.
- El intercambiador de calor.
- Cableado eléctrico.
- Válvula de purgado automático.

Las principales características del disco Stirling TRINUM se han expuesto en el cuadro 3.1 y su producción anunciada en el cuadro 3.2. Para gráficos de generación del disco elaborado por *Innova*, mirar anexo C.

3.3.1. Sensado

Con tal de monitorizar la temperatura del disco Stirling, TRINUM lleva instalados termopares en el foco caliente del motor Stirling y un sensor de temperatura en el circuito hidráulico [22].

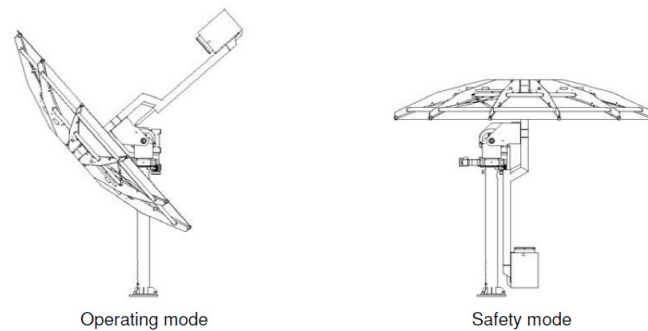


Figura 3.2: Esquema mostrando la configuración de trabajo (izquierda) y de modo de seguridad (derecha) del disco Stirling TRINUM [22].

El disco también cuenta con anemómetro para la detección de la fuerza del viento y un sensor de lluvia [22].

En caso de detectar condiciones desfavorables, ya sean por temperaturas excesivas, lluvia, fuertes vientos o otro tipo de error, el sistema está programado para entrar en *modo de protección*, en el cual el motor es apagado, el circuito de refrigeración auxiliar es activado, el disco se desajusta con respecto al Sol y se coloca en posición de seguridad, tal como se muestra en la figura 3.2.

3.3.2. Control

Las señales de los sensores son recopiladas y procesadas por la placa madre de control, que puede ser remotamente controlada a través de *Modbus RTU* y también es la encargada de ejecutar los algoritmos de seguimiento solar, para los cuales dispone de coordenadas GPS y un reloj astronómico [22].

Para orientar el disco, se emplean dos motores eléctricos sin escobillas, que se accionan cada pocos segundos para mantener un correcto seguimiento solar.

Otro elemento al cual dispone de acceso la placa madre de control es la placa de control del motor Stirling, encargada del control de este.

La placa madre de control es la encargada de monitorizar las siguientes variables del sistema:

- Fecha.
- Hora.
- Energía producida.

- Velocidad del viento.
- Valor deseado de la temperaturas de los focos.
- Temperatura del foco caliente del motor Stirling.
- Temperatura del fluido refrigerante de entrada.
- Temperatura del fluido refrigerante de salida.
- Caudal del fluido refrigerante.
- Temperatura ambiente.
- Temperatura de la caldera.
- Voltaje suministrado.
- Intensidad suministrada.
- Potencia térmica.
- Frecuencia.

La placas se encuentran protegidas dentro de una caja de c

3.3.3. Sistema eléctrico

El sistema eléctrico está situado dentro de una caja de fusibles, donde está protegido por fusibles, disyuntores de corriente e interruptores diferenciales.

La energía eléctrica generada por el disco Stirling es monofásica y está conectada a la placa de control. Para la potencia generada y la distancia de 50m que debe recorrer, se calculó la sección del cableado a utilizar de 4mm^2 .

Dentro de la caja de conexiones también se encuentra una batería y sensores de carga de la batería que aseguran una carga mínima suficiente para la correcta operación temporal en caso de un problema con la conexión a la red, junto a otros elementos eléctricos, tales como conexión a tierra, fusibles, relees, resistencias para consumir la energía generada en caso de errores en la conexión a la red y condensadores para compensar la potencia reactiva generada. También se incluye un visor para visualizar los datos y configurar el disco.

Todo este equipamiento se encuentra en el armario de seguridad, junto al disco Stirling.

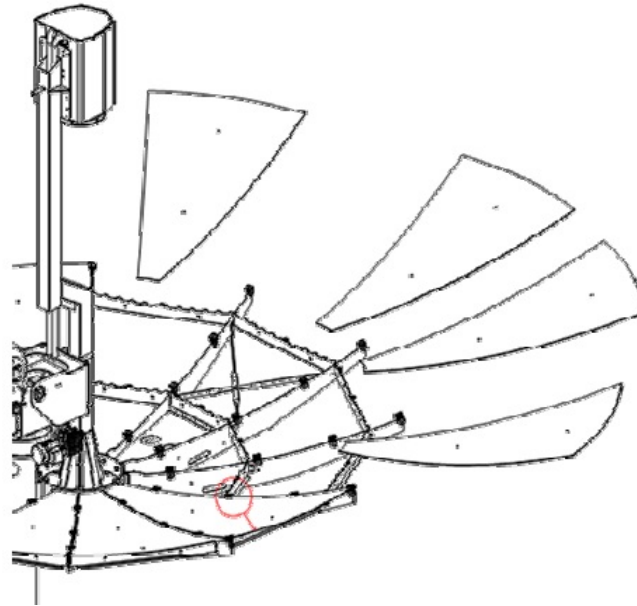


Figura 3.3: Esquema del montaje de los espejos [23].

3.3.4. Óptica

El disco está formado por 11 superficies individuales de aluminio de alta reflectividad, sujetas al esqueleto metálico de acero inoxidable tal como se muestra en la figura 3.3 mediante el uso de tornillos M16 [23].

Los brazos del esqueleto se encuentran montados mediante 48 tornillos M8x25. Sobre los brazos cortos, se instalan soportes y finalmente se fijan los espejos mediante tapas.

Cabe destacar que el diámetro ofertado por el fabricante y el área de captación en el cuadro 3.1 no coinciden, pues están relacionados según la siguiente fórmula:

$$A_C = \frac{D^2}{4}\pi \quad (3.1)$$

Donde A_C es el área de captación y D el diámetro del paraboloide. Siendo D de valor 3.75m, el área de captación debería ser de 11,045m². Sin embargo, el disco Stirling TRINUM no describe una paraboloide completa, sino que tiene una rebanada de espejo menos para acomodar el soporte del receptor y permitir mayor libertad de movimiento, haciendo posible que el disco adopte la posición de seguridad.

Una consecuencia de esta geometría es la falta de una sombra proyectada sobre el disco, que podía ser modelada según una constante [56], tal que el

área verdadera útil de captación sería:

$$A_C = \frac{D^2}{4}\pi - \phi_{SOMBRA} \quad (3.2)$$

Sin embargo, *Innova* indica que el área reflectiva neta es aún inferior a esta, siendo de tan solo 9.58m^2 , lo cual incluye la reflectividad del material. Mediante un simple cálculo, donde ρ es la reflectividad del disco y A_{CN} el área neta de concentración:

$$A_C\rho = A_{CN} \quad (3.3)$$

se obtiene un valor de reflectividad de 0.867.

3.3.5. Motor Stirling

El motor Stirling montado en el disco es de pistón libre [26]. Recibe el nombre de *LFPEG*⁴, o Motor Generador Lineal de Pistón Libre [22], al traducir sus siglas al castellano.

Está basado en el motor de combustión externa desarrollado por *Sunpower* para la NASA, con patentes e implementaciones adicionales por parte de *British Gas* y desarrollado y producido por *Microgen Engine Corporation* [26].

Sus características más relevantes, tal como han sido presentadas por *Innova*, han sido expuestas a continuación [26]

- Operación silenciosa.
- Frecuencia de 50Hz.
- No explosivo.
- No es necesario un inversor.

Su temperatura de trabajo media es aproximadamente de 500°C y la presión interior de 28bar. Su eficiencia es elevada en comparación a otros motores Stirling, siendo esta del 30 %

El receptor del disco es un círculo de diámetro 10cm que transfiere la energía concentrada al foco caliente del motor Stirling.

El sistema de refrigeración es el encargado de transferir la energía térmica del foco frío al sistema de ACS, permitiendo que el disco cogenere, mientras que el motor incluye un generador síncrono lineal de electricidad. puesto que el motor opera a 50Hz (3000rpm), no necesita un inversor para conectarlo a la red.

⁴Las siglas significan en ingles, Linear Free Piston Engine Generator.

3.3.6. Sistema hidráulico

Los elementos a manipular, sean válvulas o conexiones, se encuentran en el armario de seguridad, junto al disco Stirling.

Sistema de refrigeración

El sistema hidráulico tiene un consumo asociado de 70W, debidos a la bomba que empuja el fluido. Cuando la energía térmica producida no se puede consumir, otros 80W son empleados en el disipador para liberar esta energía al ambiente. Se ha sobredimensionado el disipador de tal manera que pueda disipar 3.5kW para hacer frente al peor caso posible donde deba disipar 3kW de energía térmica.

El sistema de control es el encargado de monitorizar las temperaturas y asegurarse de que en ningún momento se sobrepase alguna temperatura límite a la cual algún elemento sufra daños.

El caudal del fluido de refrigeración empleado en la instalación es de 15l/min y su temperatura deberá mantenerse entre los 6°C y los 60°C en todo momento.

El fluido en cuestión es una mezcla de agua y *Propilenglicol*. Tomando la temperatura mínima histórica de Barcelona de -10°C, se dimensionó la proporción de tal modo que no llegue a congelar hasta temperaturas aún más bajas, utilizando un porcentaje del 29 % de Propilenglicol en la mezcla final.

Sistema de ACS

Tal como se ha expuesto con anterioridad, el trayecto del ACS desde el disco hasta su consumo es largo, los conductos tienen una longitud de 142m, por lo que las pérdidas se prevén serán importantes.

El *tanque solar*, nombre al cual se le da al acumulador, debe disponer de un volumen de 1000l para satisfacer las necesidades térmicas del proyecto, según los cálculos realizados en el proyecto de ingeniería de la instalación del disco, que prevé un incremento de 30°C, de 15°C a 45°C, en la temperatura del agua. Este elemento es necesario para el correcto funcionamiento del sistema, pues el consumo del agua caliente y de la producción se encuentran seriamente desfasados, con el mayor consumo a la hora de comer y al acabar el horario lectivo, con picos en los últimos 10 minutos de cada día. El área mínima del intercambiador de calor interno es de 1.5m² para poder transferir toda la potencia térmica.

El sistema está dimensionado tal que es capaz de acumular toda la energía generada en un día si la producción es la nominal de 3kW térmicos, aplicando

un coeficiente de seguridad de 1.5.

Conducciones y aislamiento térmico

Todas las conducciones son de $\frac{3}{4}$ pulgadas y deben estar cubiertas por una capa de pintura anticorrosión.

Se realizó un ejercicio de minimizar la longitud de las conducciones en la medida de lo posible para evitar pérdidas térmicas y de carga, también evitando muchos o bruscos cambios de orientación de las conducciones. A efecto de reducir las pérdidas de carga, se estableció una inclinación mínima del 1 % en la dirección del flujo.

Sin embargo, dada la longitud de las conducciones, se ha tenido que instalar una bomba auxiliar de potencia 55W para asegurar el flujo del fluido.

Tal como se indica en el IT 1.2.4.2 del *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios* [25], los conductos que transporten fluidos de una temperatura mayor a 40°C deben ser aislados térmicamente. Los elementos situados en el exterior también tendrán que estar protegidos de inclemencias meteorológicas.

Con el objetivo de asegurar que no se produzcan cambios de estado en el interior de las conducciones y que la pérdida global de calor debido a dichas conducciones sea inferior al 4 % de la potencia máxima que pueden transportar, se escogieron aislamientos de 25mm de espesor para las conducciones interiores, de 35mm de diámetro como máximo y transportando fluido a 60°C. Para las conducciones exteriores, el aislamiento seleccionado es de 35mm.

Depósito de expansión

El depósito de expansión debe dimensionarse de tal manera que pueda almacenar en su interior:

- Un *volumen de dilatación* para el fluido de trabajo a su temperatura máxima.
- Un *volumen de reserva* para prevenir una contracción del fluido en caso de congelación o purga.
- Un *volumen de vaporización* para contener el volumen generado en caso de vaporización parcial del fluido de trabajo.

El volumen necesario se computa con la suma de los tres volúmenes anteriores multiplicada por un factor de seguridad, depende de el fluido, las

características del sistema hidráulico y las temperaturas que pueda alcanzar. Su volumen en la instalación de la ETSEIB es de 7 litros.

3.3.7. Estructura

El sistema ocupa un área de 23m^2 con una altura de 4.6m cuando se encuentra en funcionamiento y 3m en modo de seguridad. Toda la estructura está protegida por una capa anti-oxidante.

La base sobre la cual debe descansar el pie del disco no fue proporcionado por *Innova*, sino que se diseñó en la ETSEIB, donde se consideró el peor caso posible, el sistema completamente abierto y expuesto a ráfagas de viento de 155km/h .

Puesto que no estaba permitida la modificación del edificio, no se pudo fijar la estructura al tejado, por lo que se optó por una armadura de perfiles *HEB 160* para las conexiones principales y 3 perfiles *HEB 140* para soportar el disco TRINUM, con la adición de contrapesos adicionales en las esquinas de la armadura. El resultado final se puede apreciar en la figura 3.4.

Área de seguridad

El área necesaria para la instalación segura de un disco Stirling de estas características es de $7\text{m} \times 7\text{m}$. Sin embargo, al tratarse únicamente de un disco, esta se puede acortar al no existir problemas de sombras entre los discos, por lo que queda un área de seguridad de $3.32\text{m} \times 5.64\text{m}$. El armario de seguridad puede situarse dentro del área de seguridad, pero fuera de un área de $2.32\text{m} \times 4.64\text{m}$ desde el centro del disco. El acumulador y sistemas auxiliares deben instalarse en una habitación separada, de $2\text{m} \times 2\text{m} \times 3\text{m}$ como mínimo.

Característica	Valor
Máxima velocidad del viento en modo operativo	50km/h
Máxima velocidad del viento en modo de seguridad	162km/h
Peso	600kg
Nivel de sonido	60db
Reflectividad de la paraboloide	0.9
Diámetro de la paraboloide	3.75m
Área de captación del disco	10m ²
Área reflectiva bruta	11.23m ²
Área reflectiva neta	9.58m ²
Seguimiento solar	2 ejes
Rango acimutal	-110°, +110°
Rango elevación	-90°, +90°
Motor Stirling	LFPEG
Temperatura máxima operacional del motor Stirling	525°C
Temperatura máxima de seguridad del motor Stirling	585°C
Temperatura máxima del circuito hidráulico	60°C
Temperatura máxima de funcionamiento del motor (foco frio)	70°C
Temperatura máxima operativa del disipador	90°C
Temperatura ambiente mínima operativa	-10°C
Conexiones del sistema de refrigeración	$\frac{3}{4}$ "
Caudal fluido de refrigeración	[7,19]l/min
Presión máxima de operación	6bar
Caudal del fluido refrigerante	15l/min
Temperatura aceptable para refrigeración del motor Stirling	[6,50]°C
Presión máxima del fluido dentro del motor Stirling	7bar

Cuadro 3.1: Cuadro de especificaciones del disco Stirling TRINUM [22].

Característica	Valor
Producción	
Alimentación	230V 50Hz
Producción eléctrica	DNI ³ = 750 W/m ² 1.00 kW DNI = 650 W/m ² 0.65 kW DNI = 600 W/m ² 0.30 kW
Producción eléctrica punta	1 kW
Producción de ACS	45°C 80l/h 50°C 73l/h 60°C 57l/h $\Delta T 30^{\circ}\text{C}$ 80 l/h $\Delta T 40^{\circ}\text{C}$ 70 l/h $\Delta T 50^{\circ}\text{C}$ 60 l/h
Producción térmica punta	3 kW

Cuadro 3.2: Cuadro de producción del disco Stirling TRINUM suministrado por *Innova* [22, 23]

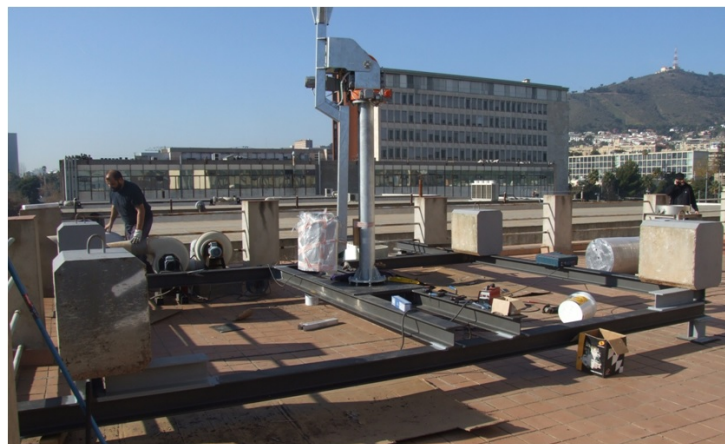


Figura 3.4: Fotografía de la instalación del soporte del disco TRINUM.

Capítulo 4

Análisis de funcionamiento del disco Stirling

En este capítulo se llevara a cabo un análisis del funcionamiento del disco Stirling, basado en la información de funcionamiento proporcionada por el mismo y las condiciones exteriores, meteorológicas o estados del sistema.

Es un paso previo fundamental al estudio económico de la instalación y de la viabilidad de la tecnología y su futuro, aparte de proporcionar información detallada sobre el funcionamiento y por lo tanto una mayor comprensión del sistema, objetivo de peso por sí solo.

Lamentablemente, no se disponen de datos suficientes como para llevar a cabo un análisis de cada etapa de conversión energética en el orden en el que se produce, para poder apreciar las sucesivas transformaciones y las diferentes variables que intervienen en el proceso, desde la colección de energía solar hasta la distribución de la energía térmica y eléctrica. Un esquema de este proceso, separado por fases con rendimientos supuestos para cada una puede encontrarse en la figura 4.1.

En su lugar se ha optado por tratar el sistema de disco Stirling como un bloque con la radiación solar enfocada como entrada y la generación eléctrica y térmica como salidas, tal como se ha ilustrado en la figura 4.2. Este enfoque se centra en el rendimiento de la máquina, objeto de este proyecto para después poder evaluar su rentabilidad económica, pero ello no impide que se lleve a cabo también un análisis de variables internas consideradas de interés para el comportamiento del disco, tales como la temperatura del foco caliente del motor Stirling o la orientación del disco. Sin embargo, el análisis de estas variables propias del sistema estará restringida a la relación entre ellas o con las entradas y salidas, sin tener en cuenta los procesos internos en los que participan.

