

---

# Diseño y caracterización de un concentrador térmico – fotovoltaico cuasiestacionario para integración arquitectónica

---

Daniel Chemisana Villegas

TESIS DOCTORAL

Directores de Tesis:

Manuel Ibáñez Plana

Joan Ignasi Rosell Urrutia

---

# Diseño y caracterización de un concentrador térmico – fotovoltaico cuasiestacionario para integración arquitectónica

---

Daniel Chemisana Villegas

TESIS DOCTORAL

Presentada en el

Área de Física Aplicada del Departamento de Medi

Ambient i Ciències del Sòl

Universitat de Lleida

Para la obtención del grado de

Doctor

Lleida, marzo de 2009

# Resumen

---

En la presente tesis se desarrolla un generador solar de concentración, diseñado con el enfoque de la integración arquitectónica.

Los sistemas fotovoltaicos de concentración implican que sobre las células solares se están recibiendo unas altas densidades de flujo radiativo. Estas altas densidades suponen un calentamiento excesivo del sistema que provoca en términos generales un deterioro en los materiales y una menor eficiencia de las células. Este hecho hace necesario que los sistemas de concentración requieran de un sistema de refrigeración de las células fotovoltaicas.

El sistema de refrigeración propuesto es un sistema activo de circulación de un fluido térmico, que cumple una doble función. En primer lugar enfría el módulo fotovoltaico, con lo que las células trabajan a una mayor eficiencia. En segundo lugar, este fluido que extrae una determinada cantidad de calor de las células, en torno a un 65% de la radiación que incide en el sistema, se calienta. Aprovechando este calor el sistema es a su vez un colector térmico.

El sistema óptico diseñado se fundamenta en mantener un elemento exterior (visible) estático, constituido por una lente de Fresnel cilíndrica. Las funciones de seguimiento las realiza un elemento óptico secundario de elevada aceptación (CPC). De esta forma el sistema se puede acoplar de modularmente en diferentes emplazamientos y configuraciones de edificios, con un impacto visual similar al de un muro cortina de vidrio con cierta translucidez.

Para el desarrollo del nuevo colector se han realizado análisis experimentales y de simulación desde los aspectos térmicos y ópticos, así como un tratamiento global del sistema mediante un balance de energético del mismo.

**Palabras clave:** fotovoltaica, PVT (Híbrido), concentración solar, fachadas fotovoltaicas, integración arquitectónica.

# Resum

---

En la present tesi es desenvolupa un generador solar de concentració, dissenyat amb l'enfocament de la integració arquitectònica.

Els sistemes fotovoltaics de concentració impliquen que sobre les cèl·lules fotovoltaïques s'estan rebent unes altes densitats de flux radiatiu. Aquestes altes densitats suposen un escalfament excessiu del sistema que provoca en termes generals un deteriorament en els materials i una menor eficiència de les cèl·lules. Aquest fet fa necessari que els sistemes de concentració requereixin d'un sistema de refrigeració de les cèl·lules fotovoltaïques.

El sistema de refrigeració proposat és un sistema actiu de circulació d'un fluid tèrmic, que compleix una doble funció. En primer lloc, refreda el mòdul fotovoltaic, amb el que les cèl·lules treballen a una major eficiència. En segon lloc, aquest fluid que extrau una determinada quantitat de calor de les cèl·lules, entorn d'un 65% de la radiació que incideix en el sistema, s'escalfa. Aprofitant aquesta calor el sistema és al seu torn un col·lector tèrmic.

El sistema òptic dissenyat es fonamenta a mantenir un element exterior (visible) estàtic, constituït per una lent de Fresnel cilíndrica. Les funcions de seguiment solar es realitzen per un element òptic secundari d'elevada acceptància (CPC). D'aquesta forma el sistema es pot acoblar modularment en diferents emplaçaments i configuracions d'edificis, amb un impacte visual similar al d'un mur cortina de vidre amb certa translucidesa.

Per al desenvolupament del nou col·lector s'han realitzat anàlisis experimentals i de simulació des de l'aspecte tèrmic i òptic, així com un tractament global del sistema amb un balanç energètic del mateix.

**Paraules clau:** fotovoltaica, PVT (Híbrid), concentració solar, façanes fotovoltaïques, integració arquitectònica.

# Abstract

---

In this thesis a solar concentration generator is developed and designed with the approach of the architectural integration.

PV systems under concentration mean that photovoltaic cells are receiving high densities of irradiative flux. These high densities imply excessive warming of the system causing deterioration in general terms in materials and reduced efficiency of the cells. Photovoltaic cells reduce their efficiency at high temperatures. This fact makes a cooling system of photovoltaic cells necessary for systems working under concentration.

The proposed cooling system is an active system using a heating fluid, which plays a dual role. First, it cools the photovoltaic module, which works photovoltaic cells to greater efficiency. Secondly, this fluid that removes a certain amount of heat from the cells, around 65% of the radiation that affects the system, is warming up. Taking advantage of this heat, the system turns into a thermal collector.

The optical system design is based on maintaining an outside (visible) static, consisting of a cylindrical Fresnel lens. The functions of solar tracking are performing through a secondary optical element of high acceptance (CPC). In this way the system can be fitted in a modular fashion in different locations and configurations of buildings, with a visual impact similar to that of a glass curtain façade with some translucency.

For the development of the new generator, experiments and simulation analysis have been made to characterize the thermal and optical aspects, as well as an energy balance of the complete system.

**Keywords:** photovoltaic, PVT (Hybrid), solar concentration, photovoltaic facades, architectural integration.

# Résumé

---

Nous développons dans cette thèse un générateur solaire de concentration, conçu depuis l'approche de l'intégration architecturale.

Les systèmes photovoltaïques de concentration impliquent que les cellules solaires reçoivent des densités élevées de flux radiatif. Ces hautes densités impliquent un chauffage excessif du système qui provoque une détérioration des matériaux et réduit l'efficacité des cellules. Ce fait rend nécessaire l'application d'un système de refroidissement des cellules photovoltaïques.

Le système de refroidissement proposé est un système actif de circulation d'un fluide thermique, qui joue un double rôle. Tout d'abord refroidir le module photovoltaïque, ce qui implique que les cellules travaillent à un rendement plus élevé. Deuxièmement, ce fluide qui extrait une certaine quantité de chaleur des cellules, environ 65% de la radiation qui affecte le système, est chauffé. Prenant avantage de la récupération de chaleur, le système est aussi un collecteur thermique.

Le système optique est basé sur le maintien d'un élément extérieur (visible) statique, composé d'une lentille de Fresnel cylindrique. Qui exerce les fonctions de suivi solaire c'est un deuxième élément optique de haute acceptation (CPC). De cette façon, le système peut être installé de façon modulaire dans différents endroits et configurations des bâtiments, avec un impact visuel similaire à celui d'un mur-rideau de verre avec une certaine translucidité.

Pour le développement du générateur proposé, nous avons fait une étude expérimentale et une analyse numérique des caractéristiques thermiques et optiques, ainsi qu'un bilan énergétique global du système.

**Mots clés:** photovoltaïque, PVT (Hybride), concentration solaire, façades photovoltaïques, intégration architecturale.

# Índice

---

---

Nomenclatura.....	xix
-------------------	-----

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. ENERGÍA SOLAR.....	2
1.1.1. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	4
1.1.1.1. Las células fotovoltaicas.....	5
1.1.1.2. Los módulos fotovoltaicos.....	8
1.1.2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE CONCENTRACIÓN.....	9
1.1.2.1. Concentración con seguimiento.....	9
1.1.3. SISTEMAS HÍBRIDOS TÉRMICO-FOTOVOLTAICOS (PVT).....	12
1.2. ANTECEDENTES.....	12
1.2.1. DESCRIPCIÓN DE DIFERENTES PROGRAMAS.....	12
1.2.2. ANTECEDENTES DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE CONCENTRACIÓN.....	15
1.3. MOTIVACIÓN.....	17
1.4. LIMITACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR POR CONCENTRACIÓN.....	21
1.5. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE LOS GENERADORES SOLARES FOTOVOLTAICOS.....	23
1.5.1 INTRODUCCIÓN A LA PROBLEMÁTICA.....	23
1.5.2 ESTADO DEL ARTE.....	24
1.5.2.1 Tecnologías de enfriamiento para receptores lineales.....	25
1.6. OBJETIVOS.....	27
1.6.1. DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS.....	27
<b>2. Análisis óptico del sistema.....</b>	<b>29</b>
2.1. INTRODUCCIÓN.....	29
2.1.1. ÓPTICA GEOMÉTRICA (FORMADORA DE IMAGEN).....	29
2.1.1.1. Principio de Fermat.....	31
2.1.1.2. Propagación de la luz en un medio homogéneo.....	31
2.1.1.3. Leyes de la refracción y de la reflexión.....	32

2.1.1.4. Óptica paraxial .....	32
2.1.1.5. Lentes delgadas.....	32
2.1.1.6. Ley de los senos .....	33
2.1.2. CONCENTRACIÓN SIN FORMACIÓN DE IMAGEN (ANIDÓLICA).....	34
2.1.2.1. Funciones de los concentradores anidólicos.....	35
2.1.2.2. Concentrador Parabólico Compuesto (CPC).....	37
2.1.3. LENTES DE FRESNEL.....	38
2.1.3.1 Lentes de Fresnel simples .....	40
2.1.3.2. Lentes de Fresnel no formadoras de imagen .....	40
2.1.4. OTROS CONCENTRADORES.....	41
2.1.4.1 Concentrador tronco cónico.....	41
2.1.4.2. Concentrador dieléctrico de reflexión interna total (CDRIT).....	42
2.2. ANÁLISIS CONCENTRADOR PRIMARIO .....	43
2.2.1. ANÁLISIS POR ÓPTICA PARAXIAL .....	44
2.2.1.1. Sistema con el Sol centrado en el eje de la lente, cálculo de la focal adecuada a los requisitos del sistema .....	44
2.2.1.2. Estudio del sistema con movimiento del receptor .....	49
2.2.1.3. RESULTADOS.....	51
2.2.2. SIMULACIÓN DEL SISTEMA POR TRAZADO DE RAYOS.....	59
2.2.2.1. Lente cilíndrica convexa.....	59
2.2.2.1.1. Lente de vidrio.....	60
2.2.2.1.2. Lente de Zafiro .....	64
2.2.2.1.3. Lente de Zirconio .....	66
2.2.2.2. Lente cilíndrica biconvexa.....	71
2.2.2.3. Lente de fresnel plana.....	74
2.2.2.3.1. Crecimiento con altura de prismas constante .....	76
2.2.2.3.2. Crecimiento con anchura de prismas constante .....	79
2.2.2.4. Combinación de lentes.....	82
2.2.2.5. Lente de fresnel con curvatura .....	91
2.3. CONCENTRADOR SECUNDARIO .....	97
2.3.1. LENTE DE FRESNEL CON CURVATURA + CPC .....	98
2.3.1.1 Concentrado Parabólico Compuesto – CPC-.....	99
2.3.1.1.1. CPC con ángulo de media aceptación ( $\theta$ ) de $30^\circ$ para concentración geométrica final de 20X.....	99



2.3.1.1.2. CPCs para concentración geométrica final de >20X.....	103
2.3.2. ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO ESTACIONAL Y DIARIO.....	104
2.3.2.1. Sombreo.....	104
2.3.2.2. Posición de la mancha focal.....	105
2.3.2.3. Concentración.....	108
2.3.2.4 Radiación solar incidente.....	111
<b>3. Fase experimental óptica.....</b>	<b>115</b>
3.1. INTRODUCCIÓN.....	115
3.1.1. MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DE CONCENRADORES SOLARES.....	115
3.2. MATERIAL UTILIZADO.....	118
3.2.1. LENTE DE FRESNEL.....	118
3.2.2. ESPECTRORADIÓMETRO.....	119
3.2.3. CÁMARA CCD.....	122
3.2.4. DIFUSOR LAMBERTIANO.....	124
3.2.6. POTENCIÓMETRO.....	125
3.2.7. SEGUIDOR.....	126
3.2.8. PIRHELÍOMETRO.....	126
3.3. METODOLOGÍA DEL EXPERIMENTO.....	127
3.4. RESULTADOS.....	129
3.4.1. MEDICIÓN DEL ESPECTRO.....	129
3.4.2. MEDICIÓN DE POTENCIA Y CARACTERÍSTICAS DE LA MANCHA FOCAL.....	131
3.4.4. PATRÓN DE ILUMINACIÓN.....	134
<b>4. Fase experimental térmica.....</b>	<b>137</b>
4.1.-MATERIAL UTILIZADO.....	137
4.2.-METODOLOGÍA.....	145
4.3.-ANÁLISIS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.....	148
<b>5. Simulación térmica.....</b>	<b>153</b>
5.1. DEFINICIÓN DEL SISTEMA.....	153
5.2. CONDICIONES DE CONTORNO.....	155
5.3. ECUACIONES DE GOBIERNO.....	157

5.4. MALLA.....	158
5.5. CONVERGENCIA DEL CASO A SIMULAR .....	161
5.6. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO .....	161
5.7. ESTUDIO DE SENSIBILIDAD .....	166
5.7.1. VELOCIDAD DEL FLUIDO .....	167
5.7.2. TEMPERATURA .....	172
5.7.3. PRESIÓN .....	177
5.7.4. COEFICIENTES DE INTERCAMBIO TÉRMICO.....	182
<b>6. Análisis térmico del sistema.....</b>	<b>189</b>
6.1. PRELIMINARES.....	190
6.1.1. CONDUCCIÓN.....	190
6.1.1.1. Esquema de resistencias .....	193
6.1.2. CONVECCIÓN .....	194
6.1.2.1. Convección hacia el aire .....	195
6.1.2.2. Convección hacia el fluido térmico .....	201
6.1.3. RADIACIÓN .....	207
6.2. RESULTADOS .....	211
6.2.1. RESISTENCIA HACIA EL EXTERIOR .....	212
6.2.1. RESISTENCIA HACIA EL INTERIOR .....	212
<b>7. Balance energético.....</b>	<b>221</b>
7.1. PARÁMETROS CLIMÁTICOS DEL EMPLAZAMIENTO.....	222
7.2. RESULTADOS .....	225
7.2.1. PRODUCCIÓN ENERGÉTICA .....	226
7.2.1. POTENCIA Y EFICIENCIA .....	228
7.2.1. COMPARACIÓN CON SISTEMAS SOLARES ESTÁNDAR DE PRODUCCIÓN TÉRMICA Y FOTOVOLTAICA.....	229
<b>8. Conclusiones .....</b>	<b>235</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>241</b>

---

<b>Apéndice A. Definición del sistema .....</b>	<b>253</b>
<b>Apéndice B. Colector térmico plano teórico.....</b>	<b>261</b>
<b>Apéndice C. Ejemplos de integración arquitectónica .....</b>	<b>263</b>
<b>Apéndice D. Publicaciones .....</b>	<b>269</b>

# Nomenclatura

---

A	Área ( $m^2$ )
c	Velocidad de la luz en el vacío (m/s)
$C_s$	Concentración simulada o efectiva.
$C_x$	Concentración geométrica
d, D	Anchura (m)
$D_h$	Diámetro hidráulico.
$d_{TS}$	Distancia entre la Tierra y Sol (m)
E	Espesor del material
$E'_r$	Fracción de energía emitida por el receptor que recibe el Sol
ECM	Error cuadrático medio ( $W/cm^2$ )
$E_r$	Energía emitida por el Sol (J)
$E_s$	Energía emitida por el receptor (J)
$f'$	Distancia focal (m)
FR	Fracción directa recibida
G	Irradiación solar ( $w/m^2$ )
H	Espesor de las paredes inferior y superior del disipador (m)
$h_c$	Coefficiente de convección ( $W/^\circ C m^2$ )
$H_c$	Altura del canal (m)
IBF	Irradiancia solar incidente en la banda focal ( $W/m^2$ )
IGL	Irradiancia solar global en la lente de Fresnel ( $W/m^2$ )
k	Conductividad térmica ( $W/m^\circ C$ )
L	Longitud (m)
$L_+$	Longitud adimensional (adimensional)
$L_e$	Longitud característica (m)
$L_{op}$	Camino óptico (m)
$\dot{m}$	Caudal másico (kg/s)
n	Índice de refracción del material
Nu	Número de Nusselt (adimensional)
Pe	Número de Peclet (adimensional)
Pr	Número de Prandtl(adimensional)

Q	Caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$q''$	Flujo de calor por unidad de superficie ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
R ( $R_t$ )	Resistencia térmica ( $^\circ\text{C}/\text{W}$ )
$R_1, R_2$	Radios de curvatura (m)
Re	Número de Reynolds (adimensional)
$r_s$	Radio del Sol (m)
s	Distancia (m)
t	Tiempo (s)
$T_e$	Temperatura del fluido a la entrada del tubo ( $^\circ\text{C}$ )
$T_r$	Temperatura del receptor (K)
$T_s$	Temperatura del Sol (K)
$T_s$	Temperatura del fluido a la salida del tubo ( $^\circ\text{C}$ )
U	Coefficiente global de transferencia de calor ( $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ )
v	Velocidad de la luz en el medio (m/s)
W	Espesor de las paredes laterales del disipador (m)
$W_c$	Anchura del canal (m)
$X_e$	Longitud de entrada (m)

## SÍMBOLOS GRIEGOS

$\alpha$	Ángulo del rayo refractado ( $^\circ$ )
$\beta$	Ángulo característico del prisma ( $^\circ$ )
$\delta$	Ángulo de declinación solar ( $^\circ$ )
$\varepsilon$	Ángulo de incidencia ( $^\circ$ )
$\varepsilon'$	Ángulo de reflexión ( $^\circ$ )
$\theta$	Ángulo de media aceptación ( $^\circ$ )
$\mu$	Viscosidad dinámica (Kg/ms)
$\rho$	Densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\Phi$	Ángulo límite del concentrador ( $^\circ$ )

## SUBÍNDICES

a	Ambiente
absor	Absorbedor
Ap	Apertura

c	Células
conc	Concentrador
cond	Conducción
conv	Convección
dp	Punto de rocío (dew point)
eléc	Eléctrica
eq	Equivalente
ext	Exterior
f	fluido
int	Interior
máx	Máxima/o
r	Receptor
$R_{\infty}$	Cielo
rad	Radiación
S	Sol
vi	Vidrio

# Capítulo 1

## Introducción

---

En la actualidad la sociedad se está concienciando de que la utilización de fuentes de energía no renovables lleva asociada una contaminación, unos residuos y una problemática política.

El uso de combustibles fósiles para la obtención de energía mecánica, térmica...implica una contaminación atmosférica por los gases que se producen en la combustión, tales como CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>... A grandes rasgos, y como ya es conocido, el CO es altamente tóxico y, en combinación con el oxígeno atmosférico, acaba convirtiéndose en CO<sub>2</sub>, el cual provoca un efecto de apantallamiento a los rayos infrarrojos que emite la biosfera. Al no dejar que estos rayos fluyan a capas superiores se provoca un calentamiento global, conocido como “efecto invernadero”. El SO<sub>2</sub> es el principal causante de la lluvia ácida.

La energía nuclear utiliza átomos de elementos radiactivos para producir energía, con lo cual se generan unos residuos muy problemáticos y de difícil gestión.

La problemática política anteriormente mencionada hace referencia al caso del petróleo; las reservas de petróleo están distribuidas en unos puntos concretos de la geografía, que corresponden a unos países determinados, los cuales ejercen sus derechos sobre estas reservas. El poder que implica la posesión y control sobre el petróleo ha hecho desde hace ya varias décadas que surjan problemas y conflictos por alcanzar u obtener mayor poder sobre el citado combustible: Crisis del petróleo de 1973, Guerra del Golfo y una de las principales causas de la reciente Guerra de Irak.

Como su propio nombre indica estas fuentes de energía en las que en la actualidad todavía se basa en su gran mayoría el modelo de vida de la sociedad son no renovables, por lo que tienden a agotarse. El mundo científico hace tiempo que intenta subsanar el agotamiento de las fuentes de energía no renovable utilizando energías tales como la energía eólica, maremotriz o solar, entre otras; el problema es que sólo en los últimos años ha habido una iniciativa política de fomentar este tipo de fuentes de energía, por lo que los avances en estos campos han estado muy limitados a pequeños proyectos de investigación. Actualmente sí que hay una clara decisión gubernamental para incentivar el uso de este tipo de energías, al igual que las empresas privadas también empiezan a participar en proyectos de esta índole. El problema surge porque en estos momentos la inversión que supone poner en funcionamiento, por ejemplo, una estación de energía solar, es muy alta en relación a la energía que de esta se puede obtener, por lo que de momento sale más rentable económicamente utilizar los sistemas de obtención de energía “tradicionales”, dado que estas últimas externalizan los costes ambientales.

## 1.1. ENERGÍA SOLAR

La energía solar es la energía que emite el Sol, que corresponde a una radiación electromagnética formada por un conjunto de longitudes de onda, en que su velocidad de propagación es unos  $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . El Sol genera su energía mediante reacciones nucleares de fusión (por ejemplo: dos átomos de hidrógeno que producen helio...) que se llevan a cabo en su núcleo. La generación de energía proviene, por tanto, de la pérdida de masa del Sol, que se convierte en energía de acuerdo con la famosa ecuación de Einstein,  $E = mc^2$ , donde E es la cantidad de energía liberada cuando desaparece la masa m; c es la velocidad de la luz.

La energía solar, como recurso energético terrestre, está constituida simplemente por la porción de la radiación que emite el Sol y que es interceptada por la Tierra.

### **La radiación solar terrestre**

La radiación solar, al atravesar la atmósfera terrestre, es en parte reflejada, difuminada y absorbida por el polvo y las moléculas de gases como el ozono ( $\text{O}_3$ ), el anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) y el vapor de agua entre otros. La magnitud de esta



alteración de la radiación depende de la composición de la atmósfera y de la longitud del camino recorrido por los rayos del sol.

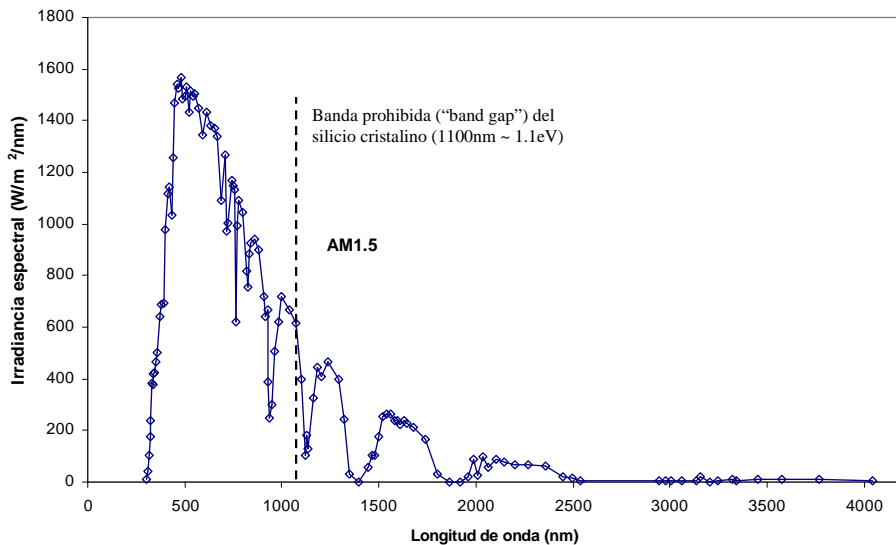


Figura 1.1. Espectro solar total con masa de aire (AM) = 1,5. Datos de CENSOLAR.

La radiación solar, al atravesar la atmósfera, sufre una modificación en su espectro como consecuencia del efecto de filtro que ejerce la masa atmosférica. La mayor parte de la radiación ultravioleta es absorbida por el ozono en la alta atmósfera, mientras que la región visible de onda corta es dispersada por las moléculas del aire, dándole al cielo su característico color azul. El vapor de agua de las capas bajas de la atmósfera es el causante de las características bandas de absorción en la región del infrarrojo cercano, fenómeno también producido en menor grado por el  $\text{CO}_2$ .

La energía solar absorbida por la atmósfera puede variar ligeramente en función del contenido variable de vapor de agua, polución o aerosoles de la atmósfera. Sin embargo, la mayor variación de absorción de la atmósfera es debida a la nubosidad.

### 1.1.1. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Bajo la denominación “FOTOVOLTAICO” se engloban el conjunto de las tecnologías que permiten la conversión directa de la luz solar en electricidad, mediante un dispositivo electrónico llamado “CÉLULA SOLAR”.

El efecto fotovoltaico fue descubierto por el físico francés Edmund Bequerel en 1839. Sin embargo, y a pesar de lo que esta temprana fecha pudiera indicar, la tecnología fotovoltaica es muy reciente en nuestra historia. El primer dispositivo que puede ser propiamente llamado célula solar fue una célula de selenio con una eficiencia del 1% fabricada en 1941. La Western Electric comercializó, por primera vez, células solares en el año 1955. En esos años, la tecnología fotovoltaica estaba fuertemente ligada a la carrera espacial. El primer satélite solar fue el Vanguard I, lanzado en 1958, y que disponía de un módulo fotovoltaico para alimentar un transmisor de 5 miliwatios. A partir de este momento todos los ingenios espaciales incorporaron células solares en cantidad creciente. Durante esa época, la fiabilidad era, para la NASA, un aspecto más importante que el coste. La energía fotovoltaica era, al menos, 50 veces más cara que cualquier otra forma convencional de energía lo que, naturalmente, mantenía a las células solares totalmente alejadas del mercado terrestre.

El embargo de petróleo iniciado por los países de la OPEP en 1973 supuso una nueva página en esta historia, al despertar un gran interés en el uso de las células solares para aplicaciones terrestres. Los fondos dedicados a investigación, desarrollo y demostración se elevaron hasta una cantidad del orden de 300 millones de dólares al año. Lo que hasta entonces había sido una tecnología espacial, pasó rápidamente a convertirse en una tecnología fundamentalmente terrestre.

Últimamente el precio de las células se ha ido reduciendo considerablemente.

Entre los principales atractivos que ofrecen los sistemas fotovoltaicos, merecen destacar los siguientes:

- ✓ Su gran modularidad (desde unos pocos watios hasta centenares MW) les permite ser capaces de producir cantidades pequeñas de electricidad en el mismo lugar de la demanda.
- ✓ No precisan suministro de combustible alguno para su operación.
- ✓ Al disponer de partes móviles, son muy fiables y su operación y mantenimiento son muy sencillos y al alcance de personal escasamente especializado.
- ✓ Son absolutamente no contaminantes.

- ✓ Su vida operativa es muy larga, probablemente superior a los 30 años, sin que muestren apenas degradación.

A partir de lo que se podría llamar primera célula que se fabricó con selenio, los avances más grandes desde la década de los 50 se han hecho en fabricación de células de silicio y en la actualidad en células que combinan varios semiconductores conectados formando un tándem (células multiunión).

Para poder entender como funciona una célula solar se dan unas pinceladas a la teoría básica de semiconductores.

### 1.1.1.1. Las células fotovoltaicas

Las células solares modernas están fabricadas de unos materiales con propiedades electrónicas específicas denominados semiconductores. Las células solares funcionan gracias a algunas de esas propiedades.

#### **Estructura de bandas. Electrones y huecos.**

Según la teoría atómica se sabe que los electrones que se encuentran orbitando alrededor del núcleo atómico no pueden tener cualquier energía sino solamente unos valores determinados, niveles energéticos, a los que se le pone nombre: 1s, 2s, 2p, 3s, etc.

Las propiedades químicas de los elementos están determinadas en buena parte por el número de electrones que tienen los materiales en su última capa o capa de valencia y por cuantos electrones faltan para completarla. Las células utilizadas son de silicio ( $\text{Si}_{14}$ :  $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^2$ ), que tiene cuatro electrones en su última capa y le faltan otros cuatro para completarla.

Cuando los átomos de silicio se unen a otros comparten los electrones de las últimas capas con los átomos vecinos formando enlaces covalentes, muy estables y fuertes. Estas agrupaciones de átomos pueden llevarse a cabo de forma ordenada dando lugar a un sólido de estructura cristalina.

Pues bien, de la misma forma que los electrones en un átomo no pueden tener cualquier energía, los electrones en un cristal tampoco pueden tomar cualquier energía. Sin embargo, lo que antes, en el átomo, era un único nivel, ahora, son agrupaciones de

niveles, muy juntos, llamadas bandas de energía. Y de la misma forma que los últimos niveles energéticos en un átomo definen las propiedades químicas del átomo, las últimas bandas de energía definen las propiedades electrónicas de un cristal. Las dos últimas bandas ocupadas (total o parcialmente por electrones) reciben el nombre de banda de conducción (para la más energética) y banda de valencia. Están separadas por una energía  $E_G$  denominada *energía del gap* que desempeña un papel principal en esta teoría.

En general, a una temperatura dada, algunos electrones tendrán una energía suficiente para desligarse de los átomos. En el argot de la teoría de los semiconductores, a esos electrones libres se les denomina electrones propiamente y se les asocia con los niveles energéticos de la banda de conducción. A los enlaces que han dejado vacíos se les denomina huecos. Reciben un nombre especial porque la teoría de los semiconductores demuestra que se comportan como si se tratase de partículas con carga positiva y, desde ese punto de vista, resulta más fácil abstraerse del formulismo de la mecánica cuántica para realizar razonamientos de carácter físico.

### **Propiedades de los semiconductores.**

- ✓ Para explicar los mecanismos de conducción de la corriente eléctrica en un semiconductor hay que recurrir a las partículas positivas (huecos) y negativas (electrones) definidos en el apartado anterior. En un conductor, la conducción de la corriente se puede explicar únicamente en base a electrones.
- ✓ En un conductor, su resistencia aumenta con la temperatura, en un semiconductor intrínseco disminuye.
- ✓ Cuando un semiconductor se ilumina con fotones con una energía mayor que la energía del gap, su conductividad aumenta.

Tras esta breve explicación de la teoría básica de semiconductores y como resumen: las células solares están formadas por dos o más capas de semiconductores entre las cuales se crea un campo eléctrico suficiente como para separar las cargas de signo diferente y permitir la generación de corriente cuando reciben radiación luminosa.

En las células fotovoltaicas lo más común es utilizar como elemento semiconductor el silicio (monocristalino, policristalino o amorfo). Este silicio sufre un

proceso tecnológico en el cual algunos de los átomos que constituyen la red cristalina se pueden cambiar por otros, llamados impurezas, que pueden ser de dos tipos:

-*donadoras*, si en su última capa tienen un electrón más que los átomos que constituyen la red.

-*aceptoras*, si tienen un electrón menos.

Cuando en el silicio se introducen impurezas donadoras éstas pueden perder el electrón fácilmente. Añadiendo un número de impurezas adecuado (mayor que la concentración intrínseca del conductor) es posible conseguir que el número de electrones en el semiconductor venga determinado por el número de impurezas y no por la concentración. Se dice que el semiconductor es *extrínseco* y, en este caso, de *tipo n*.

De forma análoga, cuando en el semiconductor se introducen impurezas aceptoras, estas capturan un electrón fácilmente lo que origina la aparición de un hueco en la red. De nuevo, introduciendo en el semiconductor un número de impurezas adecuado (mayor que la concentración intrínseca) puede conseguirse que el número de huecos venga determinado por el número de impurezas. El semiconductor tiene, de nuevo, carácter *extrínseco* pero en esta ocasión se dice que es de *tipo p*.

La unión de dos capas (unión pn), con los contactos eléctricos adecuados, constituye una célula fotovoltaica.

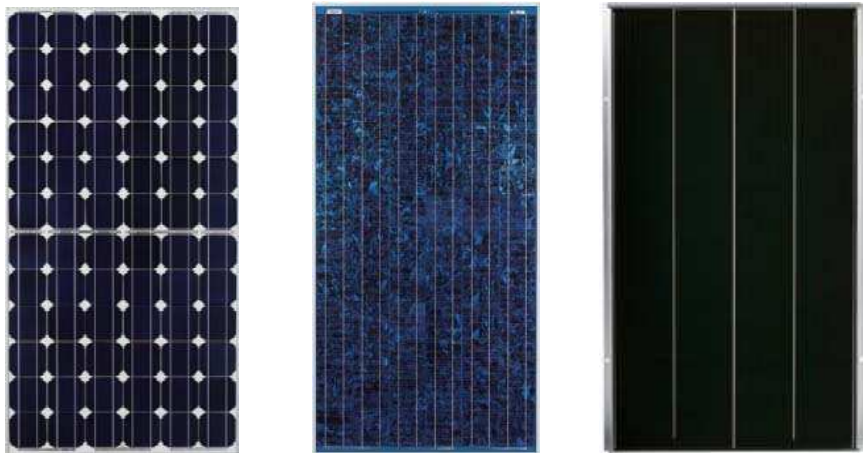


Figura 1.2. Módulos fotovoltaicos.

a) Célula silicio monocristalino b) Célula silicio policristalino c) Célula silicio amorfo

### 1.1.1.2. Los módulos fotovoltaicos

Una célula solar aislada proporciona una potencia reducida, con el fin de conseguir potencias útiles para aparatos de media potencia, hace falta unir un cierto número de células en serie, con lo cual se aumenta la tensión de la corriente. Estas uniones de células fotovoltaicas constituyen la placa fotovoltaica (unidad fundamental de las instalaciones fotovoltaicas). Estas placas suelen contener un número de células de entre 20 y 40.

Posteriormente, estas placas se conectan entre sí en serie i/o en paralelo con el fin de obtener el voltaje deseado (12, 24V,...).

Los elementos básicos que integran una instalación solar son los siguientes:

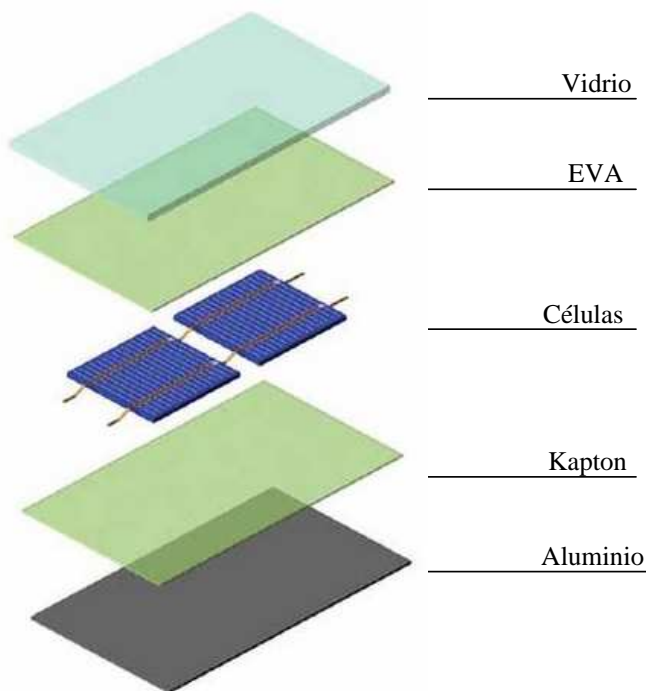


Figura 1.3. Esquema de un módulo fotovoltaico.

Los diferentes elementos que constituyen el módulo fotovoltaico se describirán en el capítulo siguiente.

## 1.1.2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE CONCENTRACIÓN

La concentración fotovoltaica consiste en sustituir las células solares, el elemento con diferencia más caro de los sistemas fotovoltaicos, por sistemas ópticos (llamados “concentradores”) que dirijan la luz sobre células más pequeñas, con la condición de que éstas conviertan eficientemente la mayor densidad de energía que reciben, y los elementos ópticos añadidos sean efectivamente más baratos que el área de silicio sustituida. Por tanto, mientras que en los sistemas fotovoltaicos convencionales la colección de la energía solar y la conversión de ésta en electricidad eran dos funciones desempeñadas por la célula solar, la concentración desacopla ambas funciones, siendo la colección realizada por el concentrador y la conversión por la célula.

### 1.1.2.1. Concentración con seguimiento

Para conseguir concentraciones mayores que las alcanzables con concentradores estáticos (máximos  $\sim 4X$ ) los diseños tienen que disminuir su aceptación angular, por lo que es necesario seguir al sol en su movimiento aparente respecto a la Tierra. Se puede optar por diferentes técnicas de seguimiento según el nivel de concentración que se quiera alcanzar.

- ✓ **Seguimiento estacional**, que consiste en el cambio manual de la posición del concentrador unas pocas veces al año para conseguir su apuntamiento.
- ✓ **Seguimiento en un eje**, en el que el concentrador gira respecto a un eje manteniendo al sol dentro de un campo angular de visión del concentrador durante todo el año. El eje de giro suele situarse en las direcciones norte-sur, este-oeste, vertical o polar (dirección norte-sur con elevación igual a la latitud). Estos son sistemas que suelen trabajar en el rango de concentraciones intermedias (40x a 100x).
- ✓ **Seguimiento ideal o en dos ejes**, mediante el cual se mantiene el concentrador apuntado al sol en todo momento. En la práctica, son los sistemas que alcanzan los niveles más altos de concentración.

## SEGUIMIENTO EN UN EJE



Figura 1.4. Sistema de 2-MW emplazado en Sacramento, California (fuente: DOE/NREL, Warren Gretz)



Figura 1.5. Planta solar EUCLIDES (concentradores cilindro parabólicos).



## SEGUIMIENTO EN DOS EJES



Figura 1.6. Planta fotovoltaica (concentrador constituido por lentes de Fresnel lineales arqueadas- Entech-). Fuente NASA.



Figura 1.7. Concentrador disco parabólico con un motor Stirling en la Plataforma Solar de Almería (PSA).

### **1.1.3. SISTEMAS HÍBRIDOS TÉRMICO-FOTOVOLTAICOS (PVT)**

Los sistemas híbridos se basan en el mismo principio que los sistemas de energía solar térmica, en los cuales se hace circular por el interior de un conducto un fluido que se calienta por la energía que recibe del Sol. Este tubo se sitúa por detrás de una superficie de absorción de los rayos solares. En los sistemas híbridos lo que se hace es situar las células fotovoltaicas sobre una superficie bajo la cual circula el fluido, en este caso se sustituiría la superficie de absorción de los sistemas de captación térmica por las células fotovoltaicas.

De este modo se obtiene energía eléctrica a través de las células y energía térmica a través del fluido. Este fluido además cumple una doble función: aumenta su temperatura obteniéndose de esta forma energía calorífica y a su vez sirve para refrigerar el sistema como un disipador. (Las células fotovoltaicas a temperaturas elevadas disminuyen su rendimiento).

Los sistemas híbridos, al igual que los térmicos y los fotovoltaicos, pueden recibir la radiación normal o concentrada.

## **1.2. ANTECEDENTES**

### **1.2.1. DESCRIPCIÓN DE DIFERENTES PROGRAMAS**

#### Programa del DOE

En 1978, el departamento de energía de los Estados Unidos de América (U.S. Department Of Energy, DOE) inicio un plan para diseñar, manufacturar y evaluar diferentes tipos de sistemas de concentración. Setenta aplicaciones experimentales de concentración fotovoltaica fueron seleccionadas, representando una amplia variedad en tamaño, tipo de aplicación y soluciones técnicas. Durante los años 80, los sistemas de concentración no conocieron las mejoras necesarias para obtener los costes y las eficiencias necesarias para hacerse un hueco en el mercado. La eficiencia máxima obtenida por todos los experimentos de la época estaba entre 10 y 11%. Pero el aumento de la eficiencia de las células de concentración (de 14% en 1976 a 28% en 1986 para una célula de la Universidad de Standford a 140 soles) ayudó a que se mantuvieran los esfuerzos destinados al desarrollo de módulos de concentración.

Al inicio de los años 90, el DOE creó el programa PNCI (Photo Voltaic Concentrator Initiative), incluyendo a cuatro fabricantes de células y cuatro fabricantes de módulos de concentración. Pero en 1993, a pesar de haber conseguido eficiencias de colectores entre 19 y 25% en sistemas de lentes, una reducción de fondos del DOE acabó con este programa. Sólo algunas empresas como ENTECH continuaron sus esfuerzos en el campo de las tecnologías de concentración.

En la actualidad con el resurgimiento de la energía solar de nuevo el DOE está encabezando la investigación científica en sistemas solares, principalmente para conseguir que la tecnología utilizada sea competitiva en costes, destinando para ello en el 2007 más de 167 millones de dólares.

### Programas europeos

Al final de los años 70, varios experimentos se llevan a cabo en Europa:

- Panel Ramón Areces; Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid
- Sophocle; LAAS, Toulouse, Francia
- PCA; Ansaldo, Genova, Italia

Todos utilizan paneles con la tecnología de Lentes de Fresnel. Ansaldo también experimenta un concentrador de reflector parabólico.

En los años ochenta, destaca en Europa la colaboración de la Universidad Politécnica de Madrid con la empresa española de producción de paneles fotovoltaicos ISOFOTON S.A. en el ámbito de los concentradores estáticos, que no llegó a salir al mercado porque la baja concentración obtenida (alrededor de 2X) y su correspondiente reducción de las células fotovoltaicas a emplear no permitieron compensar los costes del sistema.

Durante los años noventa, el proyecto EUCLIDES (EUropean Concentration Light Intensity Development of Energy Sources) se creó dentro del programa JOULE de la Unión Europea. Como resultado, un concentrador basado en un reflector parabólico fue desarrollado e instalado en Madrid en 1995, rozando los 14% de eficiencia. Más tarde, también financiado por la Unión Europea, una planta de demostración de 480 kW fue construida en Tenerife (España) en 1998.

Por su parte, el Fraunhofer-Institut for Solare Energyssystem (FISE) desarrolló un concentrador en dos etapas (reflector parabólico + CPC), con seguimiento en un eje y células de GaAs que logró una concentración de 300 soles.