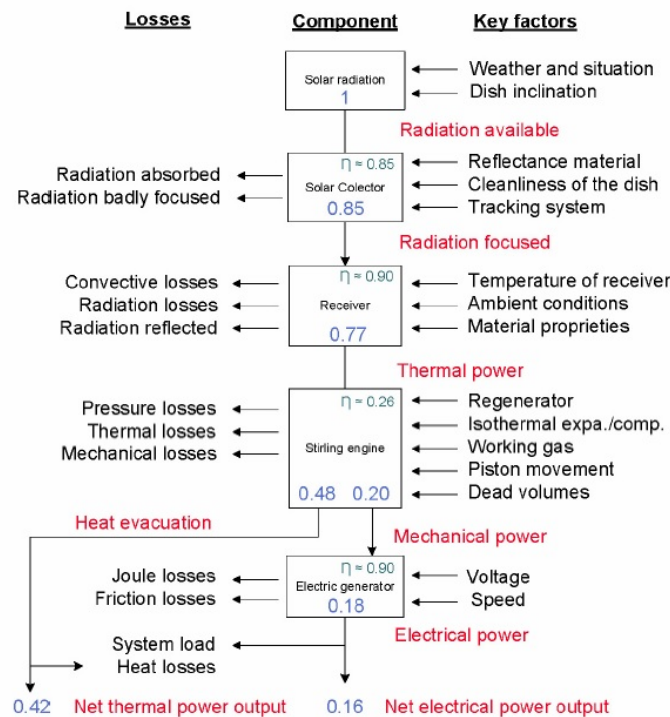


Figura 4.1: Esquema del flujo de energía en el disco Stirling, con pérdidas (izquierda), componente que interviene en cada fase (centro) y factores determinantes (derecha), junto al rendimiento de cada transformación.

4.1. Cálculo de la radiación solar

Con el objetivo de analizar el funcionamiento del disco Stirling, se recopilaron datos de radiación solar global¹ ofrecidos por el servicio meteorológico de Cataluña [11] y su red de estaciones automáticas.

En la figura 4.3 se puede ver una fotografía de la estación que recopiló los datos utilizados para llevar a cabo este trabajo, situada a tan solo 1 km del disco Stirling.

Estas estaciones utilizan piranómetros termoelectrónicos para realizar las mediciones de radiación solar [11]. Su funcionamiento depende de el potencial generado entre diferentes extremos de termopares situados en su interior al calentarse de forma desigual por causa de la radiación solar incidente, lo que permite establecer una relación entre voltaje y radiación solar y así deducir su valor [11, 50]. Su colocación se realiza en el plano horizontal a dos metros

¹La *radiación solar global* se entiende como aquella que engloba la radiación directa y difusa.

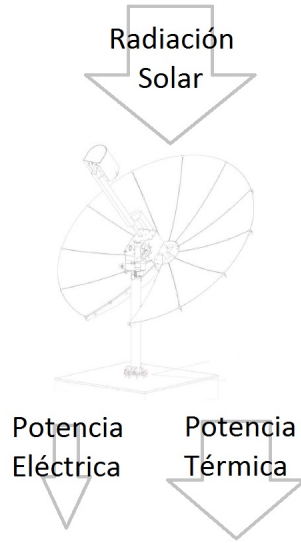


Figura 4.2: Esquema de entradas y salidas del sistema considerado. También se analizarán variables internas del sistema, pero no los procesos, por lo que estas se relacionaran entre ellas o con las salidas o entradas.

del suelo en el caso de las estaciones consideradas [11].

Puesto que los datos obtenidos corresponden a radiación global sobre una superficie horizontal, es necesario un previo procesamiento para extraer la radiación directa solar, pues es esta el valor de radiación útil para el funcionamiento del disco Stirling. Para ello se tiene que poder separar los componentes difuso y directo de la radiación incidente y el valor total de radiación con ángulo de incidencia nulo respecto al Sol para cualquier momento del día.

Para separar la radiación global en sus componentes difuso y directo, se utilizó el *método de Perrin de Brichambaut et Dogniaux* [57] para días claros. El cálculo se expondrá a continuación.

Si se descompone la radiación global H_0 sobre una superficie horizontal extraterrestre, en directa H_{dir} y difusa H_{dif} :

$$H_0 = H_{dir} + H_{dif} \quad (4.1)$$

entonces

$$H_{dir} = H_0 \exp \left[-\frac{T}{7,5} \cos(\phi - \delta)^{-0,75} \right] \quad (4.2)$$

$$H_{dif} = H_0 \frac{T}{31,6} [\cos(\phi - \delta)]^{-0,5} \quad (4.3)$$



Figura 4.3: Fotografía de la estación meteorológica de *Barcelona - Zona Universitària* del *servei meteorològic de Catalunya*. [11]

Donde δ sigue siendo la declinación solar, ϕ la latitud local y T adquiere un valor de:

$$T = 2,5 + 14,8B + 0,4(1 + 2B) \log (W \overline{\text{sen } \alpha_S}) \quad (4.4)$$

Donde B es el *coeficiente de perturbación de Angström*, caracterización de la cantidad de aerosoles en la vertical [17]. Con tal de llevar a cabo el análisis propuesto, se adquirieron datos con valores para el cálculo del coeficiente de perturbación de Angström² de *AERONET*³ [2].

Los datos disponibles comprenden un periodo de 5 años, del 2007 hasta el 2011, por lo que se procedió a un análisis temporal para establecer una posible relación entre el mes y el coeficiente (Véase el apéndice B para más detalles sobre el proceso). Los resultados pueden observarse en la figura 4.4, gracias a la cual se puede observar con cierta seguridad una relación entre el ciclo anual y el coeficiente de Angström. Se juzgó oportuno el uso de la interpolación lineal del valor medio mensual del parámetro a lo largo de los 5 años de estudio.

El parámetro adopta valores alrededor de 0.07-0.16, razonables teniendo

²El autor da las gracias a Sara Basart y José M. Baldasano por establecer y mantener la base de datos utilizada en este trabajo.

³*AErosol RObotic NETwork*, o red robótica de aerosoles, en castellano. Es una red de estaciones terrestres remotas de sensado de aerosoles, establecida por la *NASA* y *PHOTONS*, con la actual colaboración de diversos organismos terceros [2].

en cuenta la localización del sondeo⁴, pues según la literatura consultada [57] es posible utilizar valores de B de 0.05 para zonas rurales, 0.10 para zonas urbanas, donde se encuentra el área de estudio, y 0.2 para zonas industriales.

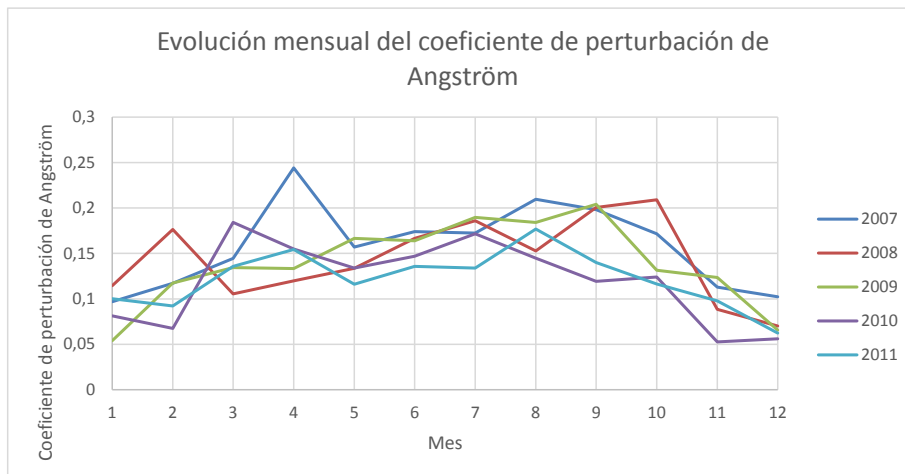


Figura 4.4: Gráfico de la evolución temporal mensual del coeficiente de perturbación de Angström para varios años.

El parámetro W se define como el espesor de agua condensable en la atmósfera y puede encontrarse según:

$$W = 2H_a \quad (4.5)$$

donde H_a es la humedad absoluta (gr. agua / m³ aire).

Puesto que los datos de la estación meteorológica no incluyen este dato, se han tenido que realizar cálculos adicionales para trabajar con los que si están disponibles:

- Temperatura mediana durante un periodo.
- Humedad relativa mediana durante un periodo.

⁴Situado a tan solo 236.45m del emplazamiento del disco Stirling, su información se considera muy relevante.

- Presión atmosférica mediana durante un periodo.

$$H_a = \frac{0,662P_V}{P} \quad (4.6)$$

$$H_r = \frac{P_v}{P_{SAT}} \quad (4.7)$$

Donde P_V es la presión parcial del vapor de agua en el aire, P es la presión atmosférica total, H_r es la humedad relativa y P_{SAT} es la presión de saturación del vapor de agua a la temperatura a la que se encuentra en el momento de la lectura.

Para poder llevar a cabo los cálculos, se precisa del valor de P_{SAT} , para lo que se ha usado una aproximación fiable⁵ basada en la siguiente formula [78]:

$$\ln \left(\frac{P_{SAT}}{P_C} \right) = \frac{T_C}{T} \left(a_1v + a_2v^{1,5} + a_3v^3 + a_4v^{3,5} + a_5v^4 + a_6v^{7,5} \right) \quad (4.8)$$

$$v = 1 - \frac{T}{T_C} \quad (4.9)$$

Donde T_C es la temperatura del punto crítico del agua, P_C la presión del punto crítico del agua, y a_i son parámetros de valores:

- $T_C = 647,096\text{K}$
- $P_C = 22,064\text{MPa}$
- $a_1 = -7,85951783$
- $a_2 = 1,84408259$
- $a_3 = -11,7866497$
- $a_4 = 22,6807411$
- $a_5 = -15,9618719$
- $a_6 = 1,80122502$

⁵La máxima discrepancia experimental observada es de $\pm 0,025\%$ [78].

Así pues, el cálculo del parámetro W se puede realizar con los datos disponibles y el cálculo de P_{SAT} según

$$W = 2 \frac{0,622}{P} H_r P_{SAT} \quad (4.10)$$

Por último, $\overline{\text{sen } \alpha_S}$ se calcula según:

$$\overline{\text{sen } \alpha_S} = \cos \phi \cos \delta \frac{\text{sen } \omega - \frac{\pi}{180} \omega \cos \omega}{\frac{\pi}{180} \omega} \quad (4.11)$$

Donde ω es el ángulo horario.

Mediante este método, se ha conseguido realizar una aproximación de la radiación solar a nivel de tierra para cada componente partiendo de la radiación solar extraterrestre sobre un plano horizontal. Esta solución es buena para realizar medianas de radiación diarias o mensuales para lugares donde no se disponga de información sobre el flujo solar. Sin embargo, la realización de este trabajo si dispone de datos de radiación reales, por lo que se efectúa un esfuerzo de cálculo para poder obtener datos más precisos.

Partiendo de la radiación solar extraterrestre sobre un plano horizontal, resultante de conocer la *constante solar*, de valor 1353 W m^{-2} y la posición del sol en el firmamento para un instante determinado (véase las ecuaciones 4.15, 4.16 y 4.17 para la deducción de esta fórmula).

$$H_0 = C_S \text{sen } \alpha_S \quad (4.12)$$

Se procede al cálculo del porcentaje correspondiente de este valor para los componentes de radiación directa y difusa y por último se aplica este porcentaje a los valores de radiación solar global reales medidos, R_{med} , por la estación meteorológica, obteniendo R_{dir} y R_{dif} como valores finales de radiación directa y difusa, respectivamente. Así pues:

$$R_{dir} = \frac{H_{dir}}{H_{dir} + H_{dif}} R_{med} \quad (4.13)$$

$$R_{dif} = \frac{H_{dif}}{H_{dir} + H_{dif}} R_{med} \quad (4.14)$$

Una vez separada la fracción directa de la radiación medida, se compensa su valor por el ángulo de incidencia⁶. Puesto que ha sido evaluada por una superficie horizontal plana, esta solo ha recibido una proporción de la radiación

⁶El ángulo de incidencia es aquel que forma la línea imaginaria que une el Sol con el centro de la superficie considerada y la normal de dicha superficie.

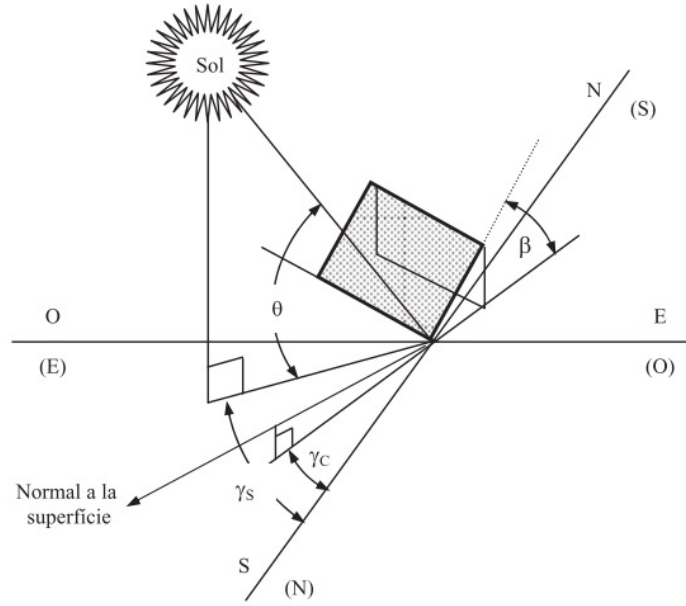


Figura 4.5: Representación del ángulo de incidencia θ y ángulos auxiliares [33].

directa total incidente, la normal a su plano, por lo que es necesario corregir esta inclinación con tal de obtener la radiación directa incidente cuando el plano receptor y el Sol se encuentran alineados (ángulo de incidencia nulo).

Para los ángulos representados en la figura 4.5, este ángulo se calcula según [33]:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \cos(\gamma_S - \gamma_C) \cos \alpha \cdot \sin \beta + \sin \alpha_S \cdot \cos \beta = \\ &= \sin \delta \cdot (\sin \phi \cdot \cos \beta - \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma_C) + \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot (\cos \phi \cdot \cos \beta + \\ &\quad \sin \phi \sin \beta \cdot \cos \gamma_C) + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma_C \cdot \sin \omega \end{aligned} \quad (4.15)$$

Donde recordamos que δ es la declinación solar, ϕ la latitud local, α_S la elevación solar y ω el ángulo horario. Sin embargo, para una superficie horizontal, $\beta = 0$, por lo que la expresión se simplifica bastante:

$$\cos \theta = \sin \alpha_S \quad (4.16)$$

Conocido el ángulo de incidencia, calcular la radiación solar directa total I_S en función de la recibida en el plano horizontal q_S es trivial [33, 50]:

$$q_S = I_S \cos \theta \quad (4.17)$$

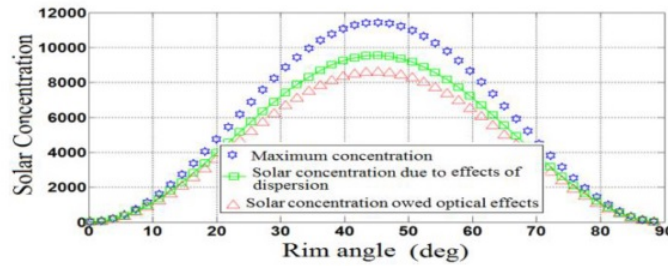


Figura 4.6: Gráfico relacionando la concentración solar máxima con el ángulo de borde [56]

Mediante el uso de las ecuaciones citadas en este capítulo y los resultados de las fórmulas 2.22 y 2.23 enunciadas en la sección 2.6.2 para el cálculo de las coordenadas solares, se hace posible la división de la radiación solar en sus componentes directa y difusa, para poder llevar a cabo un análisis del uso de la radiación directa por parte del disco Stirling.

El último paso a la hora de calcular la radiación captada es el de multiplicar la radiación directa incidente enfocada por unidad de área por la superficie de captación neta del colector.

4.2. Concentración solar

Una vez calculada la radiación aprovechable, queda por determinar la concentración y su aprovechamiento como entrada energética en el disco Stirling.

Para tal fin se estudian las características materiales y geométricas del captador. Una propiedad importante es el *ángulo de borde*, descrito en el apartado 2.6.2, puede ser calculado según [61]:

$$\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{8f}{D_p}}{16 \left(\frac{f}{D_p} \right)^2 - 1} \right) \quad (4.18)$$

Donde f es la distancia focal, de 2m, y D_p es el diámetro del colector, en este caso, su valor es de 3.75m. Así pues, el ángulo de borde del colector del disco Stirling TRINUM es de 50,23°. El valor óptimo para este parámetro es de 45° [56], ya que a medida que el valor de este ángulo se aleja de 45°, la eficiencia baja por pérdidas en el colector. Esta relación se puede observar en la figura 4.6.

Haciendo uso de las expresiones 2.15 y 2.16, es posible calcular la concentración máxima posible y la relación de concentración ideal para el disco en

cuestión, respectivamente.

De esta manera, se obtiene una concentración máxima en ningún caso superable de 46747.31 y una relación de concentración ideal de 27272.13. Estos datos indican que, mediante el uso de una paraboloide de características similares a TRINUM, sería posible concentrar la radiación solar en un 58,34 % del valor máximo teórico mediante un sistema ideal.

Sin embargo, la superficie no es perfectamente reflectante y el receptor no es una superficie puntual, por lo que la relación de concentración real será inferior a este valor.

Tomando como válido el valor de *superficie reflectante neta*⁷ del disco Stirling proporcionados por *Innova*, de 9.58m², y conociendo la geometría del receptor, de 10cm de diámetro, se establece la relación de concentración real como:

$$R_{CTRINUM} = \frac{A_{cNETA}}{A_{REC}} \quad (4.19)$$

Donde A_{cNETA} es el área neta del colector y A_{REC} , la del receptor, que otorga un valor a la relación de concentración del disco, $R_{CTRINUM}$, de 1219.76, un 4,47 % de la ideal.

Es esperado un valor aún menor de concentración debido a errores en la orientación del disco.

4.3. Motor Stirling

4.3.1. Receptor

Hasta este punto se ha calculado la potencia que recibirá el receptor, pero no toda ella pasará al foco caliente del motor Stirling debido principalmente a las pérdidas por radiación y convección, ya que se ignora las pérdidas por conducción, tratando las paredes laterales del receptor como adiabáticas.

Las pérdidas debidas a la radiación para la superficie A del receptor a una temperatura T_R se pueden calcular según:

$$Q_{RAD} = \epsilon \sigma A (T_R^4 - T_\infty^4) \quad (4.20)$$

Con ϵ la emisividad del material, σ la *constante de Stefan-Boltzmann*⁸ y T_∞ es la temperatura del cielo, pudiéndose obtener a partir de la temperatura

⁷Recordamos que esta es aquella superficie de captación con el parámetro de reflectividad y sombra aplicados.