Un proyecto llamado IDEOCONTE financiado por la Unión Europea (V programa marco, 2002-2006) tuvo como objetivo identificar la configuración más apropiada para los sistemas de concentración fotovoltaica, basados en células de silicio y para la aplicación en plantas de producción en diferentes regiones. El rango de concentración estudiado es de 2 hasta 200X experimentalmente. La primera parte de estos estudios ha permitido mejorar el diseño de los concentradores y el análisis de costes para varias estructuras de seguimiento. El objetivo fue determinar el coste real y los mejores sistemas para aplicaciones del rango de 100 hasta 2000 kWp. Como principal sistema de concentración involucrado en el proyecto se menciona al Euclides, desarrollado por la Universidad Politécnica de Madrid.

#### Otros programas de investigación

Australia es uno de los países más involucrados en el desarrollo de la energía solar concentrada. La Australian National University (ANU) ha desarrollado y fabricado varios concentradores, algunos de los cuales están funcionando en plantas piloto. En relación al tema de la tesis, se menciona el proyecto CHAPS (Combined Heat And Power Solar), en el que se financió la construcción de 40kW térmico/fotovoltaicos del sistema CHAPS (se describirá posteriormente) sobre la azotea de un edificio.

Japón ha trabajado históricamente más en el sector de la baja concentración, pero últimamente, atraído por las grandes expectativas levantadas por los sistemas de alta concentración, esta trabajando en el desarrollo de sistemas de alta concentración y de células de Multi-Junction para esas aplicaciones.

Israel también es de los países históricamente involucrados en el desarrollo de esta tecnología, particularmente a través de la Universidad Ben Gurion. El profesor Jeffrey Gordon es quien encabeza el Departamento de Energía Solar y Física Medioambiental, especializado con reconocimiento a nivel mundial en óptica para sistemas solares de concentración, caracterización de células multiunión, nanomateriales (fullerenos), óptica biomédica y biotecnología.

Se pueden citar también los esfuerzos recientes realizados por países con mercados energéticos en fases de crecimiento muy rápido y con grandes problemas de suministro energético para las zonas aisladas, como China y la India.

Después de esta breve descripción de la historia de los concentradores, se puede concluir que la tecnología aún no está madura. La primera prueba de ello es que aún no se ha hecho un hueco en el mercado. Otro indicio muy significativo es que, tanto en Estados Unidos como en la Unión Europea, los proyectos en marcha se dedican básicamente a estudiar los diferentes tipos de concentradores para seleccionar los de mayor proyección: Existe una variedad de tecnologías muy grande y se necesitan muchos experimentos para evaluar las mejores soluciones.

## 1.2.2. ANTECEDENTES DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE CONCENTRACIÓN

Los estudios más relevantes que se han realizado dentro de los colectores PVT con concentración son los siguientes:

Garg analiza la utilización de reflectores planos sin seguimiento con ratios de concentración de 2x para PVT refrigerados por aire (Garg *et al.*, 1999) y un sistema de termosifón (Garg *et al.*, 1994). Sharan y Kandpal (1992) caracterizan un colector PVT con seguimiento solar en un eje, con un reflector Fresnel de una concentración de 5x.

Más recientemente se ha estudiado el uso de concentradores parabólicos compuestos (CPCs) para sistemas PVT (Brogren y Karlsson, 2002; Brogren, 2001; Brogren *et al.*, 2000; Garg y Adhikari, 1999). Garg analiza un concentrador CPC de 3x con aire como fluido de trabajo, concluyendo que el concentrador puede mejorar su diseño si se requieren temperaturas más elevadas. En Suecia, Brogren está explorando la utilización de CPCs para aplicaciones en sistemas PVT que requieren agua como fluido de trabajo. En particular, Brogren está estudiando las propiedades ópticas de los CPCs y el impacto en el diseño de las células fotovoltaicas de los efectos de iluminación no uniforme, alta temperatura y alta intensidad lumínica.

Con ratios más elevados de concentración (media concentración) ENTECH probó dos sistemas que utilizaban lentes Fresnel lineales. El primer ensayo, con un concentrador de 25x fue en el hotel Hyatt en Dallas / Fort Worth Internacional Airport. Este sistema producía 24kW eléctricos y 120 kW térmicos (este sistema estuvo en funcionamiento de 1982-1992). El segundo sistema que utilizó fue en Sandia-

Albuquerque, con una concentración de 40x, y con unos rendimientos de 22kW eléctricos y 70kW térmicos.

Actualmente en la Universidad Nacional de Australia (ANU) están trabajando con sistemas PVT, a los que denominan CHAPS (Combined Heat And Powered Solar). Estos sistemas utilizan un concentrador parabólico, con un ratio de concentración que oscila entre los 20 – 40x. (Coventry y Lovegrove, 2003; Coventry, 2005).

En la Universidad de Lleida se han construido y estudian colectores PVT con concentradores Fresnel de espejos, que consiguen concentraciones de entre 5 y 20X (Chemisana *et al.*, 2006; Rosell *et al.*, 2005).

Aumentar concentración a unos niveles mayores tiene el problema de que las células están sometidas a un flujo de calor muy elevado. Para evitar en cierta medida este efecto, se utilizan unos filtros que sólo permiten el paso de la radiación directa con el rango del espectro que utilizan las células fotovoltaicas. El resto de la radiación es desviada directamente a un absorbedor térmico. Este método se conoce como *spectral beam splitting*, y esta descrito perfectamente por Imenes y Mills (2002).

Hamdy *et al.* (1988) realizaron una simulación en TRNSYS comparando un colector PVT con una concentración de 50x con otro colector sólo fotovoltaico con tecnología *beam splitting* a 50 y 22x. Un consorcio japonés (Yang *et al.*, 1997) propuso un sistema similar usando un espejo parabólico selectivo. El *spectral beam splitting* se propuso también para dos concentradores en Australia, *the Multi Tower Solar Array* (Mills *et al.*, 2002) y el *SS20* (Lasich, 2001).

En la actualidad, tanto los colectores de baja, como de media y alta concentración tienen unas características que por su tamaño, peso, etc. prácticamente limitan su uso a sistemas industriales que dispongan de grandes azoteas o superficies; o en el caso de los sistemas domésticos (baja concentración), a casas, edificios que al igual que en el caso anterior dispongan de superficies importantes.

En el caso de las viviendas, y teniendo en cuenta el precio actual del suelo, ocupar un espacio grande con el sistema PVT supone no poder destinar ese espacio a otro uso. Además a la concentración a la que se trabaja en estos sistemas domésticos (2-5x) se requiere de un número elevado de m<sup>2</sup> de colector, para obtener unos mínimos de energía del colector.

Teniendo en cuenta estas consideraciones y la necesidad actual de la utilización de energías renovables para evitar el agotamiento de los recursos, la degradación de la capa de ozono, el calentamiento global...es necesario crear colectores domésticos que

trabajen a una concentración mayor (10-30x) y ocupen un espacio menor. De esta forma se rentabiliza mucho más el m<sup>2</sup> ocupado por el sistema PVT, además de añadir una manejabilidad, posibilidad de acoplado de varios módulos según las necesidades, compacidad, etc. (trabajo en el cual se enfoca la tesis).

### **1.3. MOTIVACIÓN**

#### **Utilización de sistemas de concentración en España/Cataluña**

Los sistemas fotovoltaicos con concentración utilizan sólo la parte directa de la radiación solar. La figura 17 presenta el mapa de radiación directa de España obtenido mediante satélite y editado por el CIEMAT (extraído de la presentación: Centrales Solares Termoeléctricas. Proyectos en Ejecución en España, mayo de 2005 Universidad Politécnica de Comillas, de Manuel Romero –Director de la División de Energías Renovables, CIEMAT-) para la a partir de un estudio realizado mediante Satélite. Se observan dos zonas en rojo:

-La zona de Almería, cuyo potencial era conocido y que favoreció la creación al inicio de la década de los 80 de la Plataforma Solar de Almería por parte del Ministerio de Educación y Ciencia para demostrar la viabilidad técnica de la energía solar concentrada como fuente de energía eléctrica.

-La zona de Lleida y la parte oriental de la provincia de Huesca. Este dato abre la posibilidad de impulsar la Universidad de Lleida como el segundo centro de investigación de las diferentes tecnologías de concentración solar a nivel estatal.

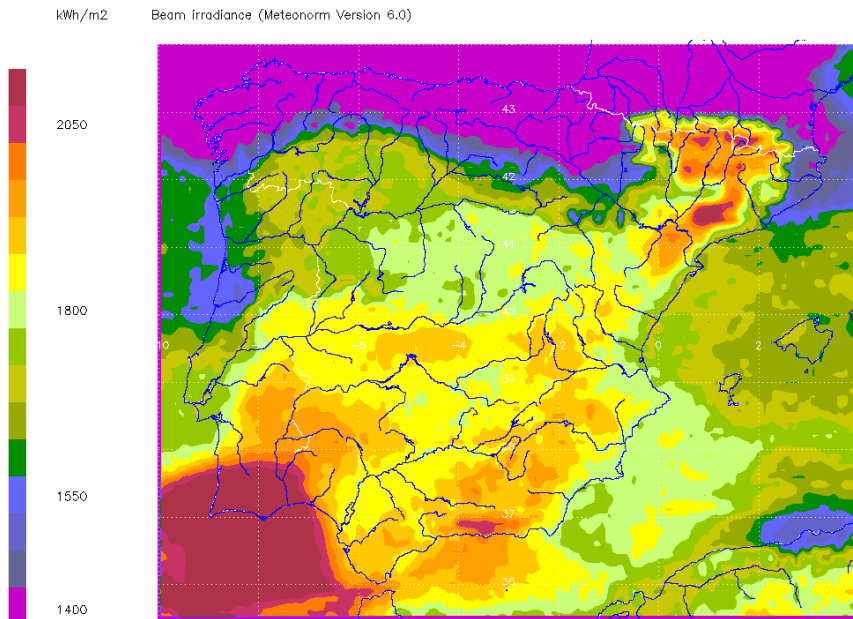


Figura 1.8. Mapa de radiación solar directa en España.

### **Perspectivas de la energía solar por concentración**

La eficiencia cuántica de la conversión fotovoltaica aumenta con la concentración, lo que hace aumentar la eficiencia instantánea del sistema. Pudiéndose reducir el número de células del sistema (del orden del factor de concentración), se pueden emplear células más caras sin repercutir apreciablemente en el coste global. Se están desarrollando tecnologías de células multicapas con eficiencias en laboratorio superiores al 40%. El último record del 42,8 % se basa en la utilización de silicio cristalino junto con otros semiconductores (*University of Delaware consortium, 2007*). La previsión es que esta eficiencia siga incrementándose progresivamente.

Es un dato altamente significativo y positivo que el último record de eficiencia obtenido por el consorcio de la Universidad de Delaware, dentro del programa DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), se haya conseguido con una concentración de 20X. Este rango de concentración está dentro del previsto para el sistema que se propone, por lo que esta línea de investigación, que pretende alcanzar rendimientos de células del 50%, es un aspecto remarcable para la tesis.



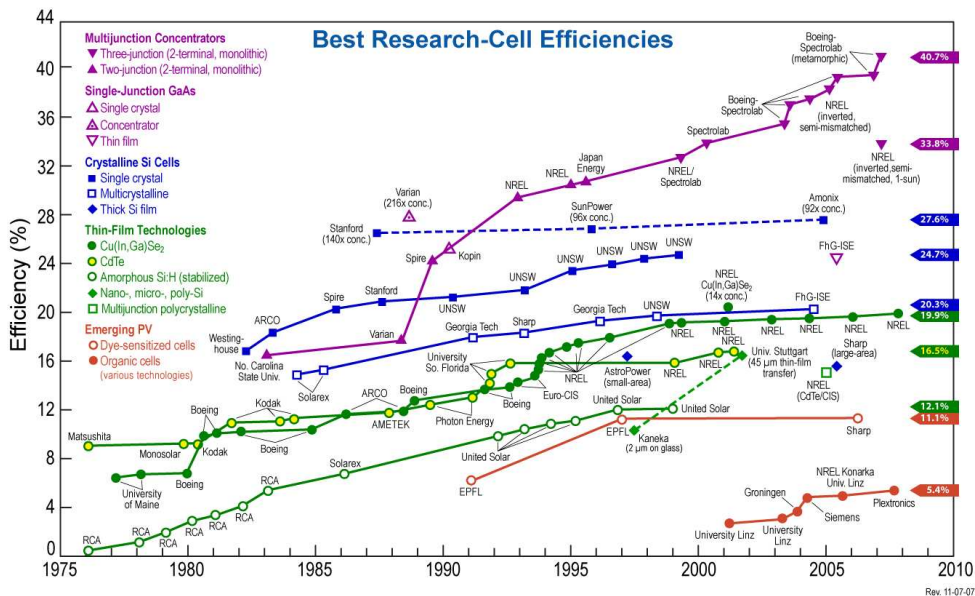


Figura 1.9. Evolución de la eficiencia de las células fotovoltaicas.

La tecnología más prometedora de estas células de nueva generación es la de las multicapas. Para poder aprovechar un intervalo más grande del espectro solar, se apilan varias células unas encima de otras. Cada una de ellas absorbe un intervalo del espectro solar según el material semiconductor que la compone (fig. 1.10). Elijiendo convenientemente los materiales de cada una de ellas para aprovechar al máximo el intervalo de longitud de ondas, se obtienen células de eficiencias muy altas.

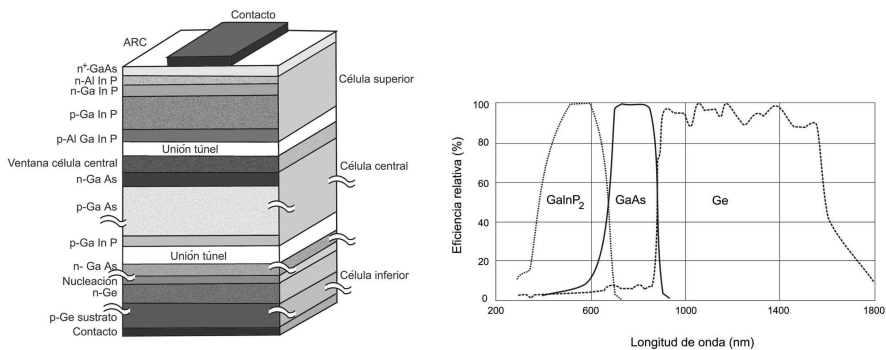


Figura 1.10. Corte de una célula multicapas y bandas de absorción de los diferentes materiales que componen una célula multicapas.

Los concentradores se pueden fabricar con materiales constructivos convencionales, disponibles en gran cantidad en el mercado y con costes razonables (acero, espejos). Esto favorece su desarrollo en el sentido que puede aumentar rápidamente su capacidad de producción a varios centenares de MWh/año usando las infraestructuras industriales ya existentes.

La superficie total de células fotovoltaicas (material más caro) queda dividido por la concentración geométrica que puede ir de 2X a 400X para las células de silicio y de 500X a 1500X para células fabricadas con otros materiales semiconductores. Se reemplaza así un gran número de células (coste aproximado de 500 Euros/m<sup>2</sup>) por unas pocas asociadas a un sistema de concentración compuesto generalmente por espejos (~15 Euros/m<sup>2</sup>) o lentes de Fresnel (~83 Euros/m<sup>2</sup>).

El almacenamiento de la energía producida (térmica y eléctrica) puede realizarse también a través de un sistema de producción de hidrógeno. La capacidad de almacenar la energía solar producida es un aspecto fundamental para el desarrollo de ésta tecnología, ya que las energías renovables está siendo atacadas por su alto coste, pero también por la problemática de su limitada disponibilidad.

Además, se está produciendo un desplazamiento rápido de los días de mayor consumo energético del invierno hacia los días más calurosos del verano en todos los países desarrollados debido al gran consumo de los aparatos de climatización. En California, este fenómeno ya está claramente establecido y ha provocado unos cortes en el suministro eléctrico de una gran magnitud. Esta realidad favorece de manera muy importante el desarrollo de la energía solar de concentración. En efecto, esta tecnología se diferencia de la de los colectores planos por el hecho de que utiliza solo la radiación solar directa, la cual es más importante es en periodos estivales.

Se enumeran y resumen a continuación las ventajas de la concentración solar respecto a los sistemas de placa plana:

### **Eficiencia superior**

Los concentradores son la única opción para conseguir eficiencias de sistemas superiores al 20%. Esto reduce la ocupación del suelo y sus costes asociados

**Menor problemática de disponibilidad de materiales**

Los concentradores utilizan materiales de construcción estándares para la mayoría de sus requisitos.

**Menor uso de productos tóxicos**

Muchos conceptos de células de capa delgada utilizan bastantes productos tóxicos como cadmio, etc. A menor superficie de células, menor utilización de productos nocivos.

**Facilidad de reciclaje**

La tendencia en la fabricación moderna de productos en masa es hacer un producto tan reciclable como sea posible. Los concentradores están compuestos principalmente de materiales fácilmente reciclables como acero, aluminio y plástico. Reciclar paneles planos resulta mucho más difícil.

**Alto porcentaje de producción local**

Aparte de las células, el resto del sistema de concentración puede ser fabricado en cualquier parte del mundo, cerca del punto final de uso.

Tratados los aspectos motivadores de los sistemas híbridos con concentración, a continuación se describen sus principales limitaciones.

## **1.4.LIMITACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR POR CONCENTRACIÓN**

Las células fotovoltaicas de los sistemas con concentración sólo transforman una parte (que depende de su eficiencia instantánea) de las altas densidades de flujo que inciden en las células. La mayor parte de la energía incidente no transformada en electricidad es absorbida por las células en forma de calor, produciendo un elevado aumento de temperatura. La eficiencia de cualquier célula fotovoltaica decrece (en mayor o menor proporción según el tipo de célula) con el aumento de su temperatura (fig. 1.11).

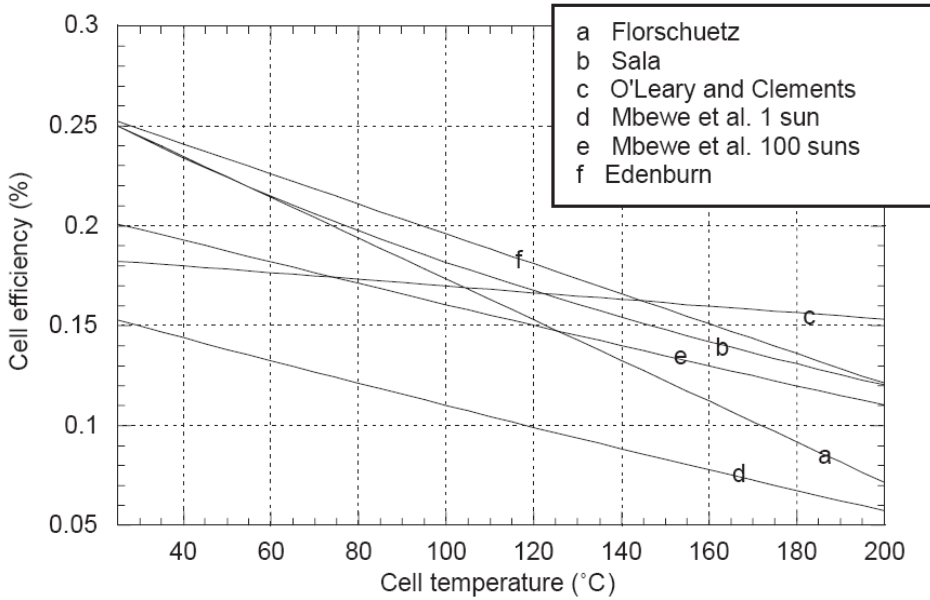


Figura 1.11 Eficiencia de las células fotovoltaicas en función de la temperatura según varios autores (Royne et al., 2005)

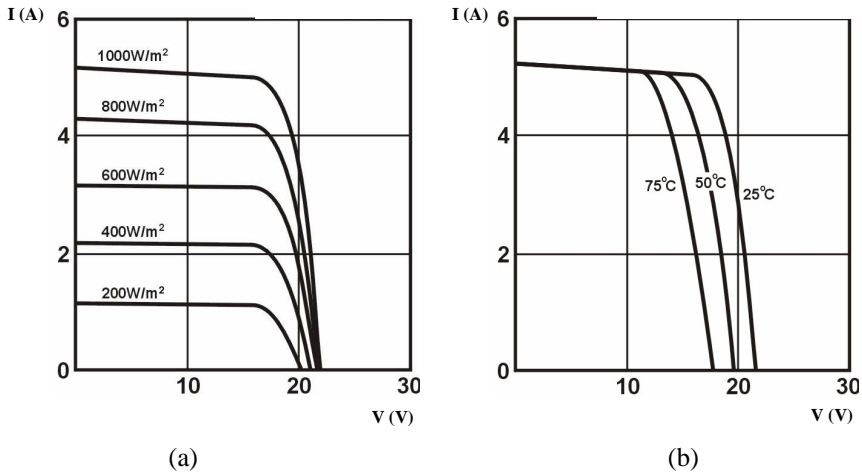


Figura 1.12. (a) Dependencia de la curva I-V con la irradiancia ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) y (b) la temperatura ( $\text{AM1.5}$ ,  $1\text{kW}/\text{m}^2$ ).

Este hecho de la alta temperatura que alcanzan las células fotovoltaicas nos introduce al siguiente apartado, que son los sistemas de disipación.

## 1.5. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE LOS GENERADORES SOLARES FOTOVOLTAICOS

### 1.5.1 INTRODUCCIÓN A LA PROBLEMÁTICA

El estudio de la gestión térmica de los generadores solares fotovoltaicos de concentración se puede realizar desde dos puntos de vista muy diferentes, pero no por ello antagónicos:

1- Una de las motivaciones más importantes para estudiar los colectores híbridos térmico-fotovoltaicos es el hecho de que, incluso con células fotovoltaicas de silicio de alta calidad con eficiencias cuánticas cercanas a la ideal, la mayor parte de la energía del sol se convertirá siempre en calor.

La ganancia en el balance energético global del sistema solar híbrido respecto a un colector solar térmico o fotovoltaico clásico dependerá en gran parte de un aspecto: la capacidad del sistema de disipación para transmitir al fluido refrigerante la energía no transformada en electricidad. Así se mejora la eficiencia global del sistema al aprovechar una mayor cantidad de energía térmica.

El concentrador solar térmico fotovoltaico de Solar Systems Pty. Ltd. en funcionamiento en Australia alcanza una eficiencia global (eléctrica + térmica) de 70%.

2- Para lograr una mayor competitividad en el mercado, los generadores fotovoltaicos necesitan mejorar su producción de energía eléctrica. Para ello, los sistemas con concentración utilizan células fotovoltaicas más caras, pero en menor cantidad y con eficiencias mayores.

Una tecnología que permita controlar al máximo el aumento de la temperatura de las células es claramente un aspecto clave del diseño de los concentradores fotovoltaicos.

En un sistema de aprovechamiento térmico, sus características dependen del salto térmico que se produce entre la entrada y la salida del fluido térmico. Si las células fotovoltaicas están conectadas en serie, hay que tener en cuenta que la producción global se vería limitada por la célula con menor eficiencia instantánea (la que esté sometida a una mayor temperatura, si no se dan otros efectos como por ejemplo el sombreado).

## 1.5.2 ESTADO DEL ARTE

Sala (1989), aunque no haya enfocado únicamente su trabajo hacia los generadores fotovoltaicos de concentración, plantea los efectos de la temperatura sobre los diferentes parámetros de las células fotovoltaicas y describe los esquemas básicos de los sistemas de enfriamiento pasivos y activos.

Florschuetz (1975) presentó un trabajo teórico en el que estableció una ecuación que, para un sistema de enfriamiento dado, encontraba el nivel de iluminación ideal para la generación de la máxima potencia. Pero los puntos coinciden con temperaturas de células muy altas que provocarían la destrucción las mismas. En su trabajo demostró que la importancia de la resistencia térmica del sistema de enfriamiento aumenta con el nivel de concentración. Esto es debido a que la diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) a través de una frontera entre materiales se obtiene a partir:

$$\Delta T = qR \quad (1.1)$$

Entonces, para mantener una diferencia de temperatura constante mientras se aumenta el flujo térmico (o, lo que viene a decir lo mismo, mientras se aumenta el nivel de concentración), se tiene que reducir la resistencia térmica del sistema de disipación.

Existen dos categorías de técnicas de enfriamiento de células, la pasiva y la activa. Las aplicaciones de cada una dependen del nivel de concentración y de la configuración de las células.

Royne *et al.* (2005) describen las diferentes exigencias que debería cumplir un sistema de enfriamiento de un receptor fotovoltaico de concentración: control de temperatura de las células, uniformidad de temperaturas, fiabilidad y simplicidad, aprovechamiento de la energía térmica y potencia de bombeo.

Las diferentes tecnologías de enfriamiento varían en función de si se trata de un sistema de concentración con células aisladas (sistemas de lentes de Fresnel puntuales), sistemas lineales o sistemas de concentración en matrices de células (receptores fotovoltaicos de matriz densa).

El sistema de concentración utilizado es lineal, por lo que se describe a continuación esta tipología de tecnologías de enfriamiento.

### 1.5.2.1 Tecnologías de enfriamiento para receptores lineales

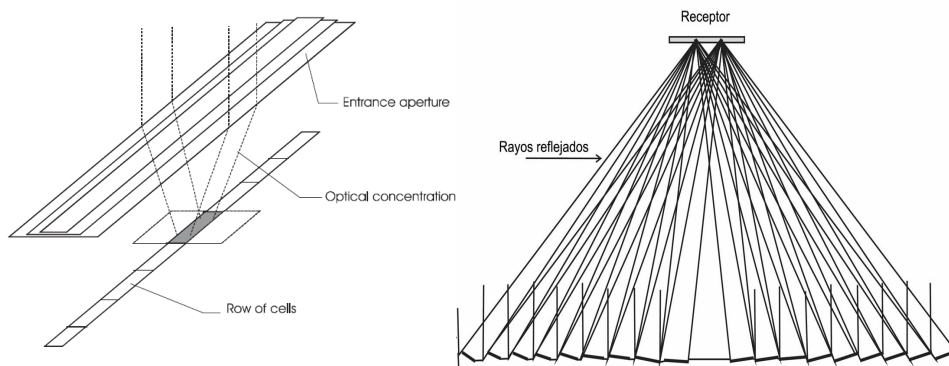


Figura 1.13. Sistemas de concentración en geometría lineal: (a) Refractivo (Royné *et al.*, 2005) y (b) Reflexivo.

Estos sistemas alcanzan niveles de concentración de entre 5 y 40 soles. Pueden ser de tipo refractivo (figura 1.13a) o reflexivo (figura 1.13b).

#### Enfriamiento pasivo

El concentrador parabólico EUCLIDES (de 30 soles), fabricado y en funcionamiento en España, transmite la energía térmica absorbida por las células al ambiente mediante un disipador de aletas fabricado en aluminio ligero. Para lograr un enfriamiento óptimo de las células, la tecnología utilizada en la fabricación del disipador tuvo que ser bastante costosa: Constituye un 15,7 % del coste total del proyecto mientras que los módulos fotovoltaicos y los espejos sólo supusieron un 11,9 % y 10,8 % respectivamente.

Edenburn (1980) advirtió que, debido a las más altas temperaturas de las células fotovoltaicas, que implican un camino más largo para que el calor sea conducido a las aletas de refrigeración del disipador, el enfriamiento pasivo de un diseño lineal es mucho más caro que para la configuración de una célula aislada.

También se han estudiado sistemas de enfriamiento pasivo en esta configuración mediante tubos de vacío (Feldman *et al.*, 1981; Launay *et al.*, 2004; Akbarzadeh y Wadowski, 1996). Los resultados obtenidos son correctos pero no se han realizado estudios de impacto sobre el precio total del sistema.

### Enfriamiento activo

Florschuetz (1975) observó en el caso del enfriamiento activo por aire, la baja capacidad térmica del aire provocaba un aumento considerable de la temperatura a lo largo de la fila de células. La potencia de bombeo resultaba además considerable respecto a la efectividad del enfriamiento. El enfriamiento por agua permite además trabajar a niveles de concentración más altos.

Edenburn (1980) demostró que, para la configuración lineal, el enfriamiento activo resultaba más rentable que el pasivo. El número de trabajos realizados es también mucho más importante. La mayoría de ellos utilizan tubos o canales de aluminio, acero galvanizado o de cobre, colocados al dorso de la fila de células, por los cuales fluye en líquido refrigerante. Las resistencias térmicas de esta tipología de sistemas son del orden de  $10^{-4}$  K.m<sup>2</sup>/W, (con circulación del fluido térmico en régimen laminar). Es importante evaluar estas resistencias con las respectivas potencias de bombeo necesarias. Se ha demostrado que existe una región óptima de operación en cuanto a la potencia de bombeo, porque el ritmo de aumento de la resistencia térmica baja cuando el flujo másico crece.

El sistema *CHAPS* de la *Australian National University* (figura 13 a)) es uno de los sistemas de concentración lineal con enfriamiento activo más avanzado en su proceso de desarrollo (Coventry, 2005). Trabaja a 37 soles y tiene una eficiencia eléctrica y térmica de 11 % y 57 % respectivamente. No se ha estudiado el efecto del aumento de la temperatura a lo largo de cada fila del concentrador que puede llegar a medir más de 20 metros. Este aspecto puede tener una influencia notable sobre la eficiencia total de los concentradores lineales.

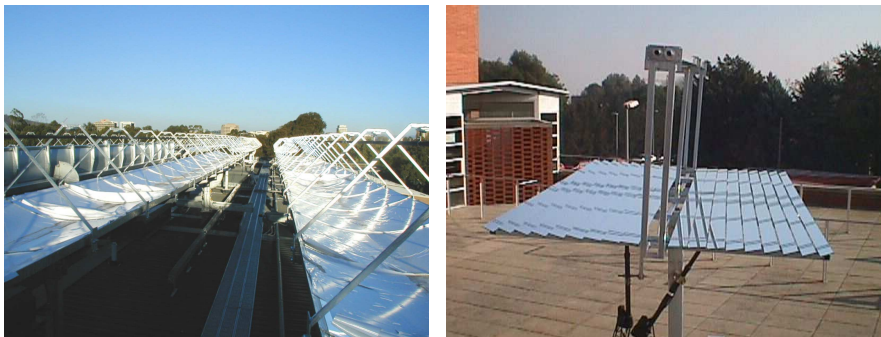


Figura 1.14. Sistemas de concentración lineales: Sistema CHAPS (izquierda); Sistema BIFRES  
11X



El grupo de investigación en energía solar de la Universidad de Lleida ha desarrollado el sistema BiFres11X (figura 1.14) (Rosell *et al.*, 2005), un generador híbrido térmico-fotovoltaico que alcanza los 11 soles de concentración mediante un reflector tipo Fresnel. Las eficiencias eléctricas y térmicas son de 11,9 % y 56 % respectivamente, del orden del sistema CHAPS, pero con concentraciones menores

## 1.6. OBJETIVOS

El objetivo motivo del trabajo es diseñar y caracterizar un sistema solar híbrido de concentración cuya finalidad sea su integración arquitectónica en edificios.

El diseño presenta una gran versatilidad en la incorporación en edificios:

Se puede utilizar en tejados; cumpliendo funciones de cubierta que permite el paso de la luz solar al edificio o emplazado sobre el cerramiento de bloques de hormigón, ladrillos, etc. Además permite que su funcionamiento sea satisfactorio tanto en tejados planos como con pendiente.

En las fachadas se puede integrar de diversas formas, constituyendo un muro cortina, formando parte de las barandas de las terrazas, haciendo la función de una fachada ventilada, etc.

Además de que el sistema sea integrable, un objetivo adicional es que al tratarse de un sistema híbrido posibilite tanto el abastecimiento de energía térmica como de electricidad en un alto porcentaje. Atendiendo a las directivas gubernamentales de inclusión de sistemas térmicos en edificios, etc. la alternativa que se ofrece se pretende proporcione una opción ventajosa e interesante.

### 1.6.1. DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS

La tesis se estructura de la siguiente manera: El presente capítulo expone las características de los sistemas solares de concentración e híbridos.

A continuación, se detalla en el capítulo 2 el análisis del sistema óptico que incorpora el prototipo. El tercer capítulo incluye la descripción del procedimiento experimental para la caracterización de sistemas refractivos constituidos por lentes de Fresnel. Este estudio se ha realizado conjuntamente con el Centro Nacional de la Investigación Científica (*Centre National de la Recherche Scientifique, CNRS*).

En el capítulo 4 se describe el montaje desarrollado para el estudio experimental del sistema de disipación.

Como el diseño de disipador utilizado no tiene antecedentes directos, una caracterización de sus prestaciones es necesaria. Para ello se ha desarrollado un modelo numérico que se detalla en el capítulo 5 y que se valida en base a los resultados obtenidos en el diseño experimental.

Para caracterizar el colector en su conjunto se realiza un análisis térmico del mismo por el método de resistencias térmicas, con el objetivo de conocer la curva característica del colector (capítulo 6).

En el capítulo 7 se elabora un análisis energético global del sistema, mediante su simulación en el software TRNSYS.

Finalmente se termina con el capítulo número 8 de conclusiones, que recoge los principales resultados de la tesis y orienta los futuros trabajos relacionados con el sistema propuesto.

# Capítulo 2

## Análisis óptico del sistema

Como se ha pincelado en la introducción el sistema que se describe es un dispositivo con capacidad de aprovechamiento térmico y eléctrico simultáneo, que trabaja en condiciones de concentración lineal con ratios de alrededor de 10X.

A continuación se diseñan y analizan una serie de dispositivos ópticos, siendo el objetivo final obtener un sistema que, funcionando en condiciones de seguimiento estacional, cumpla una serie de requerimientos y condicionantes que más adelante se especificarán y desarrollarán.

El capítulo se divide en dos puntos principales:

- A. El concentrador primario.
- B. El concentrador secundario.

Previamente se realiza una introducción a la óptica geométrica (formadora de imagen) y a la óptica no formadora de imagen. Incluyendo una breve descripción de los elementos ópticos que se utilizarán.

### 2.1. INTRODUCCIÓN

#### 2.1.1. ÓPTICA GEOMÉTRICA (FORMADORA DE IMAGEN)

Es la que estudia los cambios de dirección de los rayos luminosos al interaccionar con la materia.

En óptica geométrica se definen los siguientes postulados fundamentales:

- La luz se propaga en forma de rayos emitidos por fuentes luminosas y pueden ser observados cuando alcanzan un detector óptico.

- Un medio óptico se caracteriza por una cantidad  $n > 1$ , llamado índice de refracción, que es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío,  $c$ , y la velocidad de la luz en el medio,  $v$ .

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.1)$$

- La definición del índice de refracción indica que, para el vacío,  $n = 1$ . Por otra parte, a partir de la ecuación anterior, se puede obtener el tiempo ( $t$ ) que tarda la luz en recorrer una distancia  $s$ , ya que

$$t = \frac{s}{v} = \frac{ns}{c} \rightarrow t = \frac{L_{op}}{c} \quad (2.2)$$

donde se define el camino óptico como

$$L_{op} = ns \quad (2.3)$$

- En un medio heterogéneo, el índice de refracción es una función de la posición determinada por el vector  $\vec{r} = \vec{r}(x, y, z)$ , de forma que  $n = n(\vec{r})$ . En estos casos, para calcular el camino óptico a lo largo de una trayectoria luminosa entre dos puntos A y B, se debe descomponer la trayectoria en pequeños elementos infinitesimales,  $ds$ , de forma que

$$L_{op} = \int_A^B n(\vec{r}) ds \quad (2.4)$$

Es decir, el tiempo que tarda la luz en recorrer la trayectoria desde el punto A hasta el punto B es proporcional al camino óptico y vale

$$t = \frac{L_{op}}{c} \quad (2.5)$$

### 2.1.1.1. Principio de Fermat

Antes de que Maxwell desarrollara su teoría electromagnética, la propagación de la luz y otras ondas fue descrita empíricamente por dos principios desarrollados por C. Huygens (1629-1695) y P. Fermat (1601-1665). Dichos principios constituyen la base de la Óptica Geométrica.

Hay que tener en cuenta que con la Óptica Geométrica se obtienen los mismos resultados que con la Óptica Electromagnética, siempre y cuando la longitud de onda de la luz sea mucho menor que los objetos con los que interacciona. La Óptica Geométrica se ocupa solamente de cuestiones relacionadas con la propagación de la luz, de forma que su objetivo es determinar las trayectorias de la energía radiante a través de distintos medios. Esta teoría se basa en los conceptos de rayo luminoso, utilizado para caracterizar la luz; y de índice de refracción, que caracteriza los medios materiales por los que se propaga la luz.

#### Principio de Huygens

Cada punto de un frente de ondas primario sirve como foco de ondas esféricas secundarias que avanzan con una velocidad y frecuencia igual a las de la onda primaria. El frente de ondas primario al cabo de un tiempo es la envolvente de estas ondas elementales.

Definiéndose el frente de ondas como el lugar geométrico de los puntos cuya diferencia de fase es constante.

#### Principio de Fermat

El camino óptico a lo largo de una trayectoria real de luz es estacionario, es decir, es un extremal.

Un extremal puede ser un mínimo, un máximo o un punto de inflexión. Sin embargo, normalmente suele ser un mínimo, en cuyo caso los rayos de luz se propagan a lo largo de trayectorias de tiempo mínimo. Dicho de otra forma: la trayectoria seguida por la luz para pasar de un punto a otro es aquella para la cual el tiempo de recorrido es mínimo.

### 2.1.1.2. Propagación de la luz en un medio homogéneo

En un medio homogéneo, el índice de refracción no varía de un punto a otro, y por lo tanto la velocidad de la luz será constante. En este caso, el camino de tiempo mínimo que exige el principio de Fermat es también el camino de mínima distancia, ya

que  $L = ns$ . Esto implica que las trayectorias de la luz en medios homogéneos serán siempre rectilíneas, además también son reversibles.

### 2.1.1.3. Leyes de la refracción y de la reflexión

Cuando un haz de luz incide sobre una superficie límite de separación entre dos medios (por ejemplo aire-vidrio), parte de la energía luminosa se refleja y parte entra en el segundo medio, según se muestra en la figura. El cambio de dirección del rayo transmitido se llama **refracción** (ley de snell) y el rayo reflejado se llama **reflexión**.

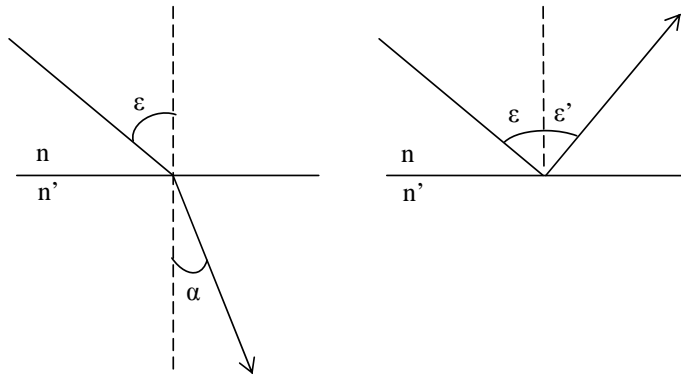


Figura 2.1. Ley Snell (izquierda) y ley de reflexión (derecha).

### 2.1.1.4. Óptica paraxial

Muchas de las situaciones que se estudian en la Óptica Geométrica presentan como particularidad que los ángulos con los cuales se trabaja son pequeños. Cuando se trabaja en estas condiciones se habla de Óptica de primer grado o bien Óptica Paraxial. En estos casos, la aproximación del seno o la tangente del ángulo por su arco es válida:

$$\sin(\varepsilon) \approx \varepsilon \quad \tan(\varepsilon) \approx \varepsilon \quad (2.6)$$

En estas condiciones, la ley de la refracción se escribe  $n\varepsilon = n'\alpha$ .

### 2.1.1.5. Lentes delgadas

Si el grosor de la lente es pequeño frente a los radios de curvatura, se verifica que:

$$\frac{1}{f'} = (n-1) \left[ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right] \quad (2.7)$$

donde  $f'$  es la distancia focal,  $n$  el índice de refracción del material y  $R_1/R_2$  los radios de curvatura.

### 2.1.1.6. Ley de los senos

Se describe a continuación el desarrollo (Rabl, 1976) que está basado en la segunda ley termodinámica aplicada al intercambio radiativo entre un receptor y el Sol. A pesar de que el Sol no es un cuerpo negro se considera como tal, con una temperatura  $T_S$ . Se aproxima el Sol como una fuente esférica de energía radiante. Del principio de conservación de la energía se infiere que el flujo energético varía con el inverso de la distancia desde el centro del Sol. Más concretamente la energía decrece, para esferas cada vez mayores, inversamente proporcional con el área. De tal forma el flujo sobre la superficie de la tierra es igual que el flujo sobre la superficie solar en un factor  $4\pi r_S^2/4\pi d_{TS}^2$  siendo  $r_S$  el radio del Sol y  $d_{TS}$  la distancia de la Tierra al Sol.

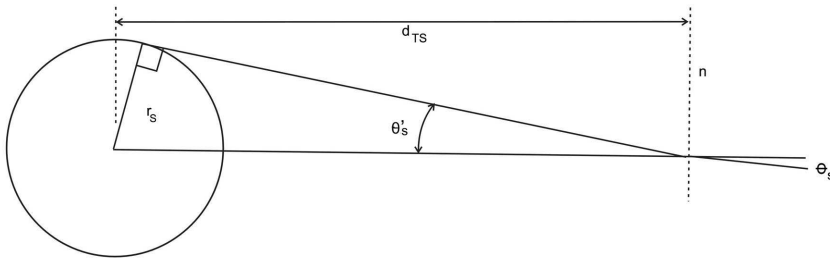


Figura 2.2. Esquema de las relaciones geométricas para un concentrador.