⁸De valor $5,66E - 8 \frac{W}{m^2K^4}$.

ambiente T_{AMB} a partir de la siguiente relación [56]

$$T_{\infty} = 0,055T_{AMB}^{1,5} \quad (4.21)$$

las pérdidas por conducción están definidas como:

$$Q_{CONV} = h_c A (T_R - T_{AMB}) \quad (4.22)$$

Asumiendo que la dirección del viento, cuya magnitud se expresa como v , es perpendicular a la superficie del receptor, se puede modelizar el coeficiente de convección h_c como [76]:

$$h_c = 16,9v^{0,45} \quad (4.23)$$

Estas pérdidas explican el retraso observado entre el inicio de la irradiación y la subida de temperaturas, a la vez que el aprovechamiento solo parcial de la energía captada.

4.4. Condiciones del estudio

El disco Stirling se ha estudiado durante un total de 48 días, del 16/04/15 a el 03/06/15. Es un periodo algo corto para poder realizar estimaciones anuales, pero fue el único disponible debido a la tardía puesta en marcha del disco y la necesidad de disponer de datos meteorológicos y del disco Stirling en la misma ventana temporal. El autor recomienda realizar un estudio como mínimo anual en caso de querer mejorar la precisión de los resultados para futuros informes.

Los datos utilizados en el informe han sido recopilados de:

- *AERONET*: para los datos necesarios para la obtención del coeficiente de turbidez de Angström.
- *Meteocat*: para los datos atmosféricos⁹ y de radiación solar global.
- *Del mismo disco*: para todos los datos de generación e información interna.

Debido a la procedencia diversa de los datos, y el importante componente temporal que tienen asociado, se tuvieron que juntar ajustando los intervalos entre medidas de cada variable para sincronizarlos.

⁹Temperatura, presión y humedad relativa.

Los datos de *AERONET* mostraban una variabilidad muy elevada en cuanto al tiempo de recolección, por lo que se decidió realizar medias mensuales de los valores finales e interpolar los resultados para su uso en el cómputo de los resultados del análisis global.

Los datos de *Meteocat* eran recogidos cada media hora, pero mostraban valores medios para cada intervalo, y no el valor en la hora de medida.

Por último, los datos del disco Stirling se mostraban cada 5 minutos cuando este se encontraba en funcionamiento y cada 20 minutos cuando no estaba operando.

Así pues, se fijó un intervalo mínimo entre medidas de 5 minutos, siendo este compatible con las medidas del disco Stirling y *Meteocat* y realizando una interpolación lineal para las medidas atmosféricas, con tal de generar nuevas muestras para los intervalos más pequeños. En ocasiones ocurrían pequeños desajustes, en los que la hora de medición se desplazaba un par de minutos, ya no siendo múltiplo de la nueva unidad de medida de 5 minutos, por lo que los datos se ajustaron para representar su múltiplo más cercano, lo que induce un error en los datos del disco en cuanto a la hora de medición de 2.5 minutos. Los datos del disco Stirling que se expresaban cada 20 minutos también fueron interpolados linealmente, aunque no son de relevancia, pues el disco se encuentra inactivo durante dichos periodos.

El disco Stirling presentó numerosos casos de funcionamiento subóptimo durante el periodo de estudio, debidos a causas tan diversas como condiciones de alarma y avisos prolongados en el tiempo, información incompleta debida a operación interrumpida gracias a intervenciones manuales o paradas por mantenimiento, entre otras.

Ello ha llevado a un rango de días disponibles para un estudio de funcionamiento óptimo¹⁰ muy reducido, tal como puede observarse en la figura 4.7. Solo 8 de los 20 días del intervalo del gráfico presentaban datos válidos y completos, un 20 %.

Los dos errores más comunes fueron los siguientes:

- *Error 407*: Fallo en el termopar de control (el del foco caliente).
- *Error 603*: Flujo del líquido de refrigeración demasiado bajo.

Debido al bajo porcentaje de días con operación óptima, se decidió realizar un estudio doble, uno estimando la producción considerando un funcionamiento correcto, tal como sería si los problemas que ahora padece el disco se solucionaran, y otro teniendo en cuenta los días con errores, tal como ha funcionado hasta ahora. De esta manera se elaboraron 3 supuestos:

¹⁰Definido como un día con funcionamiento sin incidentes.

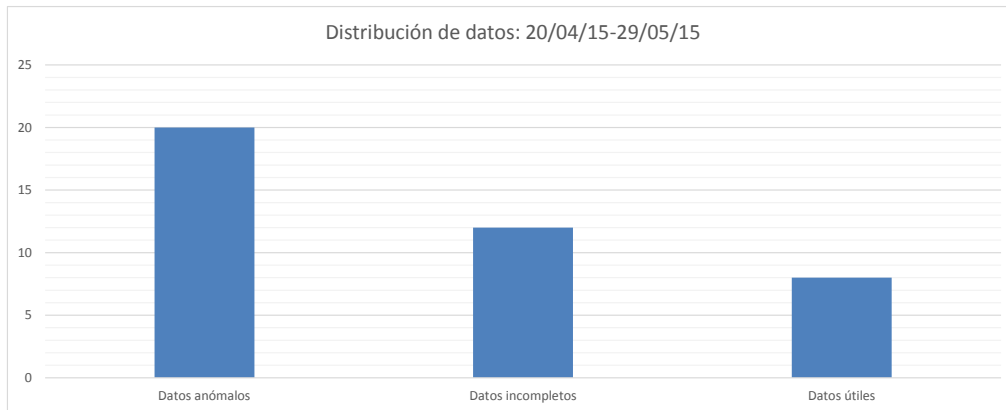


Figura 4.7: Gráfico con los porcentajes de días con datos incompletos, anómalos o correctos.

- *Supuesto 1*: El disco funciona correctamente, utilizando los datos de los días sin incidentes.
- *Supuesto 2*: El disco funciona como hasta el momento¹¹, utilizando los datos de todos los días.
- *Supuesto 3*: El disco funciona tal como propone *INNOVA* en la documentación del producto.

Los días del *supuesto 1* son:

- 21/04/2015
- 23/04/2015
- 28/04/2015
- 30/04/2015
- 12/05/2015
- 18/05/2015
- 22/05/2015
- 23/05/2015

¹¹La fecha de redacción es el 28/06/15.



Figura 4.8: Perfil de generación del disco Stirling para el 22/05/15.

4.5. Análisis de funcionamiento

4.5.1. Generación de energía

En este apartado solo se tratará el *supuesto 1*, pues los otros días no presentan un día completo y poseen una irregularidad elevada. En la figura 4.8 se ha representado un gráfico con el perfil de generación de potencia térmica, eléctrica y la radiación solar captada, es decir, la potencia de radiación directa incidente que ha captado el disco, durante un día perteneciente al *supuesto 1*. Para gráficos del resto de días, consultar el apéndice D.

El valor de la potencia eléctrica venía suministrada por el propio disco Stirling, pero no ocurría lo mismo con la potencia térmica, P_T , que ha sido calculada a partir de otros datos del disco, de la siguiente manera:

$$P_T = \frac{1000 (T_H - T_C)}{60} C_W F \quad (4.24)$$

Donde P_T es la potencia térmica, en vatios, C_W es la capacidad calorífica del fluido refrigerante¹², F es el flujo del líquido refrigerante, en l/min y T_C y T_H son las temperaturas del refrigerante de entrada y salida al disco Stirling, respectivamente.

En la figura 4.8 se puede observar una generación térmica aproximadamente 4 veces superior a la eléctrica, dato que concuerda con las especi-

¹²En el estudio se tomó el valor de $4.1796 \text{ Jcm}^{-3}\text{K}^{-1}$

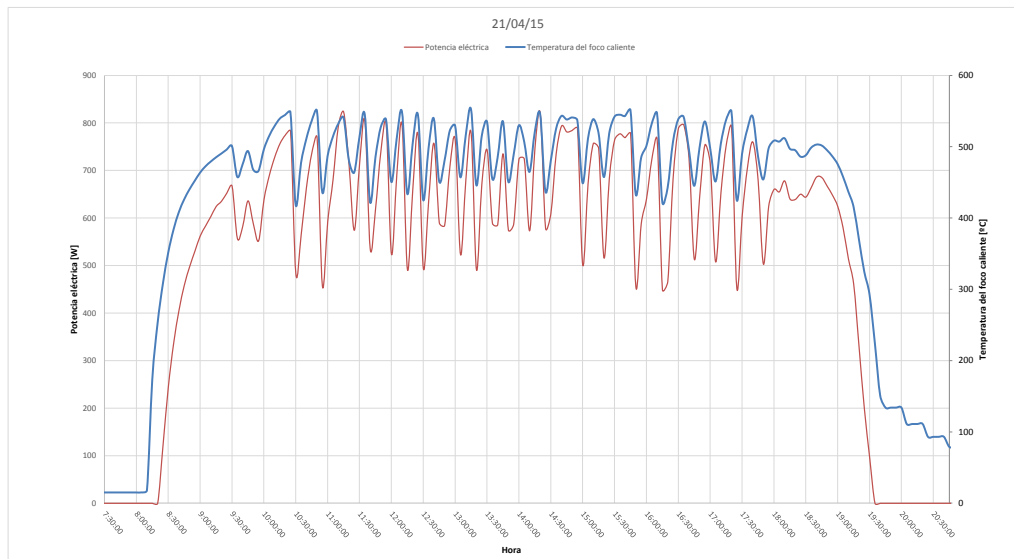


Figura 4.9: Gráfico de la generación eléctrica y la temperatura del foco caliente del motor Stirling para el día 21/04/15.

caciones del disco, estas siendo la producción de 1kWh eléctrico cada 3kWh eléctricos.

Es posible observar una forma de dientes de sierra en la generación, especialmente notable en la potencia eléctrica. Esto es debido al pequeño desajuste de orientación causado debido a la corrección discreta de la orientación del disco, ocurriendo esta cada 5 minutos. El desajuste hace disminuir notablemente la concentración solar del disco y la temperatura del foco caliente empieza a decaer rápidamente. Esto se puede observar más claramente en la figura 4.9. En esta figura se puede observar que el efecto de dientes de sierra no ocurre hasta llegado el periodo estacionario, es decir, los periodos transitorios de calentamiento y enfriamiento son más graduales y esto es seguramente debido a la radiación solar menor durante estos periodos, lo que implica que un desajuste no provoca una pérdida tan grande, junto con temperaturas menores del foco, que reduce el ritmo al cual se cede calor al ambiente.

Es posible observar también una correlación muy fuerte entre la temperatura del foco caliente y la producción eléctrica. En la figura 4.10 se ha graficado esta relación, que resulta ser lineal y que presenta un alto coeficiente de determinación de $R^2 = 0,9662$. En el apéndice F se pueden hallar más datos estadísticos sobre la relación que indican que es significativa.

Se trata de un resultado esperado, pues la generación eléctrica es instantánea y por lo tanto depende del estado instantáneo del disco, siendo la

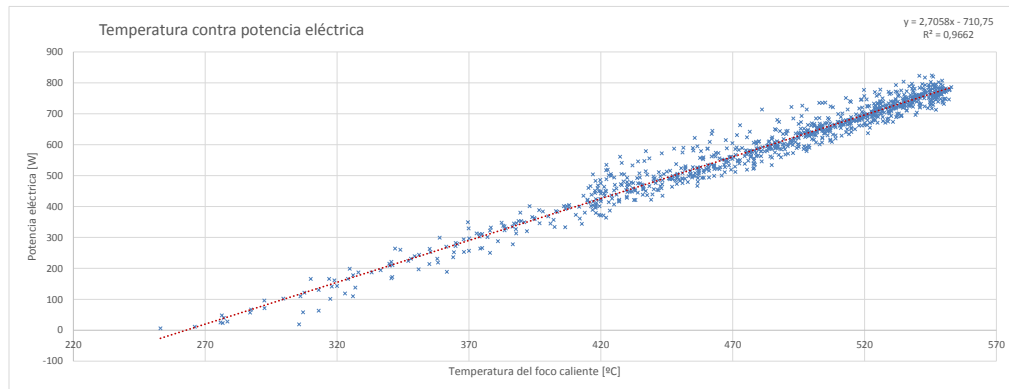


Figura 4.10: Gráfico que relaciona la producción eléctrica con la temperatura del foco caliente tomando datos del supuesto 1.

temperatura del foco caliente la más variable e importante de ellas.

En cambio, la producción térmica presenta menos sensibilidad a las fluctuaciones de temperatura, aunque sigue teniendo una influencia notable, como se puede observar en la figura 4.11, gracias a la inercia térmica del fluido refrigerante, que actúa como una especie de filtro eliminando los picos y presentando un comportamiento más constante. Por lo tanto presenta una relación menos estrecha con la temperatura del foco caliente, tal como puede observarse en las figuras 4.11 y 4.12. El coeficiente de determinación es de tan solo $R^2 = 0,2721$.

Es interesante realizar una comparación de la energía eléctrica y térmica producida en un día, ya que *INNOVA* incluyó gráficos, que pueden consultarse en el apéndice C, como muestra de la eficiencia del aparato. Así pues se han realizado cálculos para determinar la energía producida contra la irradiación solar diaria para los supuestos 1 y 2. Los resultados pueden observarse en las figuras 4.13, 4.14 y en el cuadro¹³ 4.1.

El cálculo de la energía diaria producida se llevó a cabo a partir de los datos de potencia instantánea de cada periodo. Así pues, asumiendo que la potencia indicada en el periodo es representativa para todo el periodo, suposición válida teniendo en cuenta que cada periodo es de tan solo 5 minutos, se calcula la energía E_i producida para dicho periodo según:

$$E_i = P_i \cdot 5 \cdot 60 \quad (4.25)$$

Donde P_i es la potencia, eléctrica o térmica para cada periodo. Así pues

¹³En las rectas, la variable x representa la irradiación diaria, en kWh, mientras que la variable y representa la potencia generada, según la columna, también en kWh.

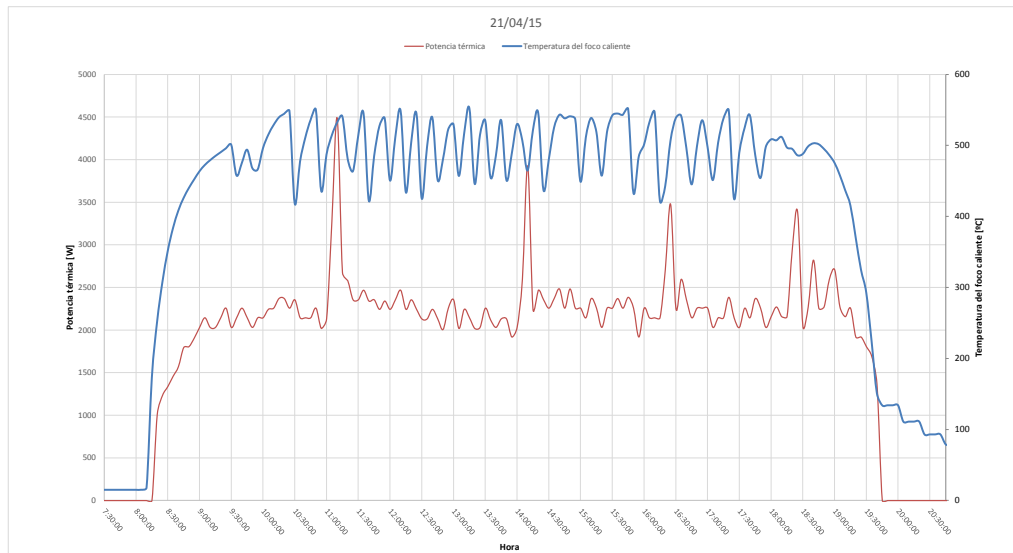


Figura 4.11: Gráfico de la generación térmica y la temperatura del foco caliente del motor Stirling para el día 21/04/15.

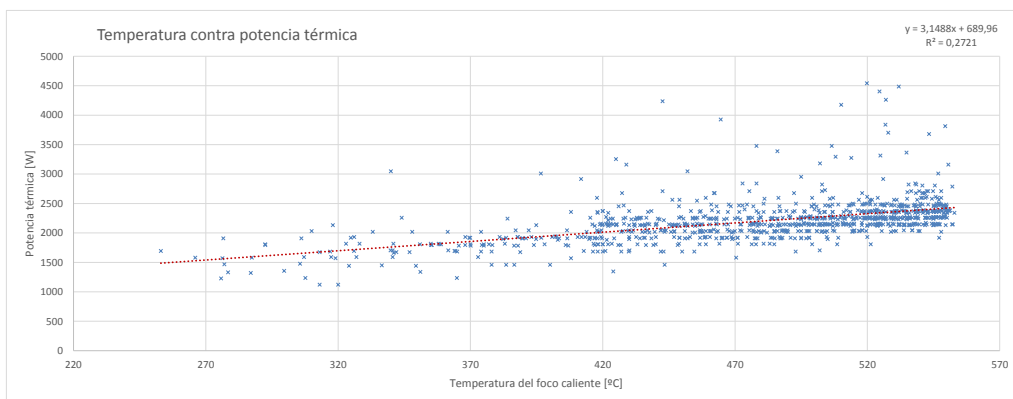


Figura 4.12: Gráfico que relaciona la producción térmica con la temperatura del foco caliente tomando datos del supuesto 1.

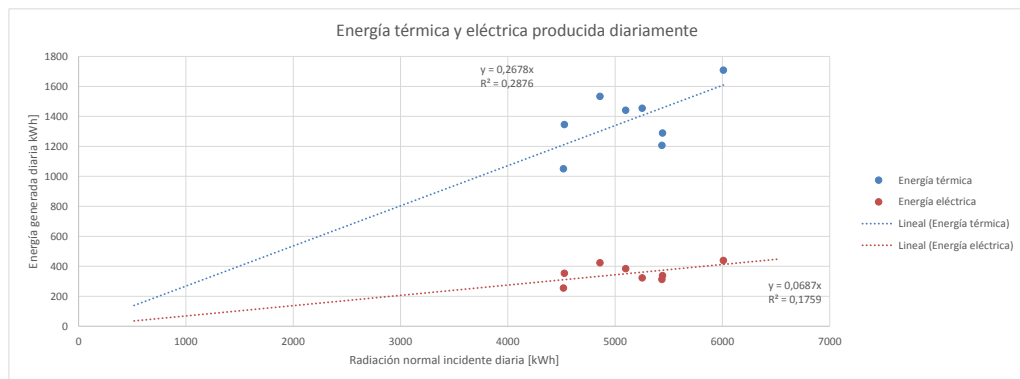


Figura 4.13: Gráfico con la producción diaria de energía térmica y eléctrica contra la radiación solar captada para el supuesto 1.