En estas condiciones la energía emitida por el Sol que llega al absorbedor es

$$E_S = A_{ap} \frac{r_s^2}{d_{TS}^2} \sigma T_S^4 \quad (2.8)$$

y la energía que irradia el receptor considerado como un cuerpo negro a una temperatura  $T_r$  es

$$E_r = A_r \sigma T_r^4 E_r' \quad (2.9)$$

donde  $E'_r$  representa la fracción de energía radiada que llega al Sol,  $A_{ap}$  y  $A_r$  las áreas de apertura y del receptor respectivamente.

En el equilibrio termodinámico  $T_s$  y  $T_r$  se igualan, y por la segunda ley de la termodinámica  $E_s$  es igual a  $E_r$ , así pues

$$\frac{A_{ap}}{A_r} = \frac{d_{TS}^2}{r_s^2} E'_r \quad (2.10)$$

como el valor máximo de  $E'_r$  es la unidad, geoméricamente se puede deducir que  $\text{sen } \theta'_s = r_s/d_{TS}$  y generalizando la expresión para cualquier medio de índice  $n$  mediante la ley de Snell, el máximo de la concentración geométrica resulta

$$C_{x,m\acute{a}x} = \left[ \frac{A_{ap}}{A_r} \right]_{m\acute{a}x} = \frac{d_{TS}^2}{r_s^2} = \frac{1}{\text{sen}^2 \theta'_s} = \frac{n^2}{\text{sen}^2 \theta_s} \quad (2.11)$$

Cuando el concentrador se considera unidimensional o lineal la expresión anterior se reduce a la siguiente

$$C_{x,m\acute{a}x,lineal} = \left[ \frac{A_{ap}}{A_r} \right]_{m\acute{a}x,lineal} = \frac{n}{\text{sen } \theta_s} \quad (2.12)$$

A las 2 ecuaciones anteriores se les denomina la *ley del seno de la concentración*.

## 2.1.2. CONCENTRACIÓN SIN FORMACIÓN DE IMAGEN (ANIDÓLICA)

El sistema óptico anidólico es aquel que no produce una imagen de la fuente de luz. Se diseña para concentrar la radiación en una densidad tan alta como teóricamente sea posible.

La óptica anidólica se utilizó en sus inicios para detectar la radiación de Cerenkov en un reactor de fisión en los años 60. La radiación de Cerenkov es una señal débil y tiene un ángulo de emisión limitado; estas características exigieron el uso del concentrador anidólico. Un detector para la radiación de Cerenkov con un concentrador



anidólico fue instalado en el laboratorio de Fermi de la universidad de Chicago, y en el laboratorio nacional de Argonne en los E.E.U.U. por Hinterberger y Winston. El trabajo anterior sobre este concentrador ideal fue emprendido por Baranov en la anterior URSS (Winston y Welford, 1989).

El sistema anidólico puede concentrar la radiación solar de baja densidad sin un mecanismo de seguimiento solar. Puede ser diseñado como concentrador solar estático. Esta característica es muy atractiva, realizándose muchos estudios desde los años 70, conducidos por el equipo de la universidad de Chicago. Los trabajos en esta época se centraron en el diseño y los fundamentos teóricos de concentradores estáticos. Su cociente de concentración máximo tiene un valor teórico de cuatro en términos de densidad del flujo de radiación. Después de estos estudios en baja concentración, los investigadores han cambiado sus líneas de investigación hacia el diseño de colectores de alta concentración solar. En teoría el concentrador óptico anidólico es ideal, y puede alcanzar un cociente de concentración máximo de  $n^2 \times 43400$  con un material transparente de índice de refracción  $n$ . (El índice de refracción del aire es  $n = 1$ ).

La óptica anidólica se ha desarrollado a partir de la óptica geométrica. En contraste con los dispositivos formadores de imagen, los sistemas anidólicos no crean necesariamente una imagen del objeto (la fuente) en el plano focal. La meta de la óptica anidólica es no alcanzar precisión fotográfica, sino la colección de los rayos incidentes en una primera abertura (entrada) del sistema óptico.

Mientras que los rayos en un sistema de proyección de imagen generalmente atraviesan formando un frente de onda, más o menos ordenadamente del objeto a la imagen. Los rayos individuales dentro del concentrador anidólico pueden dar una impresión desorientada cuando son reflejados o refractados un número de veces antes de salir por la segunda abertura.

### **2.1.2.1. Funciones de los concentradores anidólicos**

En este tipo de concentradores la forma depende totalmente de la función. Un alto cociente de concentración geométrico y los errores ópticos pequeños se relacionan directamente con la extensión del haz o el número medio de reflexiones y las pérdidas asociadas, conceptos de diseño que a menudo están en conflicto. El cociente de concentración y los requisitos a seguir son generalmente correlacionados positivamente. El montaje del reflector o del refractor y el receptor, pueden definir el cociente de

concentración que es alcanzable. La tabla 2.1 da una descripción de la funcionalidad de los conceptos anidólicos del concentrador para lograr bajas, medias, y altas concentraciones.

	Concentración~2X Estacionario	Conc.~20X Seguimiento en un eje (azimutal)	Conc.~200X, 2000X Seguimiento polar en dos ejes.
CPC	++	+	-
Fresnel anidólico	+	++	+
RX, RXI <sup>1</sup>	-	+	++

Tabla 2.1. Clasificación de distintos tipos de concentradores en función a su adecuación al nivel de concentración, de nada (-) a mucho (++).

El concentrador parabólico compuesto o CPC (ver subapartado 2.1.2.2) está bien adaptado para los concentradores solares estacionarios y térmicos. Sus espejos se pueden trincar sin muchas pérdidas en eficacia. El CPC se puede diseñar con ángulos grandes de aceptación, permitiendo que la luz del Sol en la mayoría de sus posiciones entre en la abertura del concentrador. Siendo un concentrador ideal, los rayos serán reflejados totalmente sobre el absorbedor. La geometría del espejo del CPC puede ser manufacturada en metal, y se puede utilizar en colectores solares de tubo evacuado para la generación del vapor.

Cuando están diseñados con ángulos de aceptación pequeños y un cociente más alto de concentración, los espejos del CPC son cada vez más grandes y más profundos. El número medio de las reflexiones para cada rayo aumenta. El ángulo de la reflexión aumenta también, y las pérdidas se elevan. Si la reflexión de los espejos no es excepcionalmente alta, y el concepto anidólico no es una necesidad, las soluciones de la proyección de imagen como los concentradores disco-parabólicos son mejores para conseguir concentraciones elevadas.

La lente de Fresnel anidólica, comparada con el CPC, muestra levemente más pérdidas ópticas cuando está diseñada para la concentración estática. Pero, sin embargo,

<sup>1</sup> Tipología de concentradores anidólicos de tamaño reducido diseñados por Miñano *et al.* en el Instituto de Energía Solar (IES). Las siglas significan: R (refracción), X (reflexión) e I (interna).

no tiene un límite de concentración como es el caso del CPC debido al número y al ángulo de reflexiones. Para cocientes de concentración elevados la dispersión se convierte en el problema dominante, y las aberraciones similares a las lentes de Fresnel formadoras de imagen.

### 2.1.2.2. Concentrador Parabólico Compuesto (CPC)

Los sistemas CPC son concentradores anidólicos que están formados por dos superficies reflectoras parabólicas simétricas colocadas de tal forma que el absorbedor está sobre la línea que une el foco de las dos parábolas, y el foco de cada parábola está en el extremo contrario del absorbedor (figura 2.3). Es un concentrador que no forma imagen y tiene unas características ópticas relevantes. Se demuestra que en un sistema constituido por una pupila de entrada de diámetro  $d_1$ , y de una pupila de salida de diámetro  $d_2$ , si el ángulo de abertura de un haz luminoso incidente es  $\alpha$ , el factor de concentración máxima es:

$$C_x = \frac{d_1}{d_2} = \frac{n_2}{n_1} \frac{1}{\text{sen}\alpha} \tag{2.13}$$

siendo  $n_1$  y  $n_2$  los índices de refracción a la entrada y a la salida.

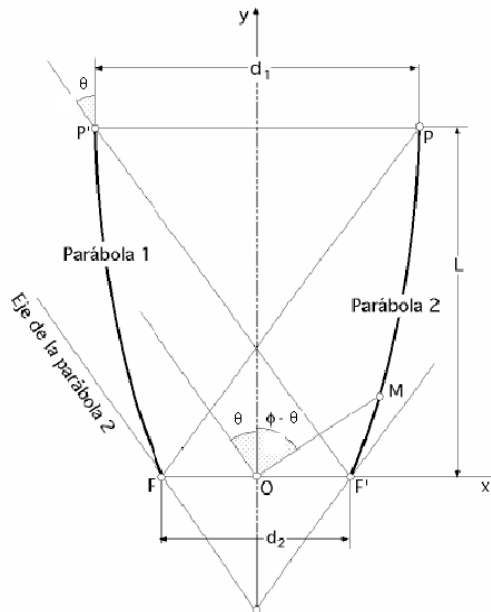


Figura 2.3. Esquema de un concentrador parabólico compuesto CPC.

Si se toma el punto O como origen de coordenadas, se puede comprobar que las ecuaciones del perfil en paramétricas son:

$$\begin{aligned} x &= \frac{d_2(1 + \operatorname{sen} \theta) \operatorname{sen}(\phi - \theta)}{1 - \cos \phi} - \frac{d_2}{2} \\ y &= \frac{d_2(1 + \operatorname{sen} \theta) \operatorname{sen}(\phi - \theta)}{1 - \cos \phi} \end{aligned} \quad (2.14)$$

en las que  $\phi$  es un parámetro igual al ángulo que forma el rayo (OM) con la paralela a (P'F') que pasa por el punto O.

Las tangentes en los extremos P y P' son paralelas al eje de simetría del concentrador.

La altura L del colector viene dada por:  $L = \frac{d_1 + d_2}{2} \cot g \theta$ , y para ( $n_1 = n_2$ ) se obtiene la relación:

$$L = d_2 \frac{C_x + 1}{2} \sqrt{C_x^2 - 1} \quad (2.15)$$

Que es una expresión que depende únicamente de  $C_x$  y de la anchura del receptor  $d_2$ .

### 2.1.3. LENTES DE FRESNEL

En el siglo XVIII, Francia buscaba una manera de hacer los faros nuevos a lo largo de la costa de Normandía y de Bretaña. Las lentes que fueron utilizadas en los faros eran unas piezas enormes de cristal que eran muy abultadas y costosas. En 1748, Georges de Buffon postuló que solamente es necesario un lado de una lente para doblar la luz. De hecho, solamente la superficie externa de la lente es necesaria. Más adelante, Agustín Fresnel modificó esta idea y fue creada la lente de Fresnel moderna. Estas lentes primero fueron utilizadas en la costa francesa

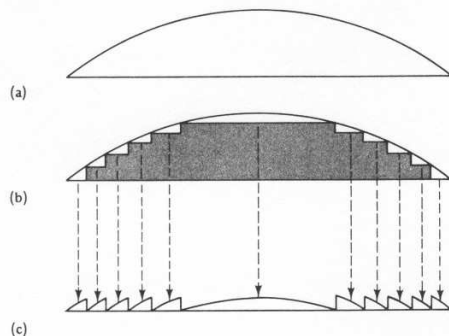


Figura 2.4. Lentes de Bufón (b) y Fresnel (c)

como alternativa ligera y menos costosa a las lentes viejas de faro. Posteriormente y a partir de la idea inicial se utilizan en múltiples aplicaciones, incluyendo la concentración solar.

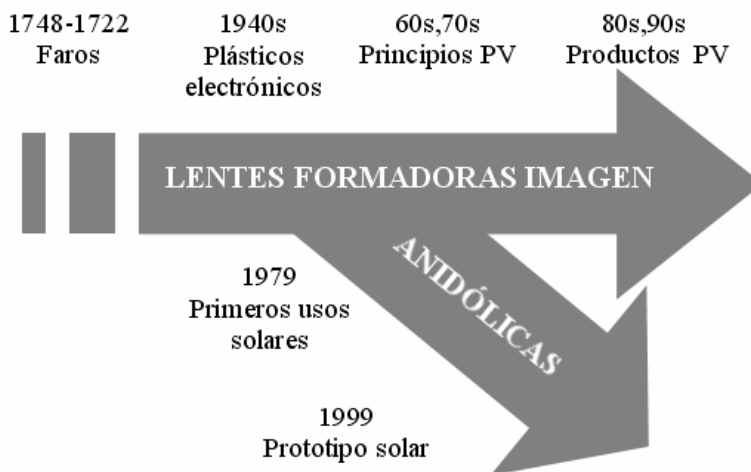


Figura 2.5. Evolución de las lentes de Fresnel

Inicialmente, la mayoría de las lentes de Fresnel seleccionadas para el uso en energía solar no habían sido originalmente diseñadas para la colección de rayos solares. Estas lentes eran dispositivos para la proyección de imagen. Asombrosamente, la mayor parte de las principales mejoras en el diseño de las lentes de Fresnel (tabla 2.2) fueron llevadas a cabo para usos solares. La óptica anidólica ha comenzado recientemente a utilizarse y desarrollarse desde sus orígenes solares en campos como la optoelectrónica.

Año	Inventor	Aplicación
1822	Fresnel (Thomas Tag)	Faro
1951	Millar <i>et al.</i>	Optoelectrónica
1951	Boettner y Barnett	Optoelectrónica
1977	Collares-Pereira <i>et al.</i>	Solar
1978	Kritchman <i>et al.</i>	Solar
1978	James y Williams	Solar
1979	O'Neill	Solar
1979	Collares-Pereira	Solar

1981	Lorenzo y Luque	Solar
1984	Tver'yanovich	Solar
1997	Erismann	Optoelectrónica
1999	Leutz <i>et al.</i>	Solar
2000	O'Neill	Solar
2000	Miñano <i>et al.</i>	Optoelectrónica
2000	Terao <i>et al.</i>	Optoelectrónica

Tabla 2.2. Mayores desarrollos en lentes de Fresnel aptos para uso solar (Fuente: Leutz, 2001).

### 2.1.3.1 Lentes de Fresnel simples

Las lentes de Fresnel formadoras de imagen siguen los mismos principios de la óptica geométrica que también se utilizan para el diseño de otras lentes, particularmente los conceptos de distancia focal y abertura.

Se centran en el eje del sistema óptico. Los diseños con proyección de imagen generalmente se estudian con óptica paraxial y trazado de rayos. Particularmente, los procesos de diseño para las lentes de dos dimensiones y tridimensionales son idénticos, a excepción del tratamiento especial que las esquinas de las lentes cuadradas 3D reciben si están combinadas con los absorbedores circulares.

### 2.1.3.2. Lentes de Fresnel no formadoras de imagen

La utilidad de la óptica anidólica para la energía solar fue demostrada por la aplicación (reflexiva) del concentrador parabólico compuesto (CPC) por Winston (1974), refinado por Rabl (1976). Esto no fue mucho tiempo antes de que el concepto de la óptica anidólica fuera aplicado (refracción) a las lentes de Fresnel. En los 70s, Kritchman *et al.* (1979) y Collares-Pereira *et al.* (1979) diseñaron lentes de Fresnel bifocales, que eran esencialmente anidólicas (tabla 2.2). O'Neil (1978) diseñó una lente bifocal, consiguiendo que esta lente pudiera compensar con su estructura prismática (tolerancia) errores de seguimiento. Lorenzo y Luque construyeron después de estos trabajos el que se considera el primer concentrador real anidólico por refracción con una lente de Fresnel, con un número finito de prismas y unos grosores suficientes para posibilitar su fabricación.

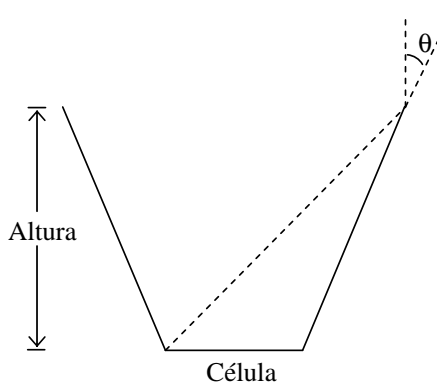
Probablemente W.T. Welford merece el honor que le acredita con la idea inicial del diseño de lentes curvadas, guiado por la formación que realizó a partir del manual de

Winston. En los últimos años Leutz *et al.* (2001) han desarrollado lentes de Fresnel curvadas para la concentración solar en sistemas estáticos.

## 2.1.4. OTROS CONCENTRADORES

Además de los sistemas de concentración descritos en los apartados anteriores, se podrían describir una gran lista de dispositivos: concentrador disco parabólico, concentrador hiperbólico, concentrador cilindro parabólico, concentrador RX, concentrador RXI...De entre todos, se apuntan algunas características de aquellos cuyas particularidades podrían resultar de utilidad para conseguir el diseño óptico final:

### 2.1.4.1 Concentrador tronco cónico



Esta tecnología se basa en dos superficies que reflejan la radiación que les incide sobre un receptor común.

A partir de esta configuración (figura 2.6) se pueden segmentar las superficies en diferentes secciones para de este modo conseguir aumentar la concentración de la radiación que recibe el receptor (Leutz y Fu, 2007).

Figura 2.6. Concentrador tronco cónico.

El concentrador de sección cónica simple tiene un máximo de concentración de  $3X$ , pero a diferencia de los CPC consiguen una mayor uniformidad de iluminación en el receptor y permiten más de una reflexión (para aceptancias pequeñas) de los rayos incidentes en sus paredes (Swanson, 2003).

Una variante son los concentradores que adaptan su geometría al flujo de radiación que reciben (sistemas que normalmente funcionan como segundo elemento óptico), se denominan TERC (tailored edge-ray concentrator)(Gordon, 1996). Este concentrador permite aumentar considerablemente la compacidad de los dispositivos de dos etapas que operan con alta concentración.

El diseño específico de los TERC se realizó para integrarse en sistemas formados por concentradores primarios parabólicos y Fresnel (Friedman *et al.*, 1993; Gordon y Ries, 1993).

Respecto a los concentradores tronco cónicos simples la principal mejora es la fracción de flujo que captan (Friedma *et al.*, 1996).

Los concentradores denominados “trompeta”, que se diseñan mediante hiperboloides de revolución (Winston y Welford, 1979; O’Gallagher y Winston, 1986), consiguen unos rendimientos respecto al máximo termodinámico teórico muy elevados en sistemas de dos etapas. El principal inconveniente es que resultan extremadamente caros (Friedman *et al.*, 1996), especialmente si se utilizan en sistemas lineales donde la superficie de secundario es elevada. Una evolución de este último dispositivo es el sistema CDRIT.

#### 2.1.4.2. Concentrador dieléctrico de reflexión interna total (CDRIT)

La tecnología CDRIT, o en inglés DTIRC, fue desarrollada en Chicago por el grupo de Roland Winston (Winston, 1974), fruto de su estudio en sistemas concentradores anidólicos y las ventajas del uso de materiales dieléctricos.

Conociéndose que el ratio de concentración en un sistema de refracción depende directamente del índice de refracción de los materiales que lo constituyen según la expresión:

$$C_{x,lineal} = \frac{n}{\text{sen } \theta} \quad (2.16)$$

El hecho de incluir elementos dieléctricos es un aspecto que adquiere una gran relevancia.

El diseño práctico de concentradores de reflexión interna total es con paredes planas y sección tronco cónica (Leutz *et al.*, 2001; Leutz y Fu, 2007). A partir de aquí se pueden realizar infinidad de combinaciones: zona de abertura con curvatura, base del sistema con homogeneizador de paredes planas, etc.



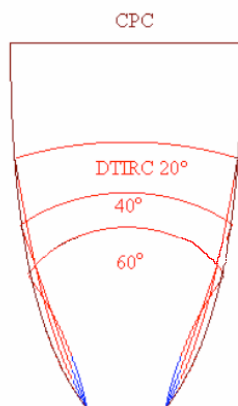


Figura 2.7. Concentrador DTIRC.

En la figura se aprecia como para conseguir la misma aceptación y concentración, los concentradores DTIRC reducen el tamaño, con respecto al CPC, a medida que disminuye el radio de curvatura de la cubierta esférica (mayor arco).

Por el contrario, esta reducción del tamaño implica la utilización de un material dióptrico macizo. Los CPC pueden ser fabricados de aluminio con tratamientos superficiales de alta reflectividad, o con materiales plásticos recubiertos de una capa reflectante...por lo que en el aspecto de coste/facilidad de construcción el CPC aventaja notablemente a los diseños con dieléctrico.

## 2.2. ANÁLISIS CONCENTRADOR PRIMARIO

En los apartados que se elaboran a continuación se estudian elementos ópticos que concentran linealmente la radiación que reciben directamente del Sol, con el fin de iluminar un segundo elemento al que se denominará receptor.

El objetivo de este punto es determinar cual es la tipología de lente (lente de Fresnel...) que se utilizará como concentrador primario.

En primer lugar se realiza un primer estudio óptico desde la aproximación paraxial, para posteriormente profundizar más mediante la simulación por trazado de rayos.

## 2.2.1. ANÁLISIS POR ÓPTICA PARAXIAL

El concentrador primario tiene en el sistema una posición estática, de forma que el seguimiento estacional se llevará a cabo a través del concentrador secundario (receptor).

Es necesario entonces conocer las respuestas del haz de rayos concentrado del primario en función de las diferentes inclinaciones del Sol a lo largo del año.

Este comportamiento se estudia teniendo en cuenta unos requerimientos ya esbozados anteriormente, que son:

- ✓ Concentraciones mayores a 5X (concentración geométrica<sup>2</sup> de ~10X con una zona iluminada de entre 5 y 6 cm.).
- ✓ Distancia focal lo más reducida posible (compacidad).
- ✓ Aceptancia angular de  $\pm 23,5^\circ$  minimizando la dispersión del haz concentrado

La eclíptica solar alcanza su mayor inclinación en los solsticios ( $\pm 23,5^\circ$ ), incidiendo los rayos perpendicularmente a la superficie terrestre en los equinoccios ( $0^\circ$ ). Se analizarán pues los diferentes parámetros de diseño: la distancia focal, desplazamiento del concentrador secundario del foco de la imagen, etc. para las diferentes inclinaciones solares, comenzando por la inclinación de  $0^\circ$ .

Los cálculos se realizan para la posición solar a las 12 horas, ya que las variaciones que supone el movimiento diario solar se estudiarán posteriormente mediante simulación.

### 2.2.1.1. Sistema con el Sol centrado en el eje de la lente, cálculo de la focal adecuada a los requisitos del sistema

El esquema óptico que se analiza (figura 2.9) permite conocer, variando una serie de parámetros, como conseguir la concentración adecuada (~10X) en unas dimensiones dentro de un rango considerado ( $\sim D/2$ ), y con un tamaño del receptor de ~5 cm de abertura. Teniéndose en cuenta que los cálculos que se van a realizar se basan en relaciones geométricas, los resultados serán extrapolables a cualquier dimensión

---

<sup>2</sup> Concentración geométrica ( $C_x$ ), se define como el cociente de la longitud que recibe la radiación solar y la longitud de zona donde el haz concentrado ilumina (receptor). Pudiéndose definir también como el cociente entre el área de la abertura del concentrador y el área del receptor.

teniendo en cuenta que la proporcionalidad se mantenga. La superficie de receptor a iluminar es de 5 cm dado que las células de concentración previstas inicialmente para el desarrollo posterior del prototipo tenían estas medidas. Sin embargo, atendiendo a la posibilidad de extrapolación, los resultados se podrían generalizar para cualquier tamaño de célula.

Se ha considerado como premisa de cálculo que la distancia focal sea de la mitad del ancho de la lente, para que el ángulo límite  $\Phi$  sea de  $45^\circ$  y así la concentración geométrica máxima. Existe una extensión de la ley de los senos que tiene presente el ángulo límite  $\Phi$  del concentrador, definido como el ángulo que subtende los  $\Phi$  extremos de la abertura desde el centro del receptor. Para que el sistema representado pueda recoger todo el flujo entrante el elemento absorbedor debe tener una anchura  $d$  como mínimo igual a:

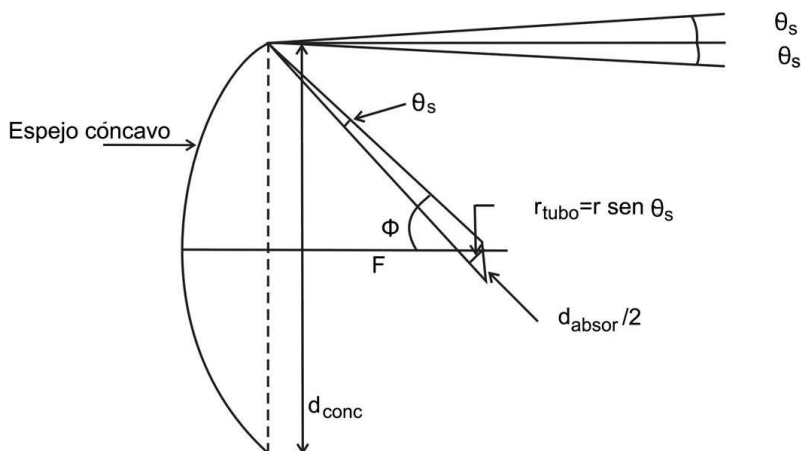


Figura 2.8. Esquema de la marcha de los rayos en un concentrador.

$$d_{concentrador} = 2r \text{sen } \phi$$

$$d_{absor} = 2r \frac{\text{sen } \theta}{\cos \phi} \tag{2.17}$$

$$\left( \frac{d_{concentrador}}{d_{absor}} \right) = 2r \frac{\text{sen } \phi \cos \phi}{\text{sen } \theta} \tag{2.18}$$

utilizando las equivalencias trigonométricas de  $\text{sen } \phi \cdot \cos \phi$  en función del ángulo mitad resulta para la concentración y el numerador de la expresión anterior tiene un valor máximo igual a uno cuando el ángulo límite  $\phi$  es de  $45^\circ$ .

$$C_x = \left( \frac{d_{concentrador}}{d_{absor}} \right)^2 = \left( \frac{\text{sen}2\phi}{2\text{sen}\theta} \right)^2 = \frac{\text{sen}^2 2\phi}{4\text{sen}^2 \theta} \quad (2.19)$$

El esquema óptico de análisis es:

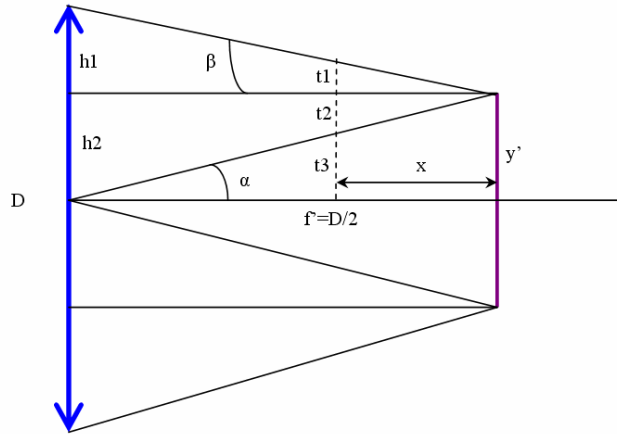


Figura 2.9. Esquema óptico de análisis.

Donde:

D: anchura de la lente.

f': focal de la lente.

x: separación de la posición del receptor con respecto al foco de la imagen.

y': altura de la imagen.

h1, h2, t1, t2, t3,  $\alpha$ ,  $\beta$ : son parámetros de cálculo.  $\alpha$  (semiángulo solar) = 0,27 °.

t1+t2+ t3: Zona iluminada del receptor.

Se observa en el esquema que el sistema es simétrico, por lo que se estudian sólo las imágenes que se forman en la parte superior del eje central de la lente. Con lo cual la zona de receptor a iluminar será la mitad, o sea, 2,5 cm.

Se han estudiado para el esquema anterior varias situaciones, modificándose la focal de diseño ( $f'$ ) y la separación del receptor con referencia al foco de la imagen ( $x$ ), de las cuales se muestran los resultados a continuación:

(Cabe comentar que aunque los resultados son adimensionales, teniendo en cuenta las relaciones geométricas de cada caso, son útiles para ilustrar como se alcanzan las condiciones deseadas).

D/2=f'(m)	x(m)	f'-x(m)	t1(m)	t2(m)	t3(m)	Zona iluminada(m)	C <sub>x</sub>
<b>0,05</b>	0,02	0,03	0,00014	0,00009	0,01991	0,02014	2,48
	0,04	0,01	0,00005	0,00019	0,03981	0,04005	1,25
	0,06	-0,01	-0,00005	0,00028	0,05972	0,05995	0,83
	0,08	-0,03	-0,00014	0,00038	0,07962	0,07986	0,63
	0,1	-0,05	-0,00024	0,00047	0,09953	0,09976	0,50
	0,12	-0,07	-0,00033	0,00057	0,11943	0,11967	0,42
	0,14	-0,09	-0,00042	0,00066	0,13934	0,13957	0,36
	0,16	-0,11	-0,00052	0,00075	0,15924	0,15948	0,31
	0,18	-0,13	-0,00061	0,00085	0,17915	0,17939	0,28
<b>0,1</b>	0,02	0,08	0,00038	0,00009	0,01991	0,02038	4,91
	0,04	0,06	0,00028	0,00019	0,03981	0,04028	2,48
	0,06	0,04	0,00019	0,00028	0,05972	0,06019	1,66
	0,08	0,02	0,00009	0,00038	0,07962	0,08009	1,25
	0,1	0	0,00000	0,00047	0,09953	0,10000	1,00
	0,12	-0,02	-0,00009	0,00057	0,11943	0,11990	0,83
	0,14	-0,04	-0,00019	0,00066	0,13934	0,13981	0,72
	0,16	-0,06	-0,00028	0,00075	0,15924	0,15972	0,63
	0,18	-0,08	-0,00038	0,00085	0,17915	0,17962	0,56
<b>0,15</b>	0,02	0,13	0,00061	0,00009	0,01991	0,02061	7,28
	0,04	0,11	0,00052	0,00019	0,03981	0,04052	3,70
	0,06	0,09	0,00042	0,00028	0,05972	0,06042	2,48
	0,08	0,07	0,00033	0,00038	0,07962	0,08033	1,87
	0,1	0,05	0,00024	0,00047	0,09953	0,10023	1,50
	0,12	0,03	0,00014	0,00057	0,11943	0,12014	1,25
	0,14	0,01	0,00005	0,00066	0,13934	0,14005	1,07
	0,16	-0,01	-0,00005	0,00075	0,15924	0,15995	0,94
	0,18	-0,03	-0,00014	0,00085	0,17915	0,17986	0,83
<b>0,2</b>	0,02	0,18	0,00085	0,00009	0,01991	0,02085	9,59
	0,04	0,16	0,00075	0,00019	0,03981	0,04075	4,91
	0,06	0,14	0,00066	0,00028	0,05972	0,06066	3,30
	0,08	0,12	0,00057	0,00038	0,07962	0,08056	2,48
	0,1	0,1	0,00047	0,00047	0,09953	0,10047	1,99
	0,12	0,08	0,00038	0,00057	0,11943	0,12038	1,66
	0,14	0,06	0,00028	0,00066	0,13934	0,14028	1,43
	0,16	0,04	0,00019	0,00075	0,15924	0,16019	1,25
	0,18	0,02	0,00009	0,00085	0,17915	0,18009	1,11
<b>0,3</b>	<b>0,02</b>	<b>0,28</b>	<b>0,00132</b>	<b>0,00009</b>	<b>0,01991</b>	<b>0,02132</b>	<b>14,07</b>
	<b>0,04</b>	<b>0,26</b>	<b>0,00123</b>	<b>0,00019</b>	<b>0,03981</b>	<b>0,04122</b>	<b>7,28</b>
	0,06	0,24	0,00113	0,00028	0,05972	0,06113	4,91
	0,08	0,22	0,00104	0,00038	0,07962	0,08104	3,70
	0,1	0,2	0,00094	0,00047	0,09953	0,10094	2,97
	0,12	0,18	0,00085	0,00057	0,11943	0,12085	2,48
	0,14	0,16	0,00075	0,00066	0,13934	0,14075	2,13
	0,16	0,14	0,00066	0,00075	0,15924	0,16066	1,87
	0,18	0,12	0,00057	0,00085	0,17915	0,18056	1,66

Tabla 2.3. Resumen resultados varias focales.

En la tabla general se ve que con una focal de 30 cm y a entre 2-4 cm del foco de la imagen se ilumina una zona que ya cumple con los requisitos (zona iluminada > 2,25 cm). Concretamente se obtiene que para iluminar la parte superior del receptor los parámetros son los siguientes:

D/2	x	f'-x	t1	t2	t3	Zona iluminada	C <sub>x</sub>
0,3	0,025	0,275	0,00130	0,00012	0,02488	0,02630	11,41

Tabla 2.4. Resumen resultados focal de 30cm.

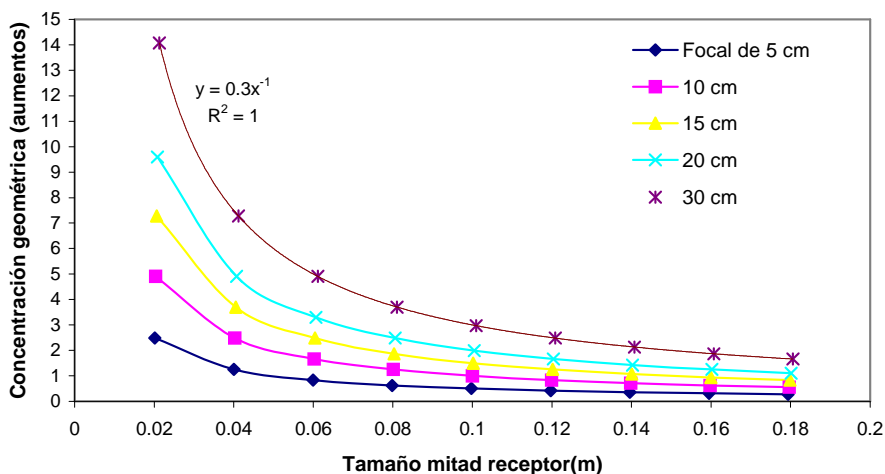


Figura 2.10. Concentración en función de la anchura del receptor para lentes con diferentes distancias focales.

En el gráfico se muestran las funciones que dan la relación entre la zona iluminada y la concentración, a diferentes focales. En los casos en que el Sol no esté centrado con respecto al eje óptico, lo que sucederá es que en la misma función el sistema estará en regiones de la curva con menor concentración. (por ejemplo si el sistema tuviese dos posicionamientos al año, etc.).

Una vez visto que la focal adecuada es la de 30cm, dentro de los condicionantes de tamaño, el siguiente paso será estudiar el sistema de concentración primario-secundario siguiendo el movimiento solar.

Un objetivo fundamental a cubrir por el sistema es su simplicidad mecánica e integrabilidad arquitectónica. Teniéndolo en cuenta, un sistema en el que la parte visible es un vidrio (o material acrílico de apariencia similar al vidrio) que permanece estático y fijo es mucho más fácilmente integrable y estético que cualquier otra posibilidad con movimiento de éste (concentrador primario).

Por lo cual se ha considerado como óptima la configuración en la cual el concentrador primario es fijo y el secundario es el que se desplaza siguiendo el Sol.

### 2.2.1.2. Estudio del sistema con movimiento del receptor

En este apartado se analiza el desplazamiento y características de la mancha focal, que se capta en lo se ha denominado receptor, en función de las diferentes declinaciones anuales.

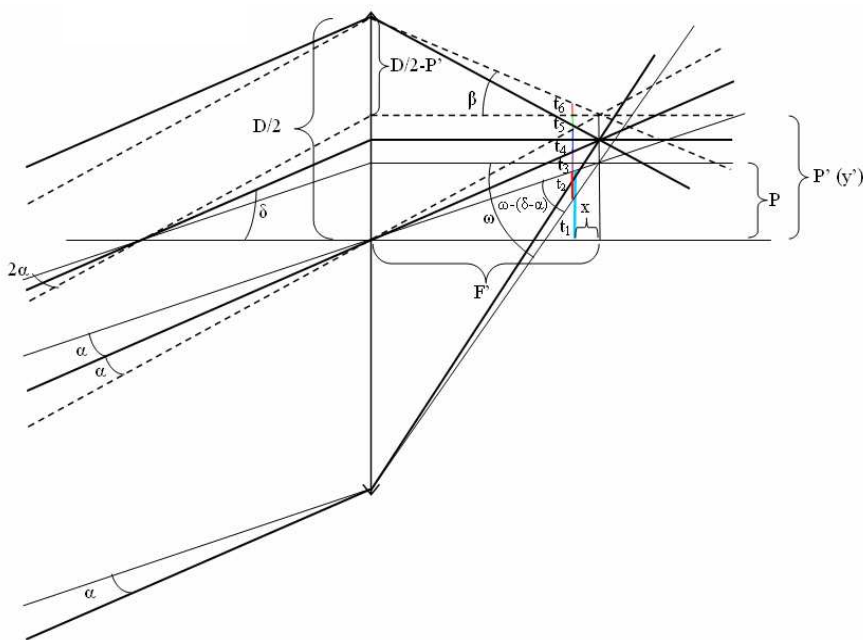


Figura 2.11. Esquema óptico de análisis

Donde:

$t1=(F'-x)\tan(\delta-\alpha)$	$\omega=\arctg[1+\tan(\delta-\alpha)]$
$t2=x\tan[\omega-(\delta-\alpha)]$	$\varphi=\omega-(\delta-\alpha)$
$t3=[(F'-x)\tan(\delta)]-t1$	$\gamma=180-[90+(\delta-\alpha)]-\varphi$
$t4=[(F'-x)\tan(\delta+\alpha)]-t1-t3$	$r=x\cos(\delta-\alpha)$
$t5=x\tan(\alpha+\delta)$	$s=r(\tan\varphi)$
$t6=x\tan(\beta)=x(1-\tan(\alpha+\delta))$	$t2=s/(\sin\gamma)$

Algunas de las variables definidas que no han sido incluidas en el esquema anterior por cuestiones de claridad se representan en un fragmento ampliado a continuación:

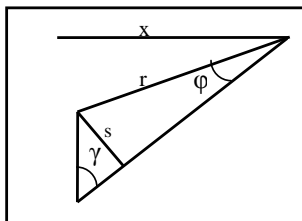


Figura 2.12. Esquema auxiliar

Para este esquema se estudian las variables críticas de diseño (concentración, zona iluminada...) para valores de declinación solar ( $\delta$ ) entre  $0$  y  $\pm 23,5^\circ$ , siendo  $0^\circ$  cuando el Sol está centrado en el eje óptico. Es decir:

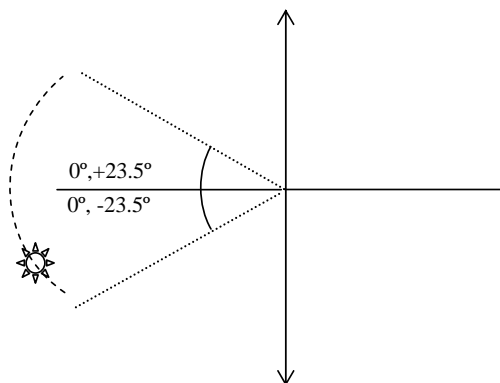


Figura 2.13. Movimiento del Sol respecto al concentrador primario.



En la figura 2.13 se ve como en la parte superior del eje de la lente sucede exactamente lo mismo que en la parte inferior (simetría), por lo que se resuelve una de las mitades, considerándose análogo lo acontecido en la otra mitad.

A continuación se muestra, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos para  $\delta = 23^\circ$ . El mismo procedimiento se ha realizado para el resto de ángulos, de los cuales sólo se muestran los resultados globales.

	Grados	Radianes
$\delta$	23	0,40142
$\alpha$	0,27	0,00471
$\omega$	54,82	0,95688
$\gamma$	35,17	0,61391

Tabla 2.5. Ángulos para  $\delta = 23^\circ$ .

f'	x	f'-x	r	t1	s	t2	t3	t4	t5	T6	Z. ilu. <sup>3</sup>	Despl. <sup>4</sup>	Uniform. <sup>5</sup>	C <sub>x</sub>
0,3	0,005	0,295	0,00461	0,12358	0,00289	0,00502	0,00164	0,00164	0,00215	0,00285	0,01330	0,12069	0,99785	45,10
	0,01	0,29	0,00922	0,12149	0,00578	0,01004	0,00161	0,00162	0,00430	0,00570	0,02327	0,11570	0,99697	25,78
	0,015	0,285	0,01384	0,11939	0,00868	0,01506	0,00158	0,00159	0,00645	0,00855	0,03323	0,11072	0,99662	18,05
	0,02	0,28	0,01845	0,11730	0,01157	0,02008	0,00155	0,00156	0,00860	0,01140	0,04320	0,10573	0,99643	13,88
	0,025	0,275	0,02306	0,11520	0,01446	0,02510	0,00153	0,00153	0,01075	0,01425	0,05316	0,10074	0,99631	11,28
	0,03	0,27	0,02767	0,11311	0,01735	0,03013	0,00150	0,00150	0,01290	0,01710	0,06313	0,09576	0,99623	9,50
	0,035	0,265	0,03228	0,11101	0,02025	0,03515	0,00147	0,00148	0,01505	0,01995	0,07309	0,09077	0,99617	8,20
	0,04	0,26	0,03689	0,10892	0,02314	0,04017	0,00144	0,00145	0,01720	0,02280	0,08306	0,08578	0,99612	7,22
	0,045	0,255	0,04151	0,10683	0,02603	0,04519	0,00142	0,00142	0,01935	0,02565	0,09302	0,08079	0,99609	6,45

Tabla 2.6. Parámetros de cálculo para  $\delta = 23^\circ$ .

### 2.2.1.3. RESULTADOS

En primer lugar se muestran los resultados obtenidos teniendo como restricciones la zona iluminada ( $> 0,05m$ ) y la concentración ( $>9,5X$ ), y con una focal de  $0,3m$  (condición hallada en el apartado 2.2.1.1).