Supuesto	Recta de regresión eléctrica	R^2	Recta de regresión térmica	R^2
1	$y = 0,0687x$	0,1759	$y = 0,2678x$	0,2678
2	$y = 0,0231x$	0,0601	$y = 0,01041x$	0,0406
3	$y = 0,1247x - 1,2156$	0,9398	$0,3263x + 0,9447$	0,961

Cuadro 4.1: Rectas de regresión para la generación energética diaria según la irradiancia para cada supuesto y su coeficiente de determinación.

se obtiene la energía producida durante 5 minutos, en Julios, ya que se ha partido de vatios y solo es necesario una conversión de unidades para pasar a kWh y de esta manera poder comparar el funcionamiento con los datos proporcionados por *INNOVA*. Para la generación diaria se realiza la suma de todos los valores para ese día.

En realizar la regresión lineal de los resultados para obtener la potencia eléctrica y térmica en función de la radiación captada, se impuso la condición de que la línea de regresión debía pasar por el punto (0,0). Esta condición se impuso después de observar los resultados extrapolados anualmente de la sección 4.6 para las rectas sin dicha condición. Para cantidades de radiación moderadas, la constante de la recta de regresión dominaba sobre la componente variable, produciendo resultados con demasiado de las estimaciones de *INNOVA*. Se consideró que esta condición adicional era lógica, puesto con una irradiación nula no debería obtenerse generación, y los resultados obtenidos parecen ser más favorables que los originales.

Cabe destacar que los resultados obtenidos para los supuestos 1 y 2 no son del todo representativos, ya que el primero dispone de muestras insuficientes y el segundo de muchos datos de funcionamiento anómalo, por lo que descri-

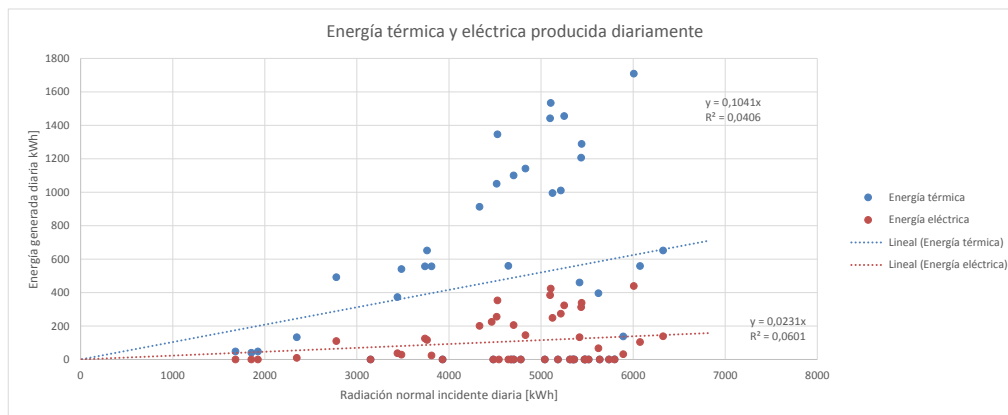


Figura 4.14: Gráfico con la producción diaria de energía térmica y eléctrica contra la radiación solar captada para el supuesto 2.

bir la solución en función de la recta de regresión resulta poco preciso. Sin embargo, y a la luz de los resultados expuestos en la sección 4.6, los datos se consideran si no totalmente fiables, prometedores, pues guardan relación con la aproximación expuesta por *INNOVA*, sobre todo en el caso del supuesto 1, y muestran los comportamientos esperados, explicados en más detalle en dicha sección.

Es difícil estimar el funcionamiento del disco según los diferentes supuestos partiendo de las rectas de regresión expuestas en el cuadro 4.1 a primera vista. Sin embargo, los efectos se volverán evidentes en la sección 4.6, en la cual se han extrapolado los resultados aquí obtenidos para aproximar el rendimiento durante un año de servicio y ofrece una oportunidad más clara para la comparación.

4.5.2. Estudio de otros parámetros relacionados

Con el objetivo de descubrir más variables del disco Stirling relacionadas entre sí, en adición a las ya expuestas anteriormente, se construyó una matriz de coeficientes de correlación, que puede consultarse en el apéndice E. Esta matriz fue elaborada mediante datos del supuesto 1. Los resultados fueron los siguientes¹⁴:

- La elevación solar está relacionada con la elevación del disco Stirling.¹⁵

¹⁴Se consideraron correlaciones significativas aquellas con un coeficiente de correlación superior a 0.95 o inferior a -0.95.

¹⁵Este resultado era esperado, pero interesa saber cuánto se ajusta la orientación del disco a la posición real del Sol, lo mismo ocurre para el caso de la acimut solar.

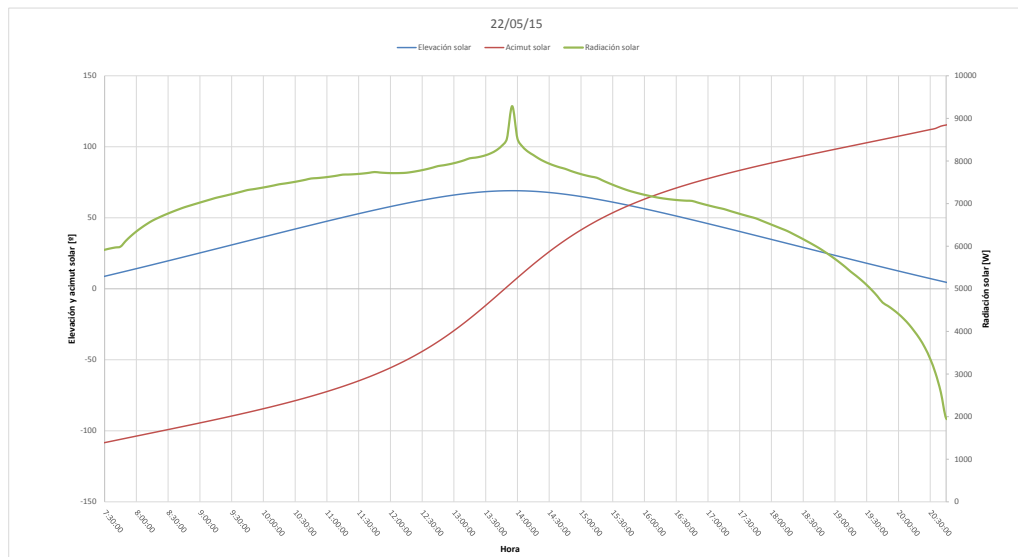


Figura 4.15: Gráfico con la elevación y acimut solares para el día 22/05/15 contra la radiación directa neta captada.

- La acimut solar está relacionada con la acimut del disco Stirling.
- La radiación global solar está relacionada con la elevación solar.
- La potencia eléctrica está relacionada con la temperatura del foco caliente.

Los resultados no aportaron relaciones desconocidas, pero ayudaron a evaluar la precisión de seguimiento solar del disco, que puede consultarse en el apéndice F y que resultó ser bastante precisa.

En la figura 4.15 se ha ilustrado la relación entre la elevación solar y la radiación solar. La fuerte correspondencia es debido al aumento de radiación a medida que el Sol asume su posición más elevada. Por otra parte, la acimut sigue aumentando a lo largo del día, aunque disminuya la radiación, por lo que no ha salido reflejada en la matriz de correlación, aunque si esté fuertemente ligada a ella, pues la elevación y la acimut están íntimamente relacionadas.

4.5.3. Seguimiento solar

Como se ha observado en la sección 4.5.1 con la producción eléctrica, una buena orientación del disco es crucial para un funcionamiento óptimo, por lo que es de gran interés el estudio de la orientación del disco.

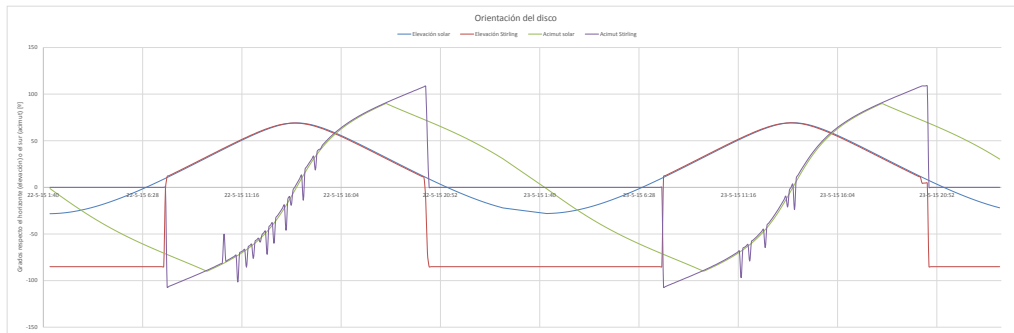


Figura 4.16: Gráfica con la evolución temporal de la acimut y la elevación solar y del disco Stirling para un intervalo de dos días, del 22/05/15 al 23/05/15. Es importante tener en cuenta que la acimut solar presenta errores explicados en el texto.

Como se ha adelantado anteriormente, el seguimiento solar resultó ser bastante favorable. En la figura 4.16 se puede observar una comparación entre la elevación y acimut solares y las del disco Stirling para un periodo de dos días. Cabe destacar que la acimut presenta un error de cálculo para ciertas horas, cuando parece separarse de la acimut del disco Stirling, no es un comportamiento correcto. El error es probablemente debido al trato de la hoja de cálculo con respecto a tiempo negativo, pero el valor de la acimut no es utilizado en ningún otro cálculo posterior y se ha comprobado mediante datos externos [21] que el seguimiento de la acimut del disco es más que satisfactoria.

De mucho más interés son los picos presentes en la acimut, mientras la solar y la del disco se siguen. Estos picos son debidos al disco detectando una temperatura del foco caliente demasiado elevada y desalineándose intencionadamente con tal de reducir la temperatura.

Por lo demás cabe señalar que el seguimiento solar es bueno.

4.5.4. Rendimiento

Basado en los datos suministrados por *INNOVA*, el rendimiento global esperado es de un 55 %, estando este compuesto por un 41.4 % de rendimiento térmico y un 13.8 % de rendimiento eléctrico. Se evaluaron los supuestos 1 y 2 y los resultados se pueden consultar en el cuadro 4.2.

Como era esperado, los datos experimentales muestran un rendimiento inferior al promocionado. Sin embargo, y sobre todo en el caso del supuesto 1, los rendimientos obtenidos son aceptables, llegando al 80.8 % del valor propuesto por *INNOVA* en cuanto a la producción térmica.

Supuesto	Rendimiento eléctrico [%]	Rendimiento térmico [%]	Rendimiento global [%]
1	8.7	33.5	42.2
2	6.0	30.2	36.3
3	13.8	41.4	55.0

Cuadro 4.2: Desglose de rendimientos medios para cada uno de los supuestos.

La generación eléctrica sufre más, con un rendimiento del 63.0 % respecto el ideal de *INNOVA*, lo cual baja el rendimiento global del supuesto 1 a un 76.6 % del rendimiento global ideal.

El supuesto 2 se comporta de manera muy similar, aunque con valores aún menores.

Como rendimiento se ha definido la fracción de potencia útil con respecto a la potencia captada. Así pues, el cálculo del rendimiento térmico η_T y eléctrico η_E se calculó de la siguiente manera:

$$\eta_T = \frac{P_T}{R_N} \quad (4.26)$$

$$\eta_E = \frac{P_E}{R_N} \quad (4.27)$$

Donde P_T y P_E son las potencia térmica y eléctrica generadas, respectivamente y R_N es la radiación neta captada. De esta manera, el rendimiento global η_G es simplemente la suma de los rendimientos parciales:

$$\eta_G = \eta_T + \eta_E \quad (4.28)$$

Aún no apareciendo una fuerte correlación entre los rendimientos y otras variables, por su naturaleza, se consideró oportuno graficar el rendimiento eléctrico contra la temperatura del foco caliente para el supuesto 1. El resultado puede observarse en la figura 4.17. Con un coeficiente de determinación R^2 de 0,7254, no cumple las especificaciones expuestas anteriormente, es menor de 0.95 y mayor que -0.95. Sin embargo, dado el rango limitado de datos disponibles del supuesto 1 y la naturaleza de los datos, se decidió incluir la relación en este informe con la intención de señalar una relación posible para futuros estudios. La relación se ajusta mejor a una relación logarítmica.

En cuanto al rendimiento térmico para el supuesto 1, presenta una correlación mucho más floja, tal como se puede observar en la figura 4.18.

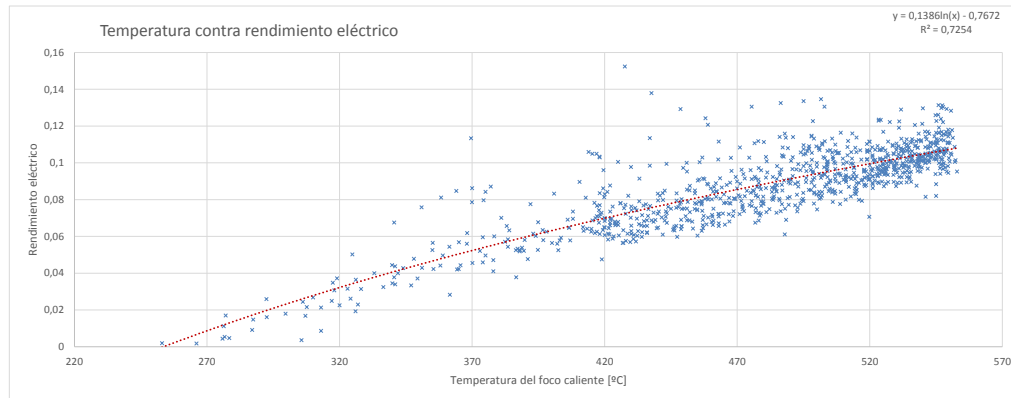


Figura 4.17: Gráfico del rendimiento eléctrico contra la temperatura del foco caliente. Datos del supuesto 1.

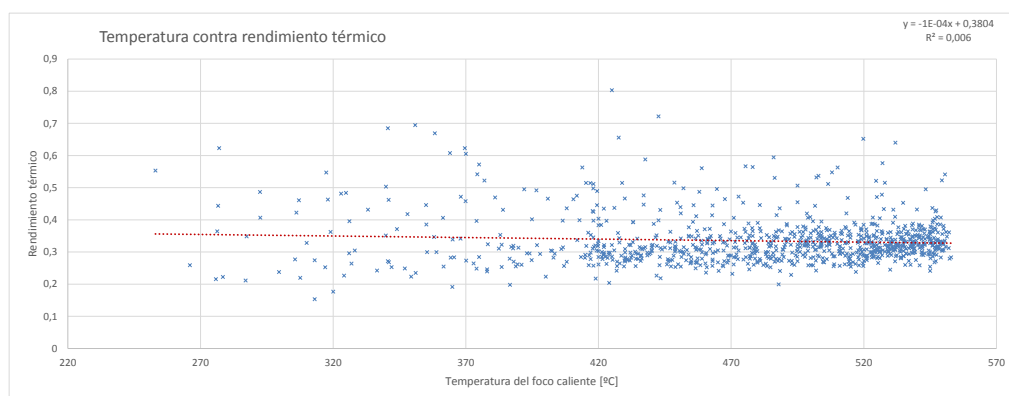


Figura 4.18: Gráfico del rendimiento térmico contra la temperatura del foco caliente. Datos del supuesto 1.

Mes	$\overline{H}[kJ/día \cdot m^2]$	\overline{K}_T
Enero	6196	0,44
Febrero	10006	0,5
Marzo	13606	0,51
Abril	18170	0,53
Mayo	21272	0,54
Junio	22734	0,55
Julio	22358	0,55
Agosto	18966	0,52
Septiembre	15196	0,51
Octubre	11764	0,53
Noviembre	6906	0,44
Diciembre	5862	0,46

Cuadro 4.3: Media mensual de radiación diaria sobre una superficie horizontal, \overline{H} , y Índice de nubosidad, \overline{K}_T , para Barcelona [33].

4.6. Extrapolación anual

Partiendo de los datos analizados durante los dos meses de estudio, es necesario realizar una extrapolación para estimar el comportamiento del disco Stirling para el resto del año. Esto se realizará mediante el uso de datos tabulados de radiación [33] y utilizando el comportamiento del disco Stirling a la radiación derivado del análisis anterior para obtener un rendimiento aproximado del sistema.

Los datos de radiación utilizados se pueden encontrar en el cuadro 4.3. Estos datos no incluyen la radiación directa, por lo que se deberán realizar un seguido de cálculos previos a la información deseada.

Se tiene que la media mensual de radiación sobre una superficie inclinada viene regida según:

$$\overline{H}_T = \overline{RH} \quad (4.29)$$

donde \overline{H} es la media mensual de radiación solar sobre una superficie

horizontal y \bar{R} el cociente que relaciona los dos parámetros [33]. Esta variable se puede calcular según [33]:

$$\bar{R} = \underbrace{\left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \bar{R}_b}_{Comp.directo} + \underbrace{\left(\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right)}_{Comp.difuso} + \underbrace{\rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right)}_{Comp.reflejado} \quad (4.30)$$

En este caso \bar{H}_d es la media mensual de radiación difusa diaria sobre una superficie horizontal ρ es la reflectividad del suelo.

Sin embargo, en este estudio solo se utilizará la componente directa, pues es la única relevante para el disco Stirling.

Así pues es necesario calcular el valor de $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$ y de \bar{R}_b . Visto que se dispone del *índice de nubosidad* \bar{K}_T , es posible calcular $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$ según:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,39 - 4,027\bar{K}_T + 5,531\bar{K}_T^2 - 3,108\bar{K}_T^3 \quad (4.31)$$

y \bar{R}_b se calcula según consideraciones geométricas como:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega_{SP} + \frac{\pi}{180} \omega_{SP} \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_{SP} + \frac{\pi}{180} \omega_{SP} \sin \phi \sin \delta} \quad (4.32)$$

donde ω_{SP} es el ángulo horario correspondiente a la puesta de Sol, para una superficie horizontal en este caso:

$$\omega_{SP} = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (4.33)$$

Imponiendo un valor de β nulo, se realiza el cálculo para una superficie horizontal (y R_b pasa a valer 1). De esta manera es posible conseguir la radiación media diaria para cada mes [33]. Sin embargo, es necesario orientar esta superficie para estar siempre mirando al sol y así conseguir la radiación equivalente a la observada por el disco.

Una manera de conseguir esto es mediante la ecuaciones 4.16 y 4.17, utilizando la elevación mediana para cada mes.

Por último, se calculan la potencia captada al multiplicar el resultado por la superficie de captación neta.

De esta manera, con la radiación diaria es posible extrapolar la producción térmica y eléctrica para cada uno de los supuestos. Estos datos han sido representados en las figuras 4.19, 4.20 y 4.21.