<sup>3</sup> Zona iluminada del receptor:  $t2+t3+t4+t5+t6$

<sup>4</sup> Desplazamiento del secundario, se calcula como  $t1-t2$ .

<sup>5</sup> Uniformidad de la zona iluminada, mide tomando como referencia el rayo que pasa por el centro de la lente, si se ilumina igual por encima que por debajo de éste  $(t4+t5+t6)/(t2+t3)$ .

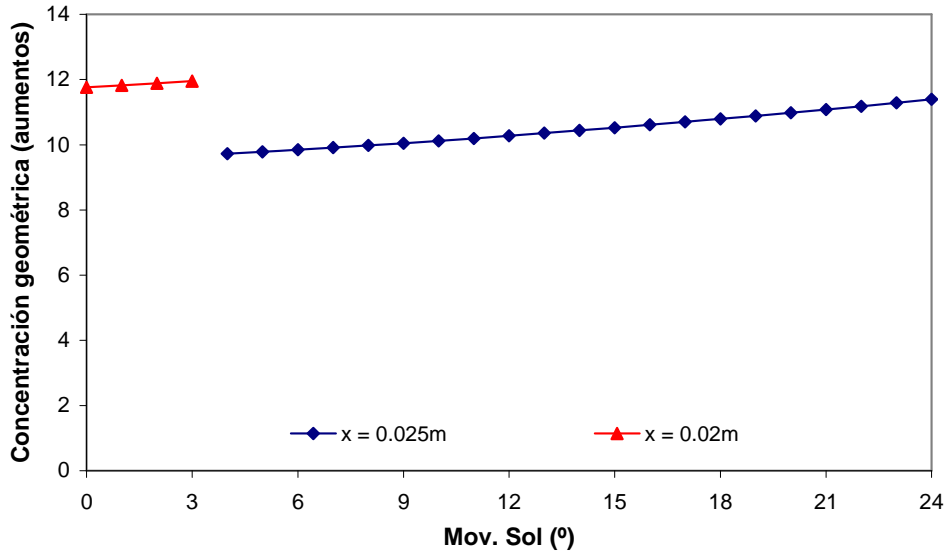


Figura 2.14.  $C_x$  vs movimiento del Sol, con varias separaciones del receptor del foco de la imagen ( $x$ ).

Grados	$x$ (m)	Z. il.(m)	$C_x$	desp <sup>6</sup> .(m)	Grados	$x$ (m)	Z. il.(m)	$C_x$	desp(m)
0	0,02	0,05099	11,77	0	13	0,025	0,05794	10,36	0,04303
1	0,02	0,05074	11,83	0,00204	14	0,025	0,05748	10,44	0,04857
2	0,02	0,05048	11,89	0,00210	15	0,025	0,05702	10,52	0,05415
3	0,02	0,05020	11,95	0,00100	16	0,025	0,05655	10,61	0,05977
4	0,025	0,06169	9,73	0,00109	17	0,025	0,05607	10,70	0,06545
5	0,025	0,06131	9,79	0,00399	18	0,025	0,05559	10,79	0,07118
6	0,025	0,06093	9,85	0,00519	19	0,025	0,05511	10,89	0,07696
7	0,025	0,06053	9,91	0,01052	20	0,025	0,05463	10,98	0,08280
8	0,025	0,06012	9,98	0,01586	21	0,025	0,05414	11,08	0,08871
9	0,025	0,05970	10,05	0,02124	22	0,025	0,05365	11,18	0,09469
10	0,025	0,05928	10,12	0,02664	23	0,025	0,05316	11,29	0,10074
11	0,025	0,05884	10,20	0,03207	24	0,025	0,05267	11,39	0,10687
12	0,025	0,05839	10,28	0,03753					

Tabla 2.7. Resumen resultados para varias separaciones del foco de la imagen.

<sup>6</sup> desp.: desplazamiento en la vertical del receptor.

Como se puede ver en la tabla suponemos que el secundario se puede desplazar del foco de la imagen en intervalos de 5mm (precisión alcanzable con el sistema de movimiento mecánico estándar, sin tener que utilizar sistemas de alta precisión).

De todas las diferentes separaciones del receptor respecto al foco de la imagen (x) estudiadas, son dos las que cumplen los requisitos mencionados con anterioridad.

Declinación solar (°)	Separación (m)
[0-3]	0,02
[4-24]	0,025

Tabla 2.8. Intervalo en grados para cada separación.

Una vez analizado el comportamiento del secundario para varias posiciones en la horizontal (separación respecto al foco, x), se va a tratar el desplazamiento necesario en la vertical (considerando como punto de partida el eje de la lente).

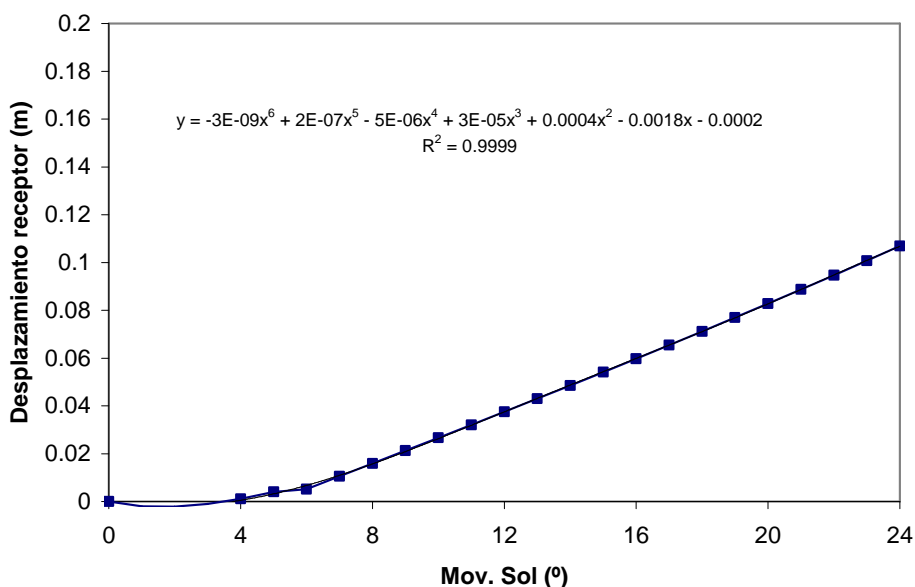


Figura 2.15. Desplazamiento vertical del receptor.

El desplazamiento del secundario, de forma que siempre estén iluminados los 5cm de apertura a 10X, se aprecia en el gráfico que tiene una longitud máxima de 11cm.

Por lo que la distancia total en la vertical que debe cubrir el receptor para captar los rayos concentrados es de 22cm.

Para simplificar el diseño, tanto en la construcción como en el futuro funcionamiento, se ha analizado si el sistema sería efectivo (cumpliría los objetivos) haciendo que el secundario se posicione a una distancia del foco de la imagen fija. Desplazándose únicamente en la perpendicular al eje óptico.

Se han estudiado 2 situaciones o 2 posiciones del receptor fuera de eje:

- ✓ 0,02m.
- ✓ 0,025m.

### **0,02m del foco de la imagen**

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Grados	x(m)	Z. il.(m)	C <sub>x</sub>	desp.(m)	Grados	x(m)	Z. il.(m)	C <sub>x</sub>	desp.(m)
0	0,02	0,05099	11,77	0	13	0,02	0,04695	12,78	0,04798
1	0,02	0,05074	11,83	0,00024	14	0,02	0,04659	12,88	0,05351
2	0,02	0,05048	11,89	0,00053	15	0,02	0,04622	12,98	0,05909
3	0,02	0,05020	11,95	0,00161	16	0,02	0,04585	13,09	0,06472
4	0,02	0,04992	12,02	0,00358	17	0,02	0,04548	13,19	0,07039
5	0,02	0,04962	12,09	0,00782	18	0,02	0,04510	13,30	0,07612
6	0,02	0,04931	12,17	0,01294	19	0,02	0,04472	13,42	0,08191
7	0,02	0,04900	12,25	0,01549	20	0,02	0,04434	13,53	0,08776
8	0,02	0,04868	12,33	0,02084	21	0,02	0,04396	13,65	0,09368
9	0,02	0,04834	12,41	0,02620	22	0,02	0,04358	13,77	0,09967
10	0,02	0,04800	12,50	0,03160	23	0,02	0,04320	13,89	0,10573
11	0,02	0,04766	12,59	0,03702	24	0,02	0,04282	14,01	0,11187
12	0,02	0,04731	12,68	0,04248					

Tabla 2.9. Resumen resultados para separación del foco de la imagen de 0,02m.

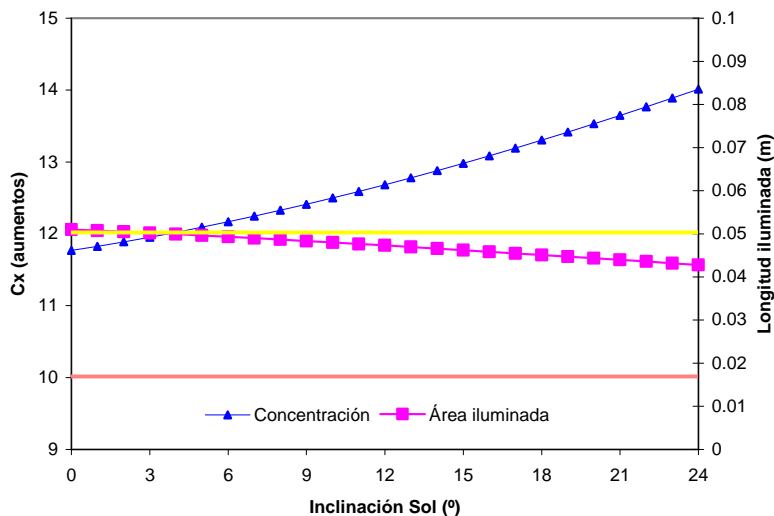


Figura 2.16. Concentración y zona iluminada, x = 0,02m.

Para este caso la concentración es siempre superior a 10X, llegando a una concentración máxima de por encima de 14X a los 24 ° de  $\delta$ . Ahora bien, sólo hay cuatro grados en los que la zona que se ilumina del receptor es  $\geq 0,05m$ , para el resto no se cumple la restricción de la zona a iluminar.

También se muestran los gráficos en los que aparecen como va variando la concentración para las diferentes posiciones del secundario y cual es desplazamiento que éste tiene que hacer para cada situación del Sol ( $\delta$ ).

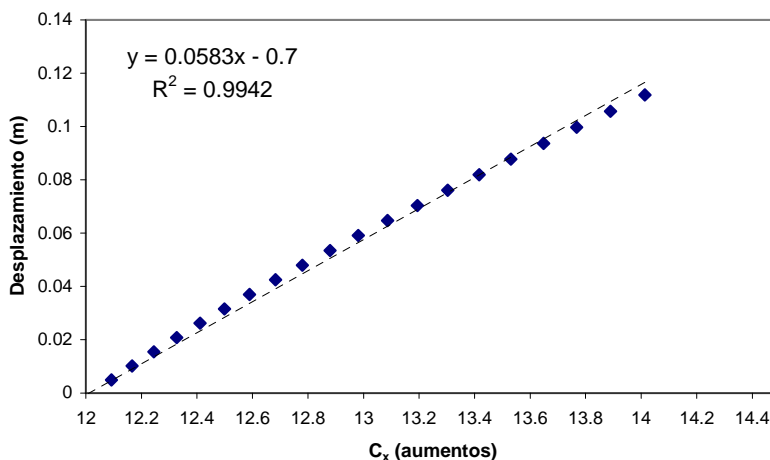


Figura 2.17. Concentración vs desplazamiento, x = 0,02m.

### Desplazamiento receptor para $x=0.02$

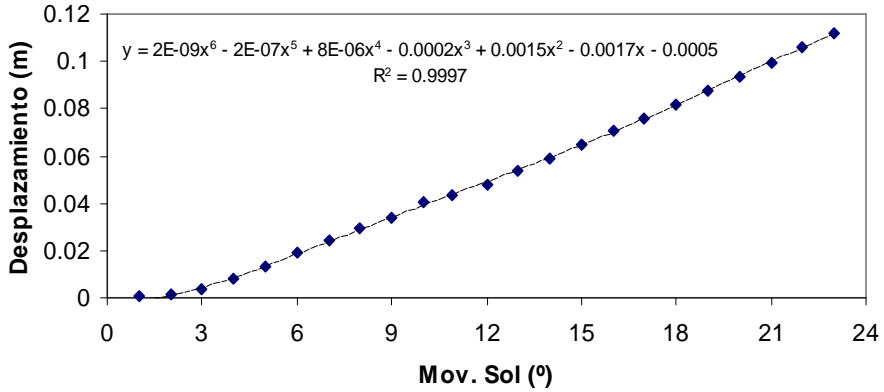


Figura 2.18. Desplazamiento vs declinación,  $x = 0,02m$ .

Sucede aquí lo mismo que para la situación con desplazamiento horizontal del CPC, que con 40cm se cubre prácticamente todo el moviendo solar que interesa, y que a partir de que el Sol se encuentra a más de  $50^\circ$  del eje óptico los desplazamientos del secundario aumentan considerablemente.

### 0,025m del foco de la imagen

Grados	x(m)	Z. il.(m)	$C_x$	desp.(m)	Grados	x(m)	Z. il.(m)	$C_x$	desp.(m)
0	0,025	0,06303	9,52	-0,02641	13	0,025	0,05794	10,36	0,04303
1	0,025	0,06272	9,57	-0,02118	14	0,025	0,05748	10,44	0,04857
2	0,025	0,06239	9,62	-0,01593	15	0,025	0,05702	10,52	0,05415
3	0,025	0,06205	9,67	-0,01067	16	0,025	0,05655	10,61	0,05977
4	0,025	0,06169	9,73	-0,00540	17	0,025	0,05607	10,70	0,06545
5	0,025	0,06131	9,79	-0,00011	18	0,025	0,05559	10,79	0,07118
6	0,025	0,06093	9,85	0,00519	19	0,025	0,05511	10,89	0,07696
7	0,025	0,06053	9,91	0,01052	20	0,025	0,05463	10,98	0,08280
8	0,025	0,06012	9,98	0,01586	21	0,025	0,05414	11,08	0,08871
9	0,025	0,05970	10,05	0,02124	22	0,025	0,05365	11,18	0,09469
10	0,025	0,05928	10,12	0,02664	23	0,025	0,05316	11,29	0,10074
11	0,025	0,05884	10,20	0,03207	24	0,025	0,05267	11,39	0,10687
12	0,025	0,05839	10,28	0,03753					

Tabla 2.10. Resumen resultados para separación del foco de la imagen de 0,025m.

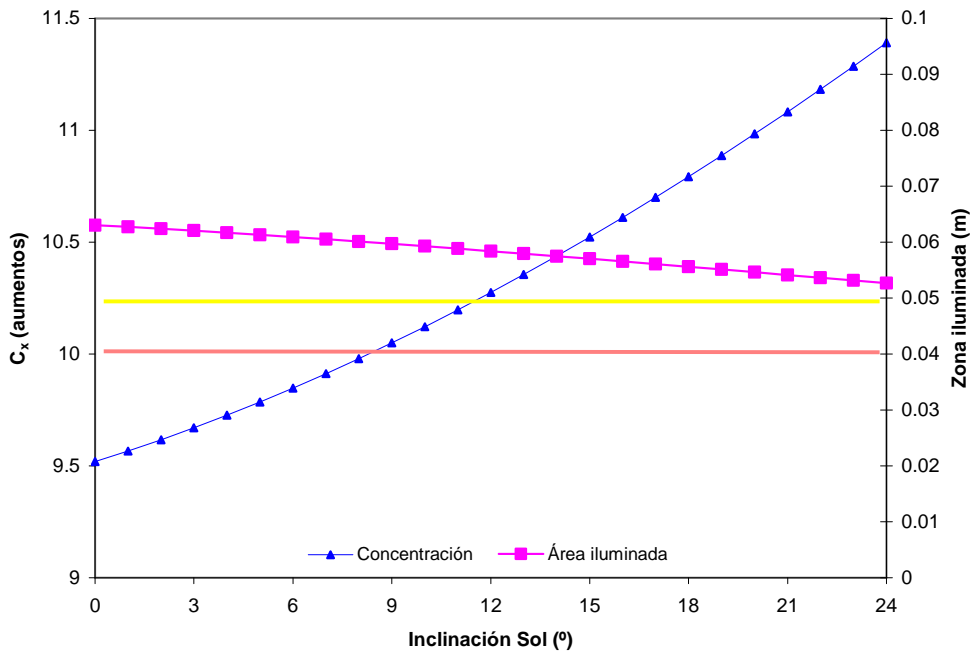
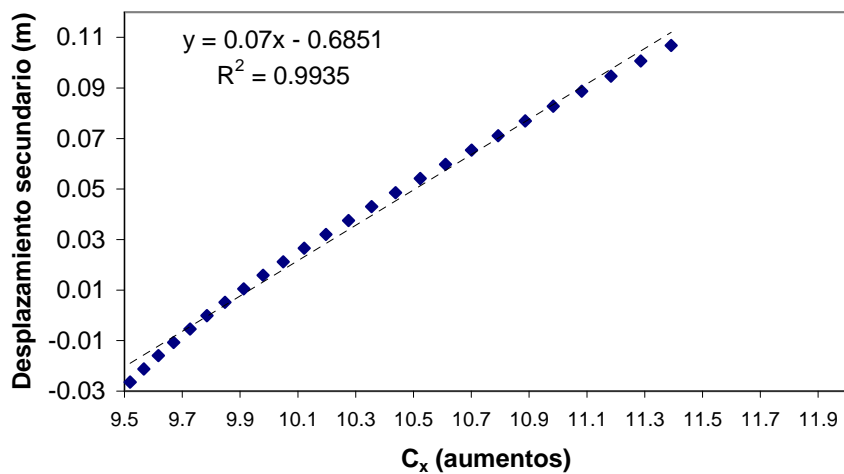
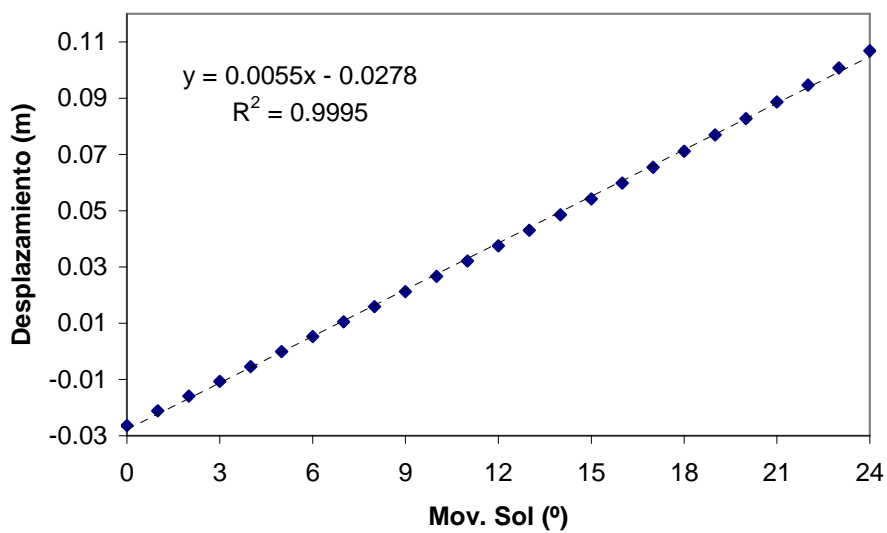


Figura 2.19. Concentración y zona iluminada,  $x = 0,025m$ .

Posicionando el secundario a 2,5cm del foco de la imagen se aprecia que para la mayoría de la trayectoria del Sol la concentración que se consigue es mayor a 10X. Además, siempre está iluminada la totalidad del receptor para todo el recorrido solar estacional. Para la situación que se ha analizado ésta es la configuración que responde con mayor satisfacción a todos los requisitos.

La concentración geométrica máxima que se alcanza es de 11,39X.

Figura 2.20. Concentración vs desplazamiento,  $x = 0,025\text{m}$ .Figura 2.21. Desplazamiento vs declinación,  $x = 0,025\text{m}$ .



## 2.2.2. SIMULACIÓN DEL SISTEMA POR TRAZADO DE RAYOS

Tras el análisis por óptica paraxial del concentrador primario, referenciado a un receptor con apertura de 5cm, a continuación se realizan los estudios de diferentes lentes por simulación en Opticad para poder determinar la que mejor se ajuste a los requerimientos.

Los condicionantes para valorar las respuestas de las lentes candidatas son:

- ✓ Concentraciones ópticas medias simuladas<sup>7</sup>( $C_s$ ) mayores a 5X (concentración geométrica de 10X).
- ✓ Distancia focal lo más reducida posible (compacidad, máximo dos veces el ancho de la lente).
- ✓ Aceptancia angular de  $\pm 23,5^\circ$  minimizando la dispersión del haz concentrado.
- ✓ Pérdidas de concentración en función del movimiento estacional solar  $< 40\%$ .