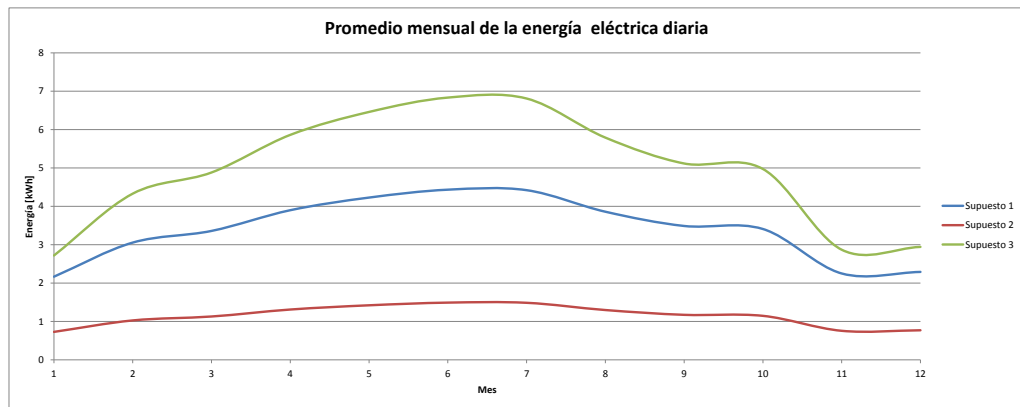


Figura 4.19: Gráfico de la producción de energía eléctrica diaria para los tres supuestos.

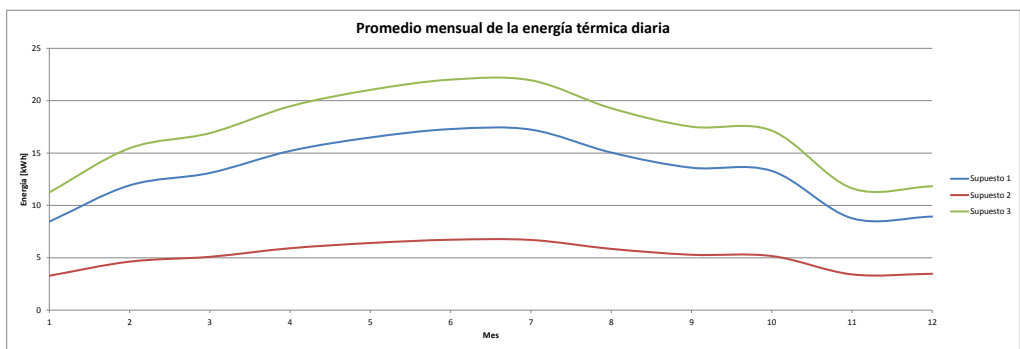


Figura 4.20: Gráfico de la producción de energía térmica diaria para los tres supuestos.

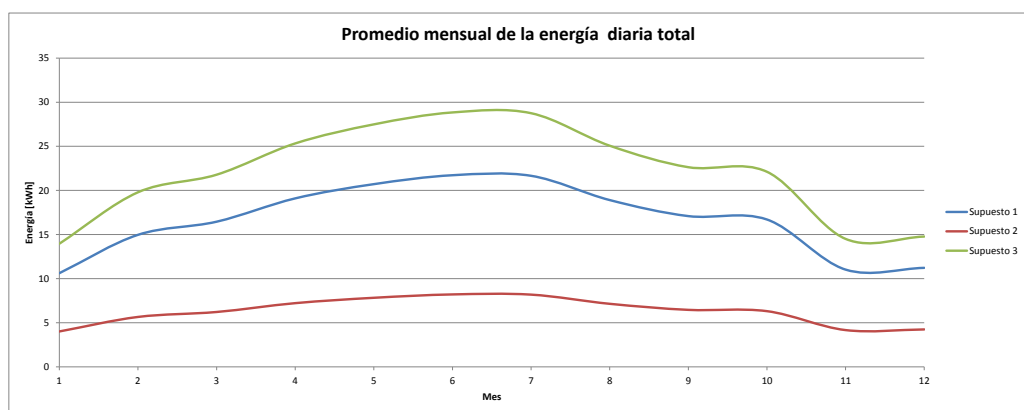


Figura 4.21: Gráfico de la producción de energía total diaria para los tres supuestos.

Los resultados son sorprendentes en el caso del supuesto 1, que no parece alejarse demasiado de las proyecciones de *INNOVA*, sobre todo en la generación térmica y en el comportamiento general, aunque no llegue a las cotas de producción esperadas. Con una muestra tan pequeña de días válidos, es notable tal aproximación e indica seguramente que la producción especificada por *INNOVA* es posible si se llegan a solucionar los problemas que plagan el disco. La generación eléctrica ha sido muy inferior a la promocionada.

El rendimiento actual, del supuesto 2, es muy insuficiente comparado con lo que podría llegar a producir y sin duda tendrá repercusiones graves en la rentabilidad del proyecto si estos problemas no se solucionan de manera inmediata.

Capítulo 5

Análisis económico y rentabilidad

En este capítulo se analizarán económicamente los datos obtenidos en la extrapolación anual de la producción de los tres supuestos con tal de pronosticar la rentabilidad del proyecto y si viabilidad como una opción efectiva de producción.

Se determinará la viabilidad económica del proyecto aplicando métodos de valoración de proyectos de inversión generalmente aceptados siguientes:

El valor actual neto (VAN):

Definido como el valor actualizado de la corriente de los flujos de caja que una inversión promete generar a lo largo de su vida [53]. Su cálculo se desarrolla de la siguiente forma: en primer lugar se efectúa el cálculo del valor actualizado de todos los flujos de caja esperados para cada periodo del estudio, a partir de un tipo de descuento, que representa el coste de oportunidad del capital [53]. Entonces se realiza la suma de todos los valores actualizados y se resta el valor de la inversión inicial, tal que la fórmula es la siguiente [53]:

$$VAN = -A + \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+k)^j} \quad (5.1)$$

Donde A es el valor de la inversión inicial, k el tipo de descuento, j el periodo y FC_j el flujo de caja esperado para el periodo j .

Así pues una inversión rentable presentará un VAN positivo, ya que la suma de los flujos de caja actualizados superaría entonces el valor del desembolso inicial. Ya que indica el valor que se creará o destruirá al

realizar la inversión, sirve para poder comparar diferentes oportunidades, siendo la más favorable aquella con el *VAN* más elevado [53].

La tasa interna de rendimiento (TIR):

Definido como la tasa de descuento para la cual el proyecto de inversión tendría un *VAN* nulo [53]. Si el valor es menor que el tipo de descuento de la inversión, el proyecto generará menos valor que lo que generaría una inversión igual en el mercado financiero [53].

El plazo de recuperación:

Definido como *el tiempo que se tarda en recuperar el desembolso inicial realizado en una inversión* [53]. Este criterio valora la liquidez por encima de la rentabilidad, ya que serán preferibles aquellos proyectos que tengan un plazo inferior [53]. Un uso común de este criterio a la hora de elegir entre diferentes oportunidades de inversión es el de filtrar aquellos proyectos con un plazo de recuperación más elevado a aquel impuesto por la dirección [53].

Todos los métodos mencionados se basan en la corriente de flujos monetarios (positivos y negativos) que el proyecto generará en el futuro, por lo que esta será la primera labor a realizar: determinar dichos flujos monetario a lo largo de la vida del proyecto.

5.1. Condiciones del estudio

A efectos de determinar dichos flujos se han realizado los siguientes datos, hipótesis y estimaciones:

1. Plazo de estudio del proyecto: El horizonte de la inversión se calcula en 15 años, pues esta es la vida útil estimada del motor Stirling del disco, que se puede extender al disco en su totalidad [22]. Puede parecer algo corta en comparación con otros discos Stirling, como el *Eurodish* y el *Distal*, con una vida útil de aproximadamente 35 años [39].
2. Inversión inicial: 43.580,01 euros, de acuerdo con el documento de presupuesto del disco Stirling elaborado por la escuela y con el mantenimiento inicial incluido.
3. Flujo de gastos, de acuerdo con el presupuesto elaborado:
 - a) Mantenimiento inicial: 1089 euros, IVA incluido.

- 

En cuanto a la tasa de descuento necesaria para actualizar, de acuerdo con los métodos de valoración a utilizar, los flujos monetarios anuales obtenidos, se ha considerado:

- Como tipo de interés sin riesgo, se ha considerado el equivalente a los bonos del estado a 10 años para mayo de 2015, de valor 1.64 % [27].
- Como prima de riesgo se ha considerado un 100 % de la tasa sin riesgo.

Así pues, la tasa de descuento final es de un 3.28 %.

5.2. Perspectivas económicas

Para cada uno de los supuestos, se ha analizado un horizonte de 15 años, dividido en periodos de 1 año, según las hipótesis y condiciones expuestas anteriormente, los flujos monetarios actualizados que se obtienen son los siguientes:

5.2.1. Supuesto 1

Recordamos que este supuesto tiene en cuenta que el disco funciona tal como lo ha hecho en los días sin incidentes. Las perspectivas de flujo monetario se pueden consultar en el cuadro 5.1. En cuanto al *VAN* y *TIR*, los valores que adoptan para este supuesto son los siguientes:

- *VAN*: -40835,7172
- *TIR*: -22 %

Por lo que el proyecto es claramente no rentable a 15 años. En la figura 5.1 se puede observar cómo, después de la inversión inicial, el valor actualizado se empieza a recuperar, aunque nunca llega a ser negativo. Esto es debido, tal como muestra la figura 5.2, a que, aunque los cobros sean superiores a los pagos para cada periodo, la diferencia es mínima en comparación con la inversión inicial y esta nunca se llega a cubrir en el horizonte estudiado.

5.2.2. Supuesto 2

Recordamos que este supuesto tiene en cuenta que el disco funciona tal como lo ha hecho desde que se tienen datos. Esto incluye días con errores, anomalías y días sin producción. Las perspectivas de flujo monetario se pueden consultar en el cuadro 5.2. En cuanto al *VAN* y *TIR*, los valores que adoptan para este supuesto son los siguientes:

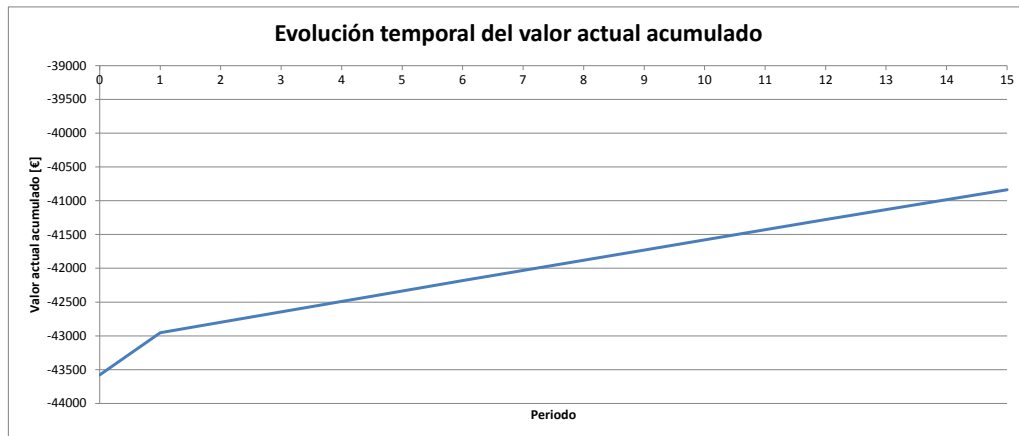


Figura 5.1: Gráfico de la evolución temporal del valor actual total acumulado durante el horizonte de inversión para el supuesto 1. El eje vertical utiliza una escala logarítmica.

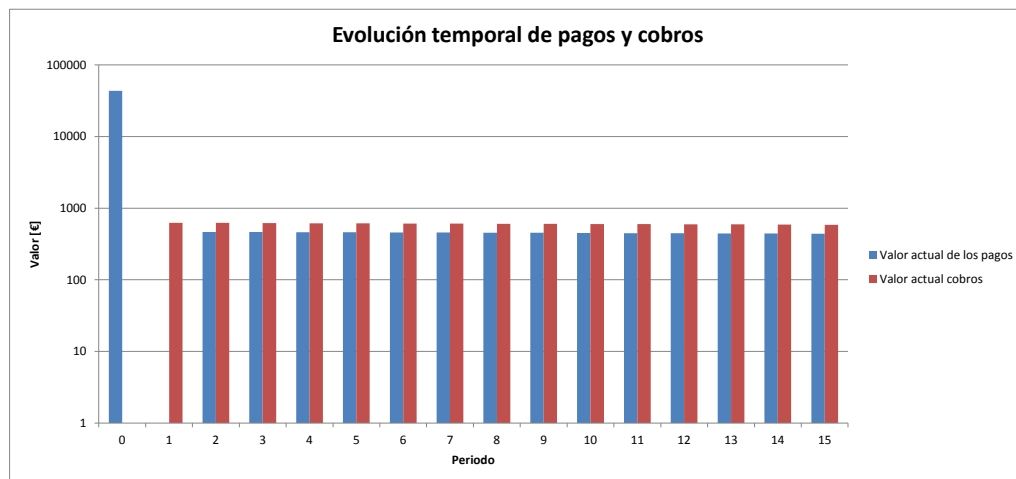


Figura 5.2: Gráfico de la evolución temporal de pagos y cobros actualizados durante el horizonte de inversión para el supuesto 1.

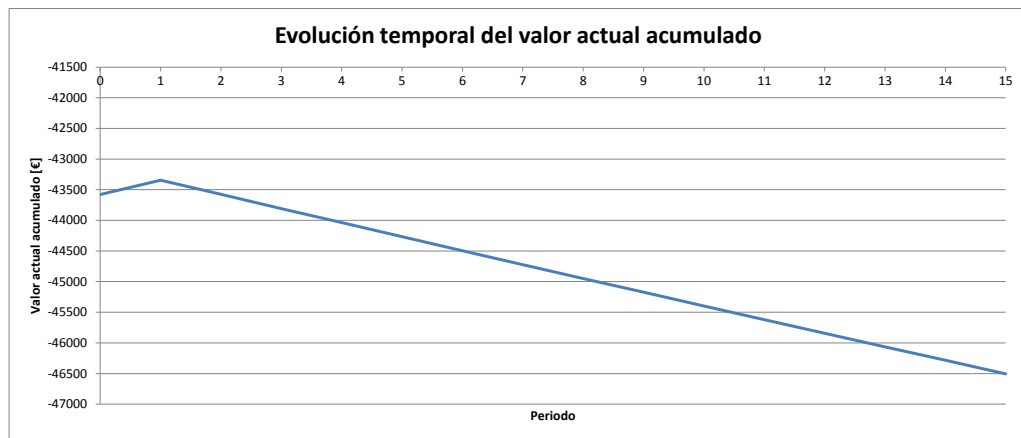


Figura 5.3: Gráfico de la evolución temporal del valor actual total acumulado durante el horizonte de inversión para el supuesto 2. El eje vertical utiliza una escala logarítmica.

- *VAN*: -46504,68702
- *TIR*: No disponible.

Este supuesto tampoco resulta rentable. Es más, tal como se puede apreciar en la figura 5.3, el valor actualizado cada vez es más negativo, ya que la producción no cubre el mantenimiento del disco, figura 5.4, y el *VAN* nunca llega a valer 0, por lo que este supuesto no dispone de *TIR*. Esta inversión nunca sería rentable, ni a tiempo infinito. Dado que este es el comportamiento actual del disco, es muy preocupante.

5.2.3. Supuesto 3

Recordamos que este supuesto tiene en cuenta que el disco funciona tal como ha especificado *INNOVA*, el fabricante, por lo que se considera un caso muy favorable. Las perspectivas de flujo monetario se pueden consultar en el cuadro 5.1. En cuanto al *VAN* y *TIR*, los valores que adoptan para este supuesto son los siguientes:

- *VAN*: -37852,18462
- *TIR*: -17 %

El proyecto sigue sin ser rentable a 15 años, aunque dispone de mejores perspectivas que en el supuesto 1. Tal como se puede observar en las figuras

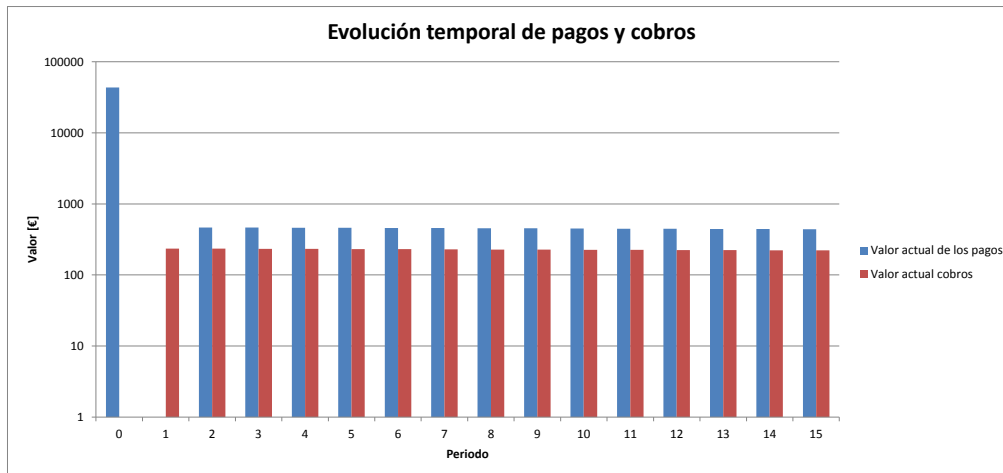


Figura 5.4: Gráfico de la evolución temporal de pagos y cobros actualizados durante el horizonte de inversión para el supuesto 2.

5.5 y 5.6, sufre los mismos problemas que el primer supuesto, pero con producciones, y por lo tanto, cobros mayores, lo que hace que disponga de un *VAN* y *TIR* ligeramente mejores.

Cabe destacar que un *TIR* negativo implica que para ser equilibrado económicamente o rentable, serían necesarias ayudas de la administración, vía subvenciones, apoyos fiscales, etc. Este caso se da con el disco Stirling *TRINUM*, en Italia, donde está asentada la compañía *INNOVA*, por lo que la viabilidad económica en el país podría ser posible [7].

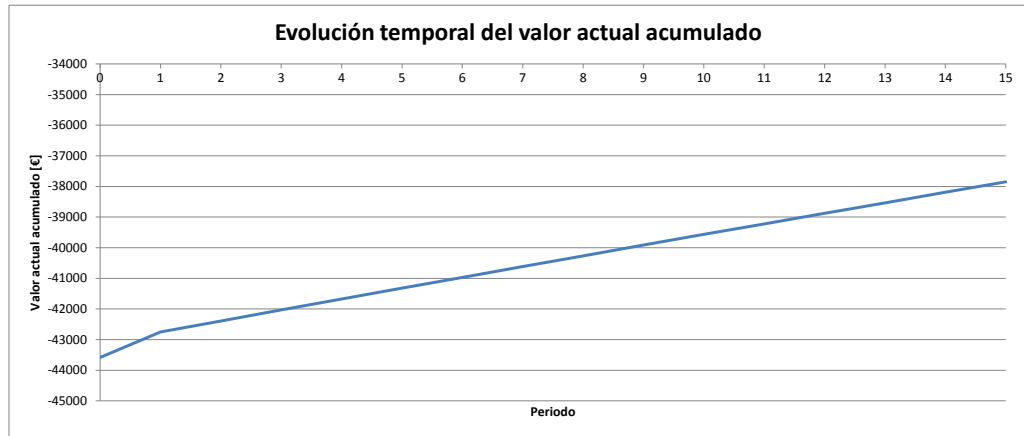


Figura 5.5: Gráfico de la evolución temporal del valor actual total acumulado durante el horizonte de inversión para el supuesto 3. El eje vertical utiliza una escala logarítmica.

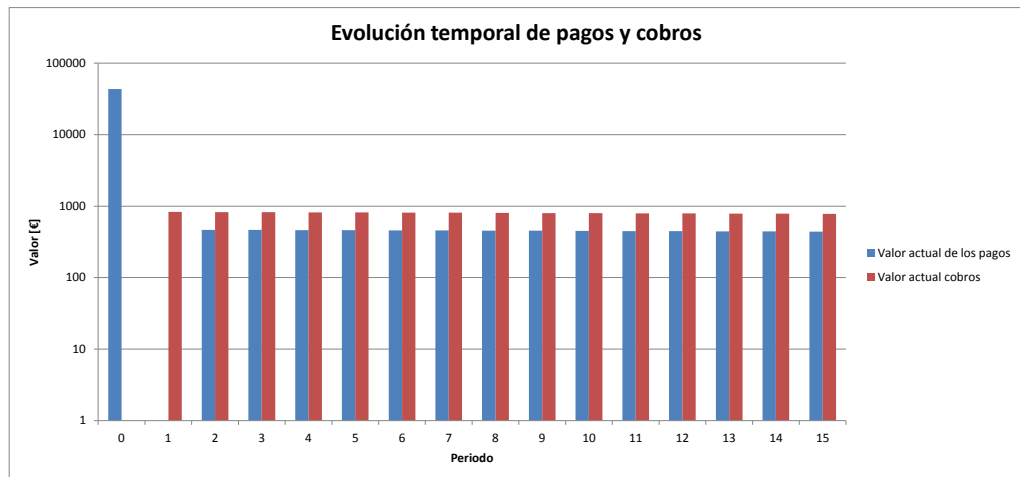


Figura 5.6: Gráfico de la evolución temporal de pagos y cobros actualizados durante el horizonte de inversión para el supuesto 3.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Pagos																
Inversión inicial	42491															
Mantenimiento anual	1089		498	512	526	541	557	572	589	605	622	640	658	677	696	716
Sustitución de piezas							0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total pagos	43580	0	498	512	526	541	557	572	589	605	622	640	658	677	696	716
Valor actual de los pagos	43580	0	467	465	463	461	459	457	455	453	451	449	447	445	443	441
Cobros																
Térmicos		499	513	527	542	558	573	590	606	623	641	659	678	697	717	737
Eléctricos		147	151	155	160	164	169	174	179	184	189	194	200	205	211	217
Total cobros		645	664	683	702	722	742	763	785	807	830	854	878	903	928	954
Valor actual cobros	0	625	622	620	617	614	612	609	606	604	601	598	596	593	591	588
Saldo	-43580	645	166	171	176	181	186	191	196	202	208	214	220	226	232	239
Valor actual	-43580	625	156	155	154	154	153	152	152	151	150	150	149	148	148	147
Acumulado	-43580	-42955	-42799	-42644	-42490	-42336	-42183	-42031	-41879	-41728	-41578	-41428	-41279	-41131	-40983	-40836

Cuadro 5.1: Perspectivas de flujos de caja para el supuesto 1

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Pagos																
Inversión inicial	42491															
Mantenimiento anual	1089		498	512	526	541	557	572	589	605	622	640	658	677	696	716
Sustitución de piezas							0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total pagos	43580	0	498	512	526	541	557	572	589	605	622	640	658	677	696	716
Valor actual de los pagos	43580	0	467	465	463	461	459	457	455	453	451	449	447	445	443	441
Cobros																
Térmicos		194	199	205	211	217	223	229	236	242	249	256	264	271	279	287
Eléctricos		49	51	52	54	55	57	58	60	62	64	65	67	69	71	73
Total cobros		243	250	257	264	272	280	288	296	304	313	322	331	340	350	360
Valor actual cobros	0	235	234	233	232	231	230	229	228	227	226	225	225	224	223	222
Saldo	-43580	243	-248	-255	-262	-269	-277	-285	-293	-301	-310	-318	-327	-337	-346	-356
Valor actual	-43580	235	-232	-231	-230	-229	-228	-227	-226	-225	-224	-223	-222	-221	-220	-219
Acumulado	-43580	-43345	-43577	-43808	-44038	-44267	-44495	-44722	-44949	-45174	-45398	-45621	-45844	-46065	-46285	-46505

Cuadro 5.2: Perspectivas de flujos de caja para el supuesto 2

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Pagos																
Inversión inicial	42491															
Mantenimiento anual	1089		498	512	526	541	557	572	589	605	622	640	658	677	696	716
Sustitución de piezas							0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total pagos	43580	0	498	512	526	541	557	572	589	605	622	640	658	677	696	716
Valor actual de los pagos	43580	0	467	465	463	461	459	457	455	453	451	449	447	445	443	441
Cobros																
Térmicos		643	661	680	699	719	739	760	782	804	827	850	874	899	924	951
Eléctricos		214	220	227	233	240	246	253	261	268	276	283	291	300	308	317
Total cobros		857	881	906	932	959	986	1014	1042	1072	1102	1134	1166	1199	1233	1268
Valor actual cobros	0	830	826	823	819	816	812	809	805	802	798	795	791	788	785	781
Saldo	-43580	857	384	395	406	417	429	441	454	467	480	493	507	522	537	552
Valor actual	-43580	830	360	358	357	355	354	352	351	349	348	346	345	343	342	340
Acumulado	-43580	-42750	-42390	-42032	-41675	-41320	-40967	-40615	-40264	-39915	-39567	-39221	-38877	-38534	-38192	-37852

Cuadro 5.3: Perspectivas de flujos de caja para el supuesto 3

Capítulo 6

Conclusiones y predicciones de futuro

La tecnología de disco Stirling es un concepto muy prometedor, ofreciendo, en la teoría, una solución de producción muy eficiente. Sin embargo, esta promesa se ve gravemente lastrada en la actualidad por el componente económico.

Los discos Stirling suponen una inversión demasiado elevada, en la actualidad, para la potencia que generan; aun siendo más eficientes que otras formas de producción, los proyectos nunca serán rentables a no ser que se abaraten los costes. Esto podría darse en el caso de una subida de la demanda, lo cual impulsaría la fabricación en masa de discos.

Sin embargo, este panorama es difícil de imaginar, viendo su rendimiento actual, por lo que serían necesarias ayudas públicas hasta alcanzar esta situación. El estudio arroja luz sobre el porqué de la difícil situación de la tecnología en los mercados.

Se trata de una tecnología nueva, por lo que aún obteniendo resultados tan decepcionantes como los revelados por este estudio, no conviene subestimarla, y el autor anima a que se realicen estudios más intensivos sobre la viabilidad de esta nueva forma de generación renovable y se impulse la investigación con el objeto de mejorar las prestaciones de los discos.

Cabe destacar que el periodo de tiempo en el que se realizó el estudio no asegura resultados fiables, ya que se ha trabajado con estimaciones poco precisas para los supuestos 1 y 2. Se sugiere que investigaciones futuras realicen el estudio sobre un periodo mínimo de un año y que se disponga de un sensor de radiación solar directa, con tal de reducir la incertidumbre alrededor de las estimaciones de radiación directa. Se recomienda también la monitorización de variables internas que puedan ser de utilidad para descubrir relaciones entre parámetros que puedan llevar a mejores diseños.

Sin embargo, y gracias a los datos ofrecidos por *INNOVA*, los resultados obtenidos de radiación parecen ser realistas, pues se encuentran en el mismo rango de valores que los suministrados en los gráficos de producción de *INNOVA*.

Se espera que el estudio sea de ayuda a futuras instigaciones sobre el tema.

Agradecimientos

Me gustaría mostrar mi agradecimiento a mi tutor, Antoni Sudria Andreu, por las sugerencias ofrecidas y la orientación prestada.

También le estoy muy agradecido a Josep Andreu Vidal Clos, por los datos del disco Stirling, sus consejos y ayuda durante la realización de este trabajo.

Bibliografía

- [1] *Aeronet AEROSOL OPTICAL DEPTH* [en línea]. Disponible en Web: «http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/Documents/» [Consulta: 2015-05-23].
- [2] *AERONET Aerosol robotic network* [en línea]. Disponible en Web: «http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/data.html» [Consulta: 2015-05-22].
- [3] *Aerosol Angstrom Exponent: GES DISC Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center* [en línea]. Disponible en Web: «<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/data-holdings/PIP/>» [Consulta: 2015-05-23].
- [4] *Bonifacio Sotos: Precios energía térmica en España 2014* [en línea]. Disponible en Web: «<http://tecnologiabsotos.blogspot.com.es/2014/03/precios-energia-termica-en-espana-2014.html>» [Consulta: 2015-07-02].
- [5] *Cálculo de variaciones del Índice de Precios de Consumo (sistema IPC base 2011)* [en línea]. Disponible en Web: «<http://www.ine.es/varipc/verVariaciones.do>» [Consulta: 2015-06-30].
- [6] *Concentrating Solar Power Systems CSPInnova* [en línea]. Disponible en Web: «<http://www.innova.co.it/eng/>» [Consulta: 2015-03-27].
- [7] *Conto Termico: l'Incentivo per il solare / Innova* [en línea]. Disponible en Web: «<http://www.innova.co.it/incentivi/incentivi.html>» [Consulta: 2015-07-01].
- [8] *Electric Scotland: Robert Stirling* [en línea]. Disponible en Web: «http://www.electricscotland.com/history/men/stirling_robert.htm» [Consulta: 2015-03-17].

- [9] *GeoHack - Barcelona* [en línea]. Disponible en Web: «<http://tools.wmflabs.org/geohack>» [Consulta: 2015-05-15].
- [10] *Il Solare Termodinamico Italiano di V. Brignoli - Le tecnologie dei generatori dish - Stirling* [en línea]. Disponible en Web: «[http://www.solarthermalpower.it/Le tecnologie degli impianti dish Stirling 1.htm](http://www.solarthermalpower.it/Le_tecnologie_degli_impianti_dish_Stirling_1.htm)» [Consulta: 2015-04-01].
- [11] *meteo.cat Mesura de la radiació solar global* [en línea]. Disponible en Web: «<http://www.meteo.cat/wpweb/divulgacio/estacions-meteorologiques-automatiques/funcionament-ema/mesura-de-la-radiacio-solar-global/>» [Consulta: 2015-05-13].
- [12] *Ohio University Stirling Cycle Machine Analysis (updated 3/30/2013)* [en línea]. Disponible en Web: «<http://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/engines.html>» [Consulta: 2015-05-11].
- [13] *Plataforma Solar de Almería - Objetivos* [en línea]. Disponible en Web: «<http://www.psa.es/webesp/gen/objetivos.php>» [Consulta: 2015-04-01].
- [14] *Plataforma Solar de Almería: DISCOS PARABÓLICOS* [en línea]. Disponible en Web: «<https://www.psa.es/webesp/instalaciones/discos.php>» [Consulta: 2015-04-01].
- [15] *Precio de la electricidad 2014 Eficiencia Energética - CNomys* [en línea]. Disponible en Web: «<http://www.cnomys.es/blog/como-fue-el-precio-de-la-electricidad-en-2014-y-como-empieza-2015/>» [Consulta: 2015-07-02].
- [16] *Radioisotope Power Systems (RPS) Program / Advanced Stirling Convertor* [en línea]. Disponible en Web: «<https://tec.grc.nasa.gov/rps/advanced-stirling-convertor/>» [Consulta: 2015-05-11].
- [17] *Real Academia de Ingeniería: Coeficiente de turbidez de Angström* [en línea]. Disponible en Web: «<http://diccionario.raing.es/es/lema/coeficiente-de-turbidez-de-%C3%A5ngstrom>» [Consulta: 2015-05-25].

- [18] *Scottish Engineering Hall of Fame: Robert Stirling* [en línea]. Disponible en Web: «<http://www.engineeringhalloffame.org/profile-stirling.html>» [Consulta: 2015-03-17].
- [19] *Solaripedia: Solar One and Two* [en línea]. Disponible en Web: «<http://www.solaripedia.com>» .
- [20] *Space - ASC - Sunpower Inc.* [en línea]. Disponible en Web: «<http://sunpowerinc.com/>» [Consulta: 2015-05-11].
- [21] *SunEarthTools* [en línea]. Disponible en Web: «http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es» [Consulta: 2015-03-30].
- [22] “Trinum technical report”. *INNOVA*. .
- [23] “Trinium Assembly Manual”. *INNOVA*. 2012, .
- [24] “Low-Cost, Lightweigh Solar Concentrators”. *SunShot U.S. Department of Energy y California Institute of Technology*. 2013, .
- [25] “Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios”. *Ministerio de Presidencia*. 2013, .
- [26] “Presentación INNOVA”. *INNOVA*. 2014, .
- [27] *1.2 ESPAÑA. INDICADORES FINANCIEROS. SERIES DIARIAS 30-Junio-2015* [en línea]. 2015. Disponible en Web: «www.bde.es/webbde/es/estadis/infoest/si_1_2.pdf» [Consulta: 2015-06-30].
- [28] Aguiar, R, Collares Pereira, M et al.. *Solar energy: The state of the art: ISES position papers*. Gordon, Jeffrey1a ed. London: James & James (Science publishers), 2001. ISBN: 1-902916-23-9.
- [29] Álvarez Flórez, Jesús Andrés, Callejón Agramunt, Ismael et al.. *Máquinas térmicas motoras - 2*. Álvarez Flórez, Jesús Andrés y Callejón Agramunt, Ismaella ed. Barcelona: Edicions UPC, 2002. ISBN: 84-8301-645-1.
- [30] Álvarez Flórez, Jesús Andrés, Callejón Agramunt, Ismael et al.. *Máquina térmicas motoras - 1*. Álvarez Flórez, Jesús Andrés y Callejón Agramunt, Ismael2a ed. Barcelona: Edicions UPC, 2009. ISBN: 978-84-8301-644-2.

- [31] Bechtel, Ryan. *Advanced Stirling Radioisotope Generator*. Cleveland: NASA Department of Energy, Radioisotope Power Systems Program, .
- [32] Bielsa Andolz, Javier. *Cálculo y diseño de un motor lineal tubular de imanes permanentes*. 2003. Universitat Rovira i Virgili.
- [33] Casals, Martí Rosas y Garreta, Jaime Cendra. *Energia Solar Tèrmica*. 3a ed. Edicions UPC, 2013. ISBN: 978-8-476539-78-1.
- [34] Deign, Jason. *What happened to Tessera Solar's projects?* [en línea]. 2011. Disponible en Web: «<http://social.csptoday.com/markets/what-happened-tessera-solars-projects>» [Consulta: 2015-02-23].
- [35] Deign, Jason. *The trouble with dish Stirling CSP* [en línea]. 2012. Disponible en Web: «<http://social.csptoday.com/technology/trouble-dish-stirling-csp>» [Consulta: 2015-02-23].
- [36] DeMeo, E. A y Galdo, J. F. *Renewable Energy Technology Characterizations*. TR-109496 Topical Report, U.S. DOE-Washington y EPRI, 1997. .
- [37] Duffie, John A y Beckman, William A. *Solar engineering of thermal processes*. 3a ed. New Jersey: John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-471-69867-8.
- [38] EASAC, . *Concentrating solar power: its potential contribution to a sustainable energy future*. 2011. .
- [39] Esteve, Jordi Gual. *Disseny d'un captador solar d'alta temperatura , amb motor Stirling i disc parabòlic Memòria , Annexes i Pressupost*. 2010. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [40] Fernández, R, Torres, J. L et al.. “Análisis de la eficiencia de distintos sistemas de seguimiento solar”. *Era Solar*. 2000, vol 101, núm. 17, .
- [41] Fraser, P. *Stirling Dish System Performance Prediction Model*. 2008. University of Wisconsin-Madison.
- [42] Hashem, Heba. *Dish Stirling for Dubai?* [en línea]. 2014. Disponible en Web: «<http://social.csptoday.com/markets/dish-stirling-dubai>» [Consulta: 2015-02-23].
- [43] Higgins, Raymond A. *Materials for the engineering technician*. Segunda ed. London: Edward Arnold, 1987. ISBN: 0-340414-76-6.

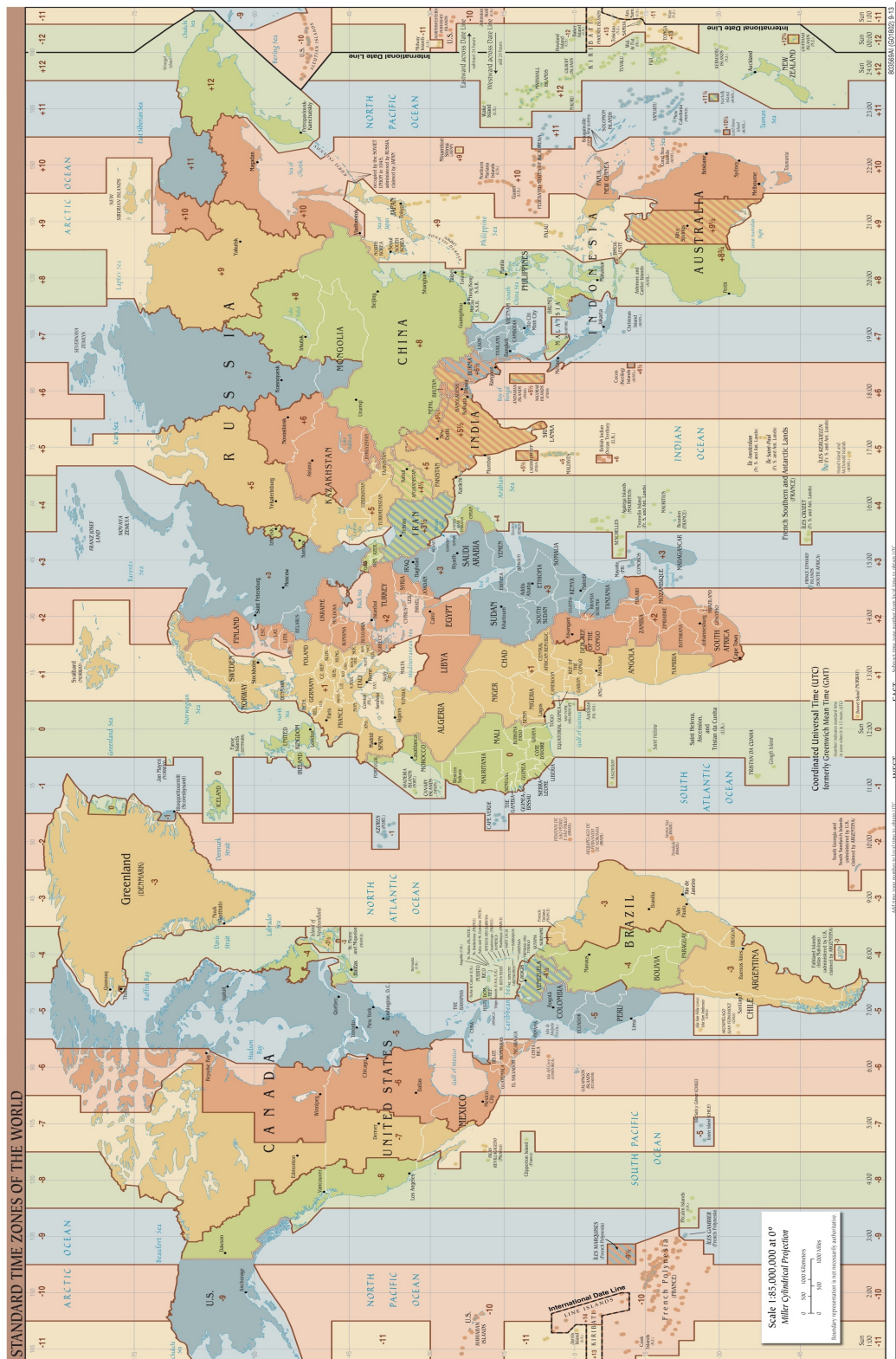
- [44] IEA, . *Technology roadmap concentrating solar power*. 2010. .
- [45] International, Greenpeace, SolarPACES, y ESTELA, . *Concentrating solar power global outlook 09*. 2009. .
- [46] International Energy Agency, . *Energy Technology Perspectives 2010: Scenarios & Strategies to 2050*. 1a ed. Paris: Soregraph, 2010. 710 p. ISBN: 978-92-64-08597-8.
- [47] Justi, Phil Eduard W. *Hidrógeno solar: energía para el futuro*. Marcombo, 1985. 375 p. ISBN: 84-267-0559-6.
- [48] Kearney, A. T y Estela, . *Solar thermal electricity 2025*. 2010. .
- [49] Lerner, Lawrence S.. *Physics for Scientists and Engineers, Volumen 2*. Jones & Bartlett Learning, 1997. 727 p. ISBN: 0763704601.
- [50] M. Ibáñez, Plana, Rosell Polo, J.R y Rosell Urutia, J.I. *Tecnología solar*. 1a ed. Madrid: Mundi-Prensa, 2005. ISBN: 84-8476-199-1.
- [51] Mann, Michael E. “Falsas esperanzas”. *Investigación y Ciencia*. 2014, núm. 453, p. 72–75.
- [52] Martini, William R.. *Stirling Engine Design Manual*. 2a ed. Washington: NASA, 1983. ISBN: NASA CR-135382.
- [53] Mascare nas, Juan. *La valoración de proyectos de inversión productivos*. 2008. Universidad Complutense de Madrid.
- [54] Masters, Jeff. “El comportamiento anómalo de la corriente en chorro”. *Investigación y Ciencia*. 2015, núm. 461, p. 52–59.
- [55] Meinel, Aden B y Meinel, Marjorie P. *Aplicaciones de la energía solar*. Aguilar Peris, José y de la Rubia Pacheco, Juan1a ed. Barcelona: Reverté, 1982. ISBN: 84-291-4199-5.
- [56] Mendoza, Sebastián. “Wref 2012 : Modeling Generation Systems From Using Solar Stirling Engines Parabolic Dishes (Solar / Dish) 2 . Description of the System”. *Wref*. 2012, p. 1–8.
- [57] Minguella, J. A y Torrens, M C. *ENERGIA SOLAR: manual de INSTALACIONES TERMICAS*. 1a ed. Barcelona: Ed. CEYSA, 1982. .
- [58] Mitjá, Albert y Batalla, Enric. *Manual de radiación solar: Tablas para catalunya. Volumen I*. 1a ed. Barcelona: Prensa XXI S.A., 1982. ISBN: 84-86052-00-9.

- [59] Modest, Michael F. *Radiative heat transfer*. Amsterdam [etc.] :: Academic Press, 2003. ISBN: 0-125031-63-7.
- [60] Mundet, Anna. *Energia Solar Tèrmica (Col·lecció Quadern pràctic 3)*. 2011. .
- [61] Newton, C y A, Christopher. *Concentrated Solar Thermal Energy Systems*. 2007. The Florida State University FAMU-FSU College of Engineering.
- [62] Nocera, Daniel G y Lewis, Nathan S. “Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization”. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2007, vol 104, núm. 42, .
- [63] Prieto García, Jesús Ignacio. *Fundamentos y aplicaciones de la energía solar térmica*. 2a ed. Oviedo: Universidad de Oviedo. Servicio de Publicaciones, 1998. ISBN: 84-7468-966-X.
- [64] Ramírez Vázquez, D. José y Beltrán Vidal, D. Lorenzo. *Máquinas motorices; generadores de energía eléctrica*. 5a ed. Barcelona: ediciones ceac, 1984. ISBN: 84-329-6005-5.
- [65] Rodríguez Bravo, Yolanda. *Análisis y perspectivas de desarrollo de un sistema avanzado de generación energética de disco Stirling / Yolanda Bravo Rodríguez*. 2014. Universidad de Zaragoza.
- [66] Ruiz Hernández, V, Silvia Pérez, M. A y Lillo Bravo, I. *La electricidad solar térmica, tan lejos, tan cerca*. Fundación Gas Natural, 2009. ISBN: 978-84-613-0406-6.
- [67] Schlaich Bergermann & Partner GbR, . *EuroDish - Stirling System Description*. Stuttgart: 2001. 1–9 p. .
- [68] Schmitt, Ron. *Electromagnetics Explained: A Handbook for Wireless/RF, EMC, and High-speed Electronics*. Newnes, 2002. 75 p. ISBN: 0750674032.
- [69] Senft, James R. “Theoretical Limits on the Performance of Stirling Engines”. *International Journal of Energy Research*. 1998, vol 22, p. 991–100.
- [70] Senft, James R. *Mechanical efficiency of heat engines*. 1a ed. New York: Cambridge University Press, 2007. ISBN: 978-0-521-86880-8.

- [71] Shendage, D. J, Kedare, S. B y Bapat, S. L. *Design Issues of 1.5 kW Solar Dish Stirling Engine*. Bombay: .
- [72] Smil, Vaclav. “El lento ascenso de las renovables”. *Investigación y Ciencia*. 2014, núm. 450, p. 66–71.
- [73] Smith, T. “Concentrating Solar Power Tecnology Workshops”. *Infinia Corporation Presentation*. 2007, .
- [74] Stancich, Rikki y Guidetti, Francesco. *Innova’s dish Stirling solution to make market debut in Italy* [en línea]. 2011. Disponible en Web: «<http://social.csptoday.com/markets/innovas-dish-stirling-solution-make-market-debut-italy>» [Consulta: 2015-02-23].
- [75] Stine, W. B y Diver, R. B. *A compendium of solar dish/Stirling technology*. Albuquerque, NM, y Livermore, CA (EE.UU.): 1994. .
- [76] UNBS, . “Code of practice for solar water heating systems - Design, installation, testing, repair and maintenance”. *FDUS*. 2009, núm. 853, .
- [77] Victor, David G y Kennel, Charles F. “Es hora de abandonar el objetivo de los 2Â°C”. *Investigación y Ciencia*. 2015, núm. 462, p. 8–10.
- [78] Wagner, W y Pruß, A. “The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use”. 2014, vol 387, núm. May 2015, .
- [79] Webber, Michael E. “Un rompecabezas global”. *Investigación y Ciencia*. 2015, núm. 461, p. 78–83.
- [80] West, John B. “Robert Boyle’s landmark book of 1660 with the first experiments on rarified air.”. *Journal of applied physiology*. 2005, vol 98, núm. 1, p. 31–39.
- [81] Zhang, Yixin y Osborn, Bruce. “Solar Dish-Stirling Power Plants and Related Grid Interconnection Issues”. *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. 2007, p. 1–5.
- [82] Zweibel, Ken, Mason, James y Fthenakis, Vasilis. “Solar Grand Plan”. *Scientific American*. 2008, vol 30, núm. 1, p. 64–73.

Apéndice A

Mapa de husos horarios



Apéndice B

Condicionamiento de los datos del coeficiente de turbidez de Angström

Motivado por información sobre la estacionalidad del coeficiente de turbidez de Angström [57], se analizaron los datos obtenidos de *AERONET* con tal de descubrir tal relación.

Los datos ofertados comprendían un periodo de 11 años, del 2004 hasta el 2015. Aunque abundantes, no eran del todo consistentes, por lo que lo primero que se hizo fue eliminar del estudio todos aquellos años que no dispusieran de datos para todos los meses. De esta manera se eliminaron del estudio los años 2004, 2005, 2006, 2012, 2014 y 2015, puesto que se obtenían de esta manera dos series de datos consecutivos, los que abarcaban desde el año 2007 hasta el 2011 (ambos inclusive) y el año 2013. Se decidió prescindir del año 2013 para eliminar efectos interanuales que distorsionarían la lectura de los datos al producirse discontinuidades en la recopilación anual de la información. De esta manera quedo fijado el intervalo de estudio para los años 2007 hasta el 2011.

Se disponía de medidas para momentos irregulares del día, y no todos los días del año estaban representadas, por lo que se procedió al análisis de la media diaria para cada mes, pues de esta manera se atenúa la variabilidad presente en las mediciones, sobre todo para un periodo de estudio tan largo.

Los datos obtenidos no incluían el coeficiente de perturbación de Angström directamente, sino que contenían el exponente de Angström, una medida de la dependencia existente entre el *grueso óptico de aerosoles*¹ y la

¹Se trata de la medida de aerosoles, entendidos como contaminación, partículas de humo, polvo etc. desde el nivel del suelo hasta el techo de la atmósfera [1].

longitud de onda de la luz incidente [3]. Dado que se disponía de estos datos adicionales gracias a la misma base de datos, fue posible el cálculo del coeficiente de perturbación de Angström según la siguiente fórmula [3]:

$$\tau = \beta \lambda^\alpha \quad (\text{B.1})$$

Donde τ es el grueso óptico de aerosoles, β el coeficiente de perturbación de Angström, α el exponente de Angström y λ la longitud de onda (en micrómetros). Así pues se disponía de información sobre el grueso óptico de aerosoles para varias longitudes de onda² y se procedió a calcular el valor de β para cada uno (puesto que los parámetros de Angström son independientes de la longitud de onda) y el promedio para cada punto evaluado.

Al visualizar los datos en la figura B.1, se apreciaba claramente una cierta periodicidad de los resultados. Se sobrepusieron los datos para cada año de manera que se pudiera observar una relación entre el mes y el valor del coeficiente, tal como puede observarse en la figura 4.4. Se observa un patrón repetitivo. Así pues, se procedió a utilizar la media mensual de todos los años de estudio para el análisis de los datos de radiación solar. Estas medias se pueden consultar en el cuadro B.1.

²En este estudio, estas fueron 870 nm, 675 nm y 440 nm.



Figura B.1: Evolución temporal mensual del coeficiente de Angström para los años 2007-2011. El eje horizontal está codificado de tal manera que los 4 primeros dígitos expresan el año y los dos últimos, el mes.

Mes	Media del coeficiente de perturbación de Angström
Enero	0.089306441
Febrero	0.114071339
Marzo	0.140812374
Abril	0.161272604
Mayo	0.141408776
Junio	0.157454255
Julio	0.170746856
Agosto	0.173588219
Septiembre	0.172414975
Octubre	0.150549603
Noviembre	0.095073749
Diciembre	0.071268619

Cuadro B.1: Medias aritméticas para los valores mensuales del coeficiente de perturbación de Angström.

Apéndice C

Gráficos de generación de Innova

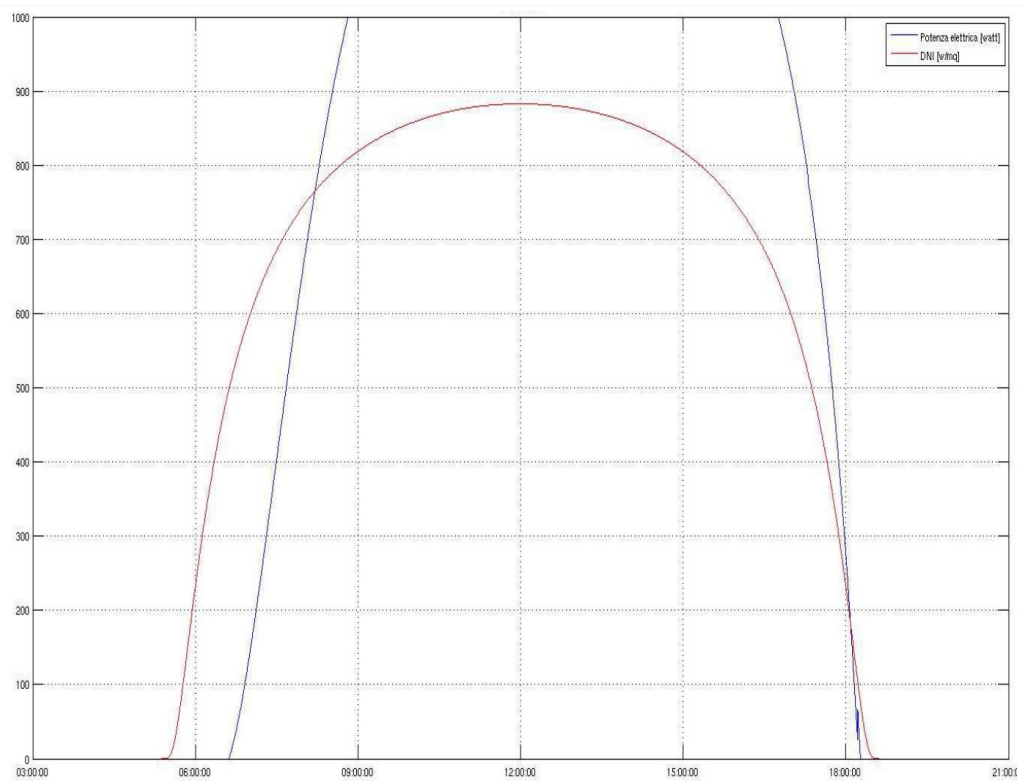


Figura C.1: Gráfico que relaciona la irradiancia directa normal y la potencia eléctrica generada, para diferentes horas del día. [23]

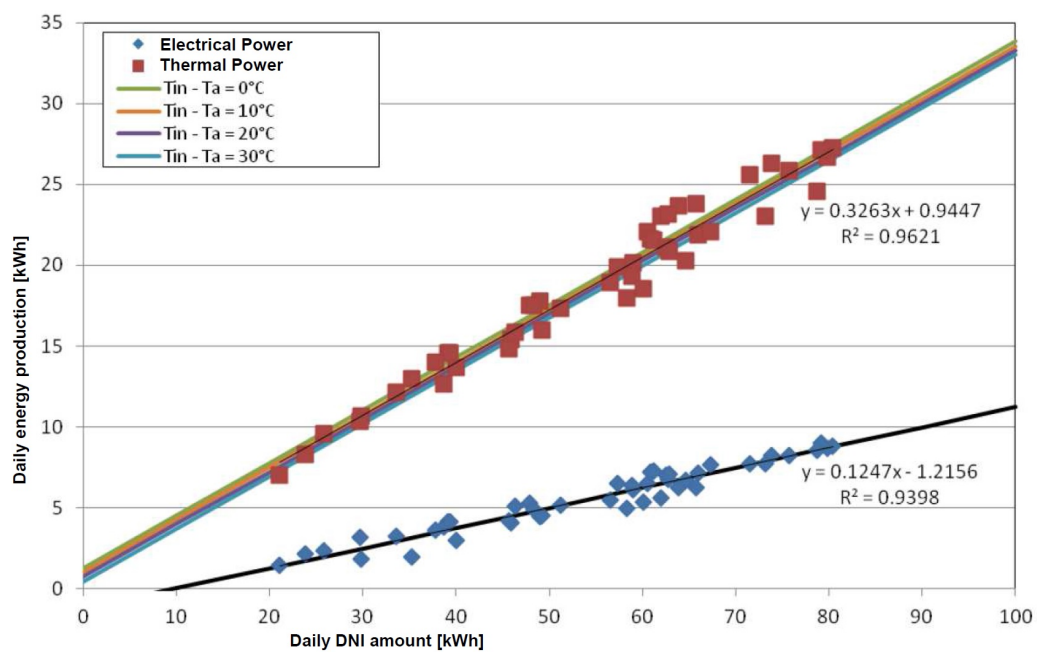
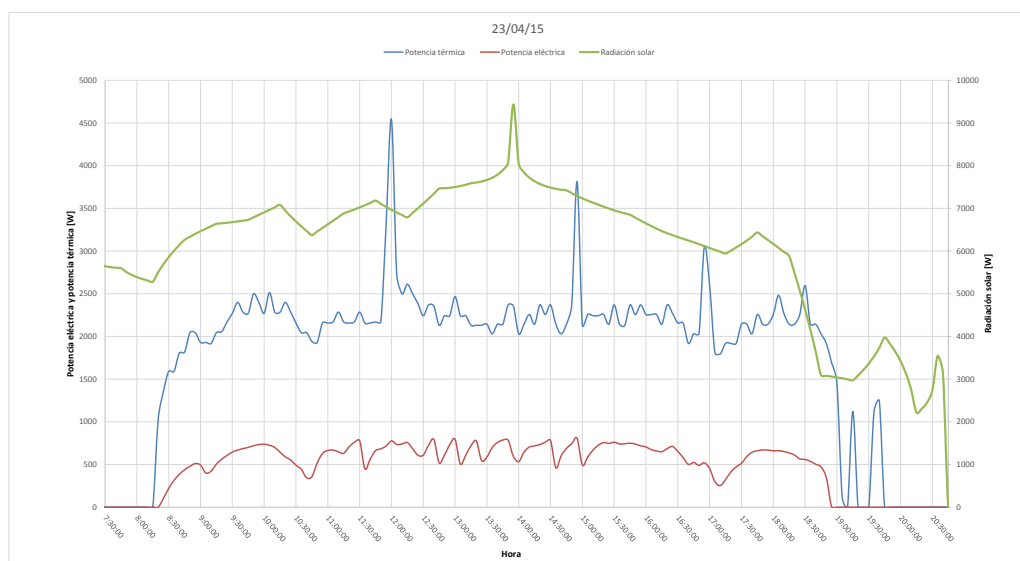
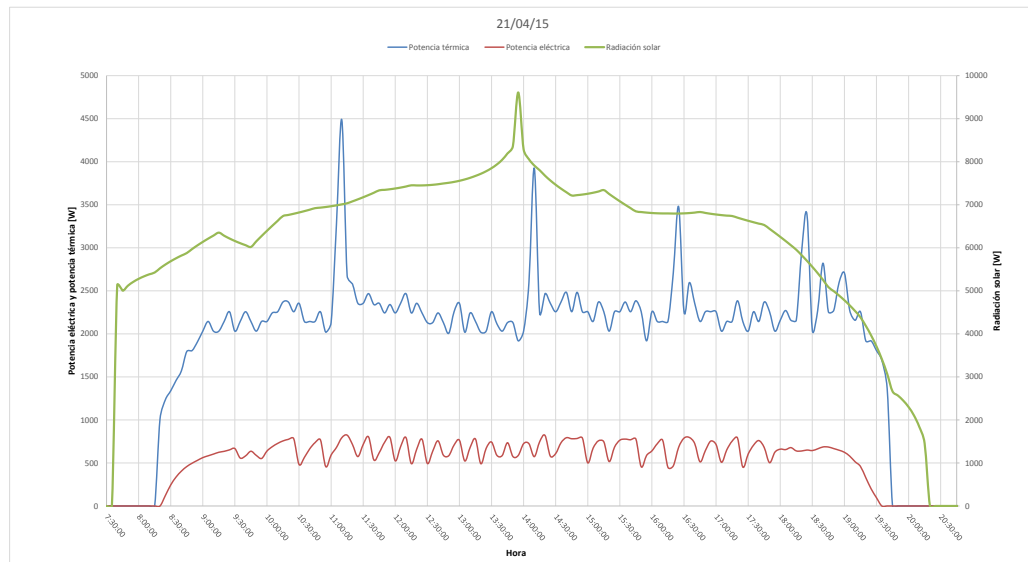


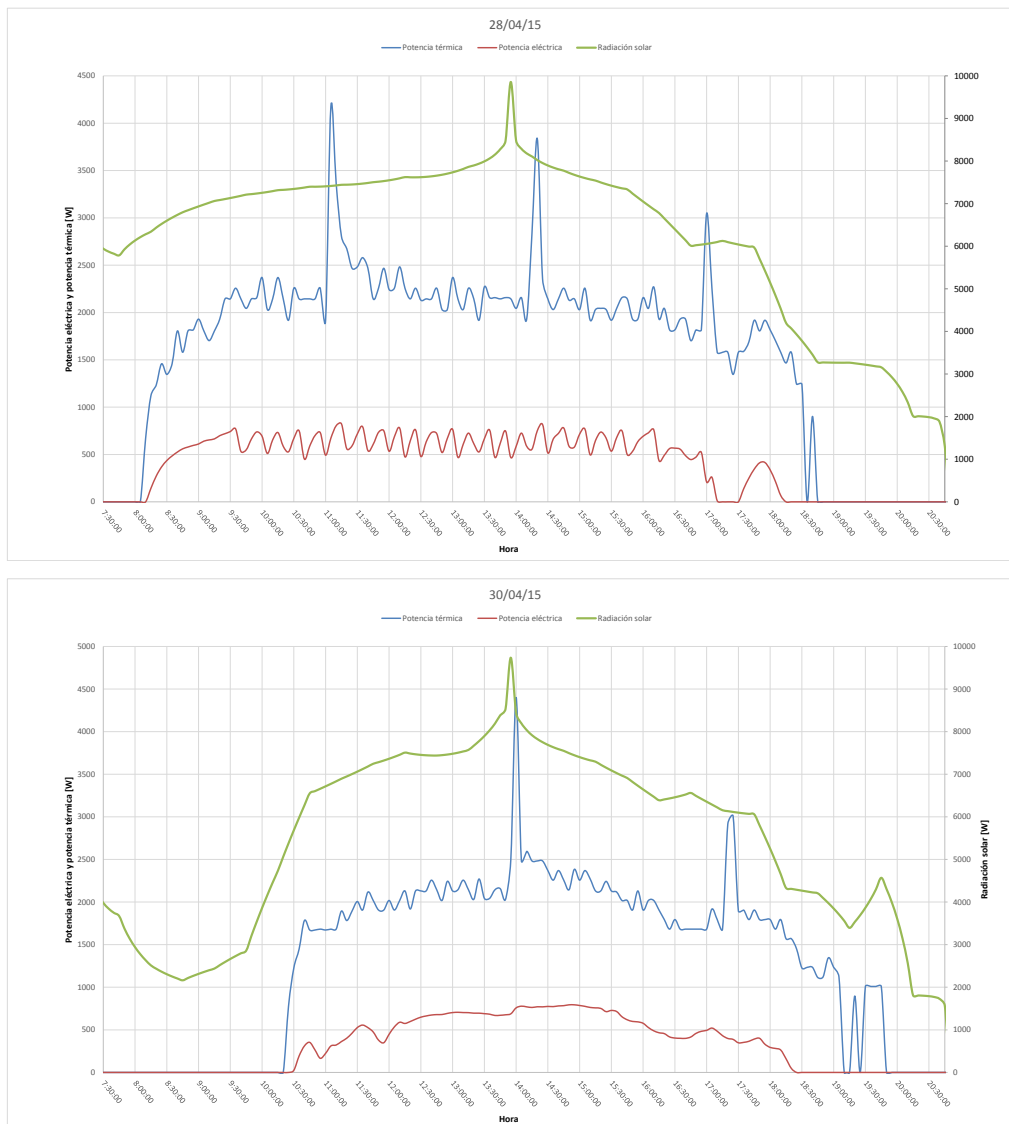
Figura C.2: Gráfico que relaciona la irradiancia directa normal diaria y la energía producida, tanto térmica como eléctrica. [23]

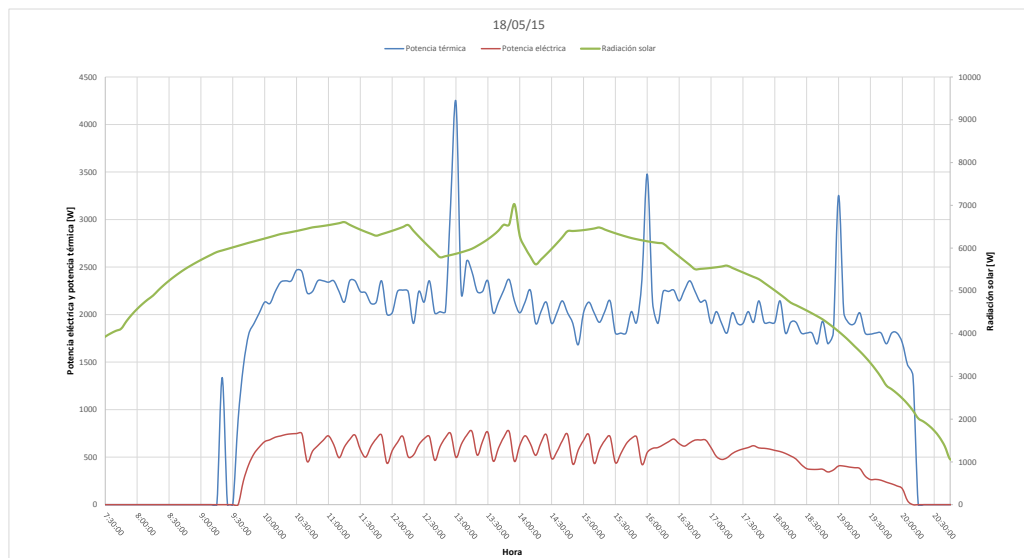
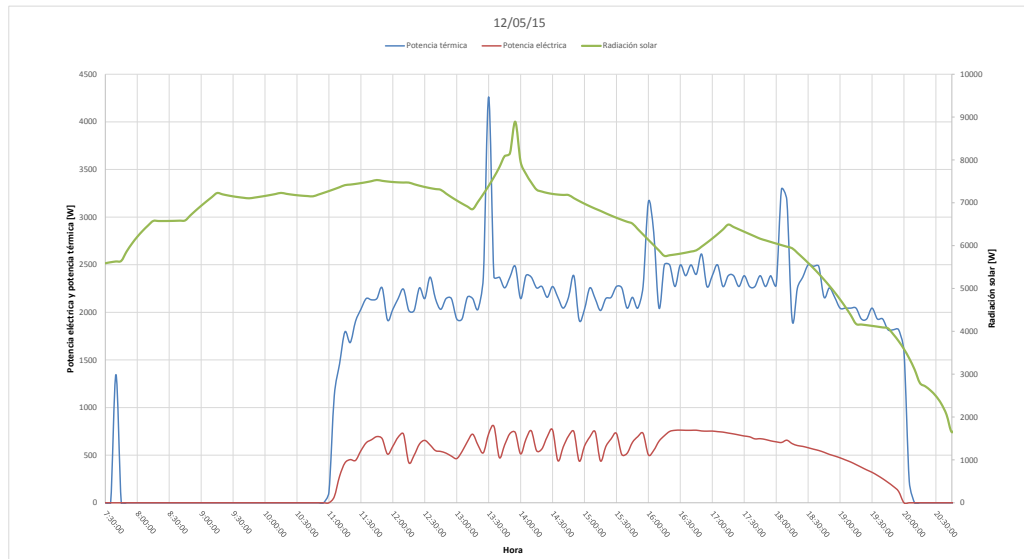
Apéndice D

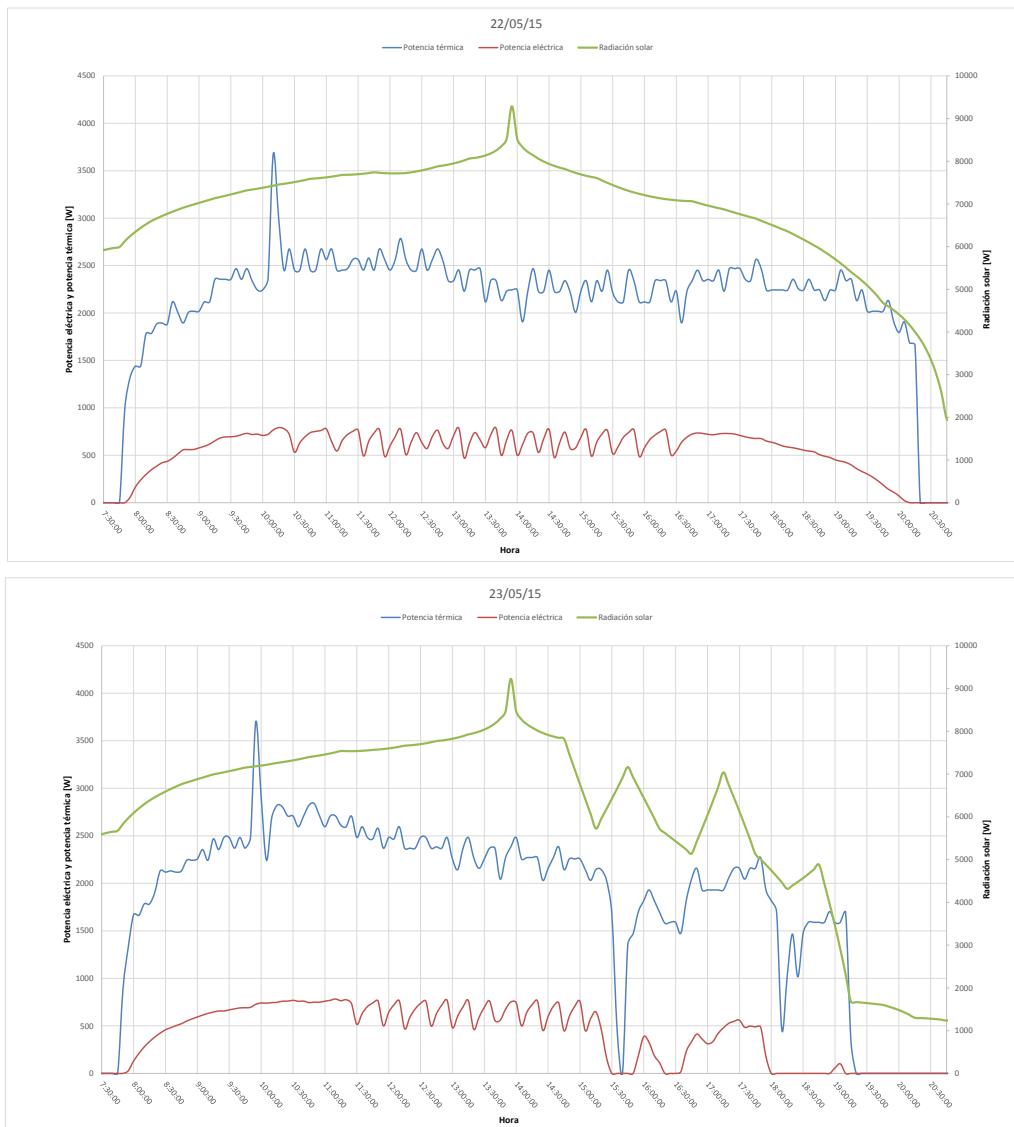
Gráficos de generación diaria para los días válidos

A continuación se presentan los gráficos de producción diaria de energía térmica y eléctrica, junto con la radiación normal incidente captada por el disco, para los días en los que no hubo ningún incidente. Se muestran los periodos durante los cuales el disco se encontraba activo, excluyendo gran parte de la noche, sin producción ni radiación solar.









Apéndice E

Tablas de relaciones entre variables

En este anexo se muestra la matriz de coeficientes de correlación entre los parámetros de interés del disco Stirling.

	<i>P.at.</i>	<i>H.rel.</i>	<i>Temp.</i>	<i>Rad. G.</i>	<i>Elev.</i>	<i>Ac.</i>	<i>Angström</i>	<i>Rad. N.</i>	<i>Pot. E.</i>	<i>Pot. T.</i>	<i>Ac.Stirt</i>	<i>Elev. Stirt</i>	<i>Ctrl.T</i>
Presión atmosférica [hPa]	1,0000	1,0000											
Humedad relativa	-0,1629												
Temperatura [°C]	0,5212	-0,2476	1,0000										
Radiación Global [W/m2]	-0,0191	-0,5373	0,3457	1,0000									
Elevación [°]	0,0849	-0,4795	0,5218	0,9519	1,0000								
Acimut [°]	-0,0050	0,2889	0,3018	-0,1755	-0,0298	1,0000							
Coef. turbidez Angström	-0,7743	0,1135	-0,4391	0,0213	-0,1234	-0,0917	1,0000						
Radiación captada neta [W]	-0,1054	-0,5871	-0,0556	0,8304	0,6654	-0,4705	0,1572	1,0000					
Potencia eléctrica [W]	0,0341	-0,3656	0,1824	0,5382	0,4585	-0,1775	0,0901	0,5526	1,0000				
Potencia térmica [W]	0,1231	-0,3328	0,1492	0,3139	0,2605	-0,0960	-0,0103	0,3058	0,5686	1,0000			
Acimut Stirling [°]	-0,0002	0,2983	0,3112	-0,1866	-0,0387	0,9926	-0,1014	-0,4934	-0,1919	-0,0964	1,0000		
Elevación Stirling [°]	0,0800	-0,4965	0,4929	0,9566	0,9932	-0,0953	-0,1087	0,6974	0,4718	0,2689	-0,1049	1,0000	
Control temp [°C]	0,0972	-0,3533	0,2432	0,5209	0,4588	-0,1494	0,0010	0,5122	0,9830	0,5216	-0,1564	0,4703	1,0000

Cuadro E.1: Cuadro con la correlación entre diversos parámetros del disco Stirling. Los rótulos de las columnas han sido abreviados y las unidades suprimidas por temas de espacio, pero son los mismos que los utilizados para las columnas.

Apéndice F

Análisis de correlación entre variables del disco Stirling

Resultados del estudio estadístico de variables de interés relacionadas.

Resumen:									
<i>Estadísticas regresión</i>									
Coef. correlación múlt.		0,982951784							
Coef. determinación R²		0,96619421							
R² ajustado		0,966159178							
Error típico		30,41763367							
Observaciones		967							
Análisis de varianza:									
		<i>Grad. libertad</i>	<i>Suma cuadrados</i>	<i>Prom. cuad.</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico F</i>			
Regresión		1	25518286,4	25518286,4	27580,40611	0			
Residuos		965	892849,3029	925,2324382					
Total		966	26411135,7						
		<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inf. 95 %</i>	<i>Sup. 95 %</i>	<i>Inf. 95,0 %</i>	<i>Sup. 95,0 %</i>
Intercepción		-710,7481847	7,86537961	-90,36412988	0	-726,1834048	-695,3129645	-726,1834048	-695,3129645
Variable X 1		2,705766054	0,016292582	166,0734961	0	2,673793078	2,737739029	2,673793078	2,737739029

Cuadro F.1: Análisis de correlación de temperatura del foco caliente contra potencia eléctrica

Resumen									
<i>Estadísticas de la regresión</i>									
Coef. correlación múlt.	0,992557724								
Coef. determinación R ²	0,985170835								
R ² ajustado	0,985155468								
Error típico	7,69177721								
Observaciones	967								
Análisis de varianza:									
Regresión	Grad. libertad	Suma cuadrados	Prom. cuad.	F	Valor crítico F				
Residuos	1	3792936,401	3792936,401	64109,4672	0				
Total	965	57092,71636	59,16343665						
	966	3850029,118							
Intercepción	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inf. 95 %	Sup. 95 %	Inf. 95,0 %	Sup. 95,0 %	
Variable X 1	-170,7065596	0,724268541	-235,6951184	0	-172,1278826	-169,2852367	-172,1278826	-169,2852367	
	0,943896341	0,003727891	253,1984739	0	0,936580633	0,951212049	0,936580633	0,951212049	

Cuadro F.2: Análisis de correlación de la acimut solar contra la acimut del disco Stirling.

Resumen									
Estadísticas de la regresión									
Coef. correlación múlt.		0,993186271							
Coef. determinación R ²		0,986418969							
R ² ajustado		0,986404895							
Error típico		1,834304705							
Observaciones		967							
Análisis de varianza:									
	Grad. libertad	Suma cuadrados	Prom. cuad.	F	Valor crítico F				
Regresión	1	235829,9381	235829,9381	70089,98657	0				
Residuos	965	3246,910171	3,364673752						
Total	966	239076,8483							
	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inf. 95 %	Sup. 95 %	Inf. 95,0 %	Sup. 95,0 %	
Intercepcíon	1,130888537	0,179083043	6,314883405	4,11897E-10	0,779451437	1,482325637	0,779451437	1,482325637	
Variable X 1	0,978169245	0,003694758	264,7451351	0	0,970918558	0,985419932	0,970918558	0,985419932	

Cuadro F.3: Análisis de correlación de la elevación solar contra la elevación del disco Stirling.