A continuación los análisis que se realizan son para una posición solar diaria fija, a las 12h (Sol centrado con la lente). Una vez discernidos los sistemas que funcionen mejor se analizará en éstos el movimiento solar diario.

La simulación se realiza utilizando la fuente que OptiCad tiene definida para emular el Sol (Sun.dll), introduciendo como parámetro que describe el valor de la mitad del ángulo máximo con el que se distribuirán los rayos) 5 mrad (“half – angle”). Esto significa que toda la radiación que proviene del disco solar se asume que será de igual intensidad, que no se producirá radiación de fuera del disco solar. (Opticad, 2007).

### 2.2.2.1. Lente cilíndrica convexa

En primer lugar se estudia una lente cilíndrica para diferentes incidencias solares, en los equinoccios y solsticios, e índices de refracción. Observando las diferentes concentraciones y focales resultantes.

---

<sup>7</sup> La concentración óptica media simulada es la que se obtiene mediante el cociente de la irradiancia que recibe la superficie del concentrador y la irradiancia que se capta en la superficie del receptor. En esta definición se tienen en cuenta las pérdidas ópticas, de forma que este valor será siempre inferior al de la concentración geométrica.

Para poder comparar los diferentes elementos que se analizarán se define para todos ellos la distancia focal para lentes delgadas, que como se mencionó anteriormente se calcula a partir de la expresión:

$$\frac{1}{f'} = (n-1) \left[ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right] \quad (2.7)$$

donde  $R_1$  y  $R_2$  son los radios de curvatura,  $n$  el índice de refracción del material de la lente y  $f'$  la distancia focal.

Esta es una expresión que resulta muy útil en el análisis, ya que es unívoca y permite comparar diferentes casos analizados.

#### **2.2.2.1.1. Lente de vidrio**

Se toman unas dimensiones concretas para el diseño de las lentes, teniéndose en cuenta que, conservando las proporciones geométricas, los resultados son extrapolables a cualquier otra dimensión.

Las características de la lente son:

Anchura de la lente: 200mm.

Radio curvatura: 200mm.

Focal ( $f'$ ): 400mm.

Índice refracción: 1,5.

Previamente se han estudiado mediante simulación lentes con diferentes radios de curvatura manteniendo constantes la anchura de 200mm y el material (vidrio), escogiéndose como la más adecuada la de radio 200mm. El radio de curvatura tiene una dependencia lineal con la focal.

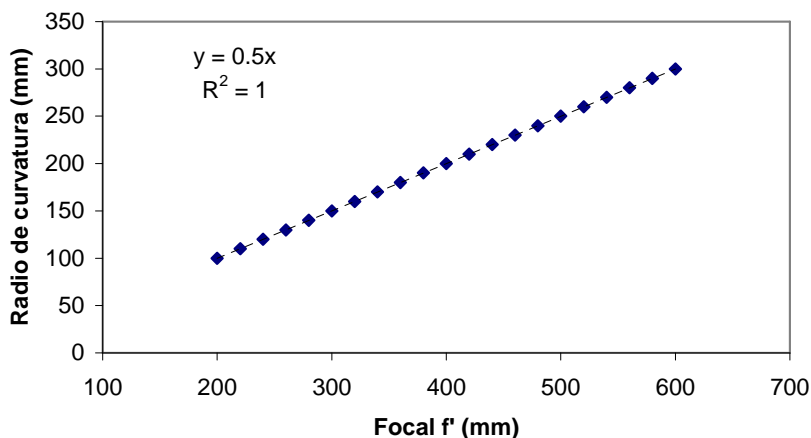


Figura 2.22. Radio de curvatura vs focal en lente cilíndrica plano convexa de vidrio.

Para la misma anchura de lente, aquellas con radios menores a 150mm sufren reflexiones y dispersiones importantes que reducen su rendimiento. Por ejemplo en el caso de radio 130mm se aprecia claramente en la siguiente figura que parte de los rayos son reflejados al incidir en la superficie de la lente. Por otro lado también se observa que el haz concentrado se dispersa mucho antes de que la lente llegue a su punto máximo de concentración geométrica.

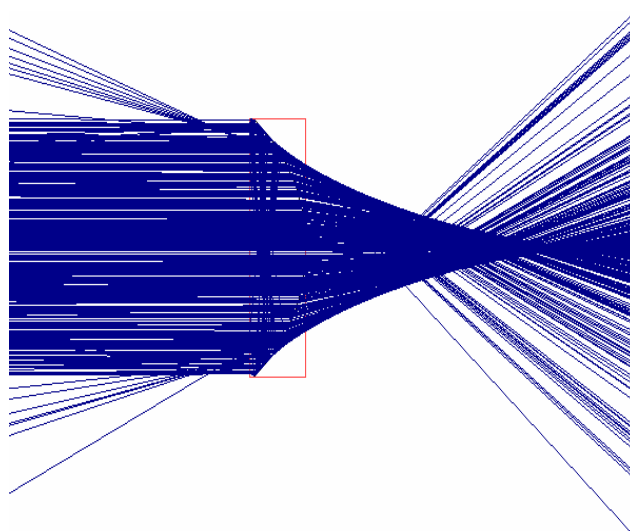


Figura 2.23. Trazado de rayos en lente plano convexa con radio de curvatura de 130mm.

Para radios superiores a 200mm la distancia focal se hace demasiado larga, la condición que se ha impuesto como de partida es que la focal sea aproximadamente dos veces la anchura de la lente (como máximo). En el grupo de lentes cuyas curvaturas se encuentran en el intervalo (150-200) se aprecia que a medida que el tamaño aumenta el haz de rayos se dispersa en menor cantidad y aumenta la concentración.

Además la concentración sufre un decremento (más suavizado que cuando el radio de curvatura es menor a 200mm) para curvaturas por encima de 200mm de radio (ver fig. 2.24).

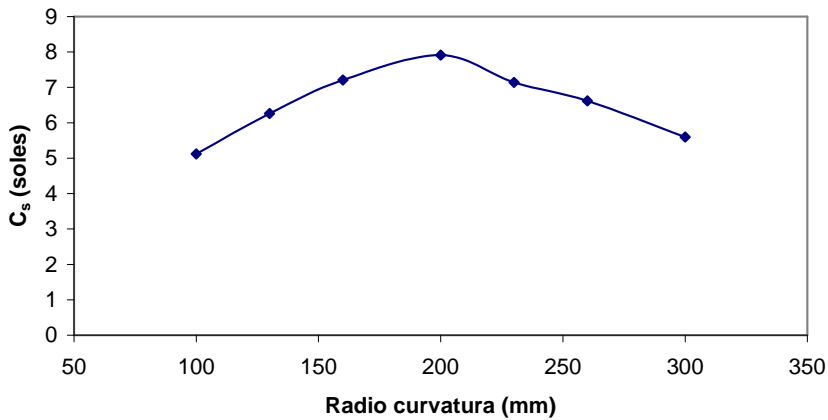


Figura 2.24. Concentración simulada vs radio de curvatura.

Teniendo en cuenta estas indicaciones la lente seleccionada es la de 200 mm de radio de curvatura para una anchura de 200mm fijada anteriormente.

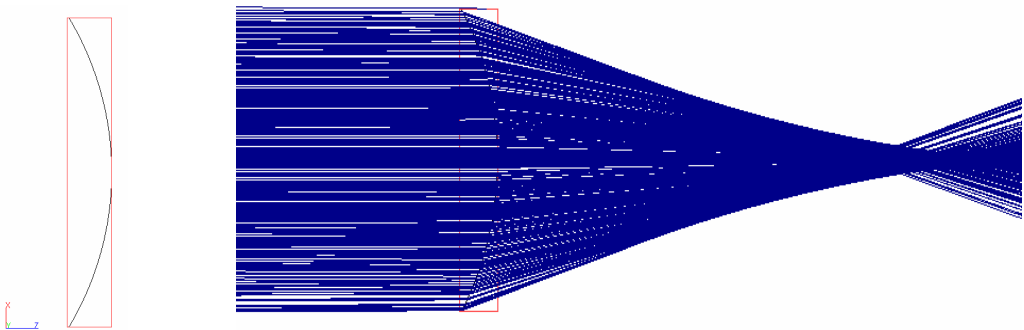


Figura 2.25. Trazado de rayos en lente planoconvexa con radio de curvatura de 200mm.

En este caso la distancia focal es de 400 mm (cumpliéndose la relación de focal = 2anchura lente, ver fig. 2.25).

Para comparar eficiencias de la lente, se define una superficie tal que la concentración geométrica sea de 10X (20mm). De esta forma se pueden apreciar las diferencias en concentración óptica simulada para las diferentes variables.

En el caso en que la lente está en eje con el Sol la concentración óptica media simulada es de 7,91 soles. (receptor emplazado a 29,1 cm<sup>8</sup> del vértice de la superficie de la lente más cercana al foco de la imagen).

A partir de aquí cuando se mencione distancia del receptor a la lente o distancia de la lente, se hará referencia a la distancia que existe desde el receptor al vértice de la superficie de la lente más cercana al foco de la imagen

Irradiancia en el concentrador: 865,7 W/m<sup>2</sup>.

Irradiancia en el receptor: 6849,69 W/m<sup>2</sup>.

$$C_s = \frac{6849.49}{865.7} = 7.91 \text{ soles}$$

El siguiente paso es ver como funciona la lente fuera de eje, al ángulo máximo definido por la variación estacional de la eclíptica: 23,5 °.

---

<sup>8</sup> En el análisis que se lleva a cabo adquiere una mayor relevancia el concepto de la distancia a la que se sitúa el receptor: distancia en la cual el área definida de receptor para una concentración geométrica de 10X capta la totalidad (situación en eje) o la mayor parte posible (inclinaciones solares cercanas a los solsticios) de los rayos del haz concentrado (registra valores de concentración simulada máximos).

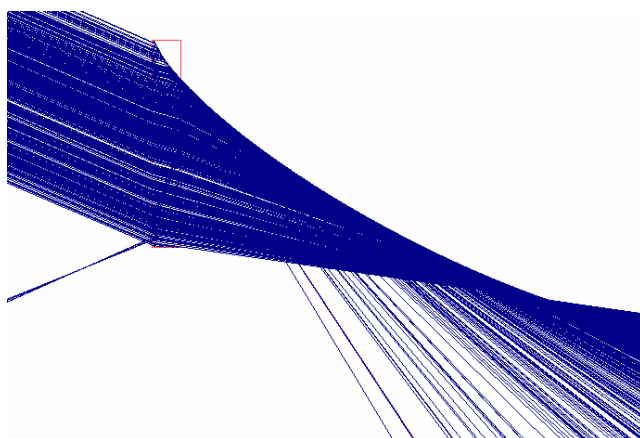


Figura 2.26. Trazado de rayos en lente planoconvexa con radio de curvatura 200 mm y para una declinación solar de  $23,5^\circ$ .

Situando el receptor a 28 cm de la lente y 13,18 cm por debajo de su eje, no variando la inclinación inicial del mismo, la concentración óptica obtenida es de 6,87 soles.

Si ahora se posiciona el receptor con un ángulo de  $23,5^\circ$ , de forma que sea solidario a la declinación solar, la nueva concentración obtenida es de 6,82 soles. Se aprecia que la concentración no varía significativamente al variar la inclinación del receptor. (a  $45^\circ$  la concentración es de 6,74X).

La pérdida<sup>9</sup> máxima relativa de concentración para la situación problema fuera de eje es del 13,15 % (31,3% de pérdidas absolutas).

#### 2.2.2.1.2. Lente de Zafiro

En las mismas condiciones se reemplaza el vidrio, índice de refracción de 1,5 por zafiro  $-\text{Al}_2\text{O}_3-$  u óxido de magnesio  $-\text{MgO}-(1,76)$ , apreciándose a primera vista que la distancia focal se acorta considerablemente.

<sup>9</sup> Pérdida relativa, considerando como eficiencia máxima el valor de concentración que se alcanza con el sistema centrado con el Sol.

Pérdidas absolutas, referenciadas al valor máximo de concentración alcanzable por la lente (10X).

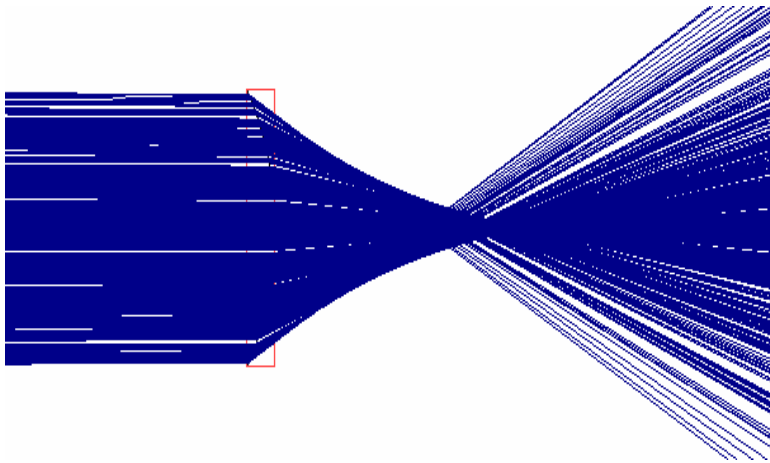


Figura 2.27. Trazado rayos lente de Zafiro.

En este caso el receptor para que esté iluminado totalmente se coloca a una distancia de 18,6 cm de la lente (siendo la distancia focal  $f'$  de 26,32cm).

La concentración con el sistema en eje es de 7,89X, prácticamente igual que la del vidrio del caso anterior (pérdidas ópticas similares). Pero en este caso la distancia del receptor se reduce en 10,5 cm.

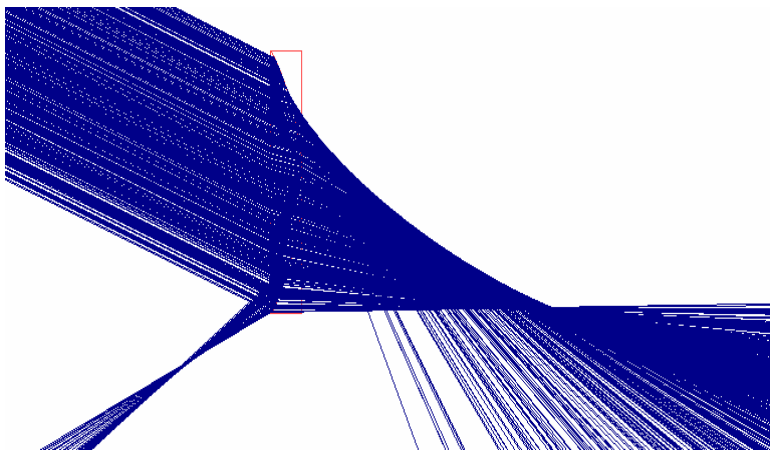


Figura 2.28. Trazado de rayos lente de zafiro para declinación 23,5°.

Para la situación en la que el sistema está fuera de eje en  $23,5^\circ$  la concentración disminuye más que con el vidrio, tomando un valor de 6,12X. El receptor ahora tiene las siguientes referencias:

- ✓ Altura (tomando como referencia el centro de la lente): - 8,68 cm.
- ✓ Distancia de la lente: 17,7 cm.

### 2.2.2.1.3. Lente de Zirconio

El material de la lente es el Zirconio  $-ZrO_2-$ , con un índice de refracción de 2,16.

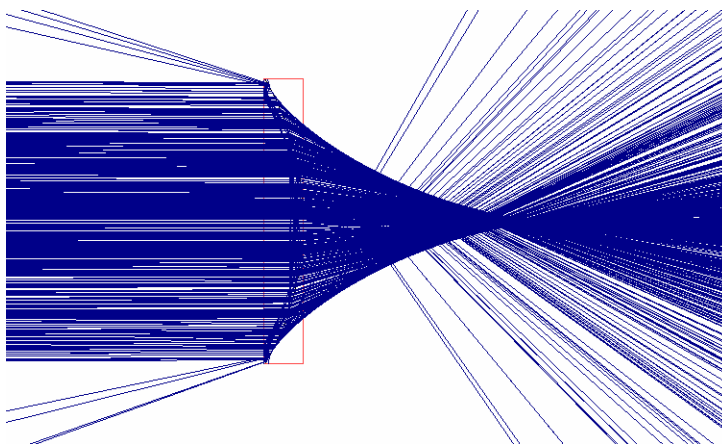


Figura 2.29. Trazado de rayo lente de zirconio.

La concentración óptica con el receptor a 11,5 cm es de 6,76X. En este caso se ve que por el efecto del ángulo de incidencia solar, y por el cambio de índice de refracción entre la lente y el aire las pérdidas ópticas aumentan considerablemente (pérdidas por reflexión, de Fresnel y por absorción).  $f^*$  es ahora de 17,24cm.

Con respecto al caso 2.2.2.1.1 ahora la distancia del receptor se reduce en 17,6 cm.

A continuación se realiza un paréntesis para explicar los diferentes tipos de pérdidas ópticas:

*-Pérdidas de Fresnel:* Se producen en la refracción de la luz al encontrarse un cambio brusco del índice de refracción, ya que parte de la potencia se refleja. Su



valor depende del cociente entre los índices de refracción de los dos medios y del ángulo de incidencia del rayo, siendo las pérdidas mayores cuanto mayor es el ángulo. Para el caso del aire ( $n = 1$ ) y los materiales dieléctricos habituales ( $n = 1,5$ ), las pérdidas de Fresnel a incidencia normal son del 4% y se mantienen por debajo del 5% hasta ángulos de incidencia inferiores a  $50^\circ$ . Para incidencias superiores a  $70^\circ$  las pérdidas exceden el 50%, llegando al 100% a  $90^\circ$ . Existen recubrimientos muy finos llamados capas antireflexivas (ARC) que pueden prácticamente eliminar estas pérdidas para incidencias no muy rasantes. Estas capas, que son caras, se emplean en las células de paneles planos comerciales para disminuir las pérdidas de Fresnel que sufriría el rayo al incidir sobre la célula ( $n \approx 3,7$ ), que podrían ser hasta del 20% a incidencia normal. En los sistemas de concentración sólo suelen emplearse en la célula, y a veces en el secundario (si lo hay), que gracias a la concentración son superficies de área pequeña y por tanto supone un coste menor que en el módulo plano.

*-Pérdidas por reflexión:* Se producen al reflejarse la luz en los espejos, por estar éstos fabricados con metales que no son reflectores perfectos. Son dependientes no sólo del metal que forma el espejo sino también de su técnica de fabricación. La dependencia con el ángulo de incidencia del rayo no suele ser fuerte. Las pérdidas para el aluminio están entre el 12% y el 18%, mientras que con plata la reflexión mejora notablemente (puede lograrse hasta un 97% de eficiencia de reflexión). También existen recubrimientos interferenciales para mejorar la reflectividad de los metales, aunque su precio los descarta de su aplicación a energía solar. En este apartado también se introducen pérdidas debido a deformaciones de la curva de referencia del dióptrico utilizado (error de inclinación), como a la aparición de ondulaciones en superficie que para sistemas grandes pueden ser del orden de cm, y errores por rugosidad microscópica de la superficie del orden de  $\mu\text{m}$ .

*-Pérdidas por absorción:* Se producen al avanzar el rayo a través de un medio que no es perfectamente transparente (como el vidrio o el plástico). La elección del material es importante para evitarlas y, puesto que dependen exponencialmente de la longitud del rayo dentro del material, deberá reducirse al máximo su recorrido en el diseño del concentrador.

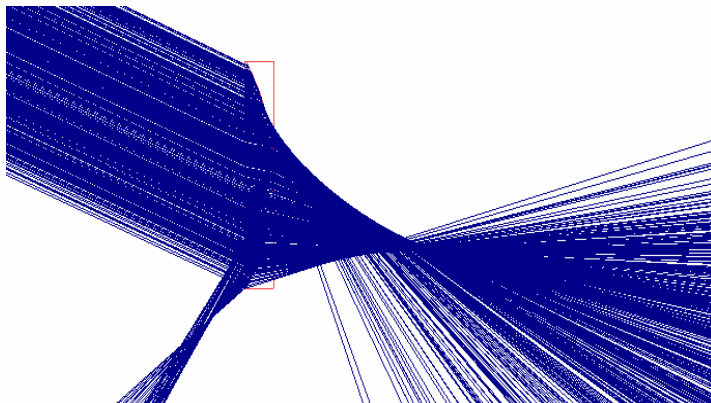


Figura 2.30. Trazado de rayos lente de zirconio para declinación 23,5°.

Cuando el sistema está fuera de eje en 23,5 °, en este caso, la concentración no varía demasiado, tomando un valor de 6,36X. El receptor ahora tiene las siguientes referencias:

- ✓ Altura (tomando como referencia el centro de la lente): - 5,77 cm.
- ✓ Distancia de la lente: 11,1 cm.

Resumiendo los valores obtenidos para la situación en eje se observa que a medida que el material de la lente tiene un índice de refracción mayor se puede posicionar el receptor a una menor distancia. Dotando de compacidad al sistema. Aunque, por el contrario, a medida que se aumenta el índice de refracción la concentración simulada de la lente disminuye.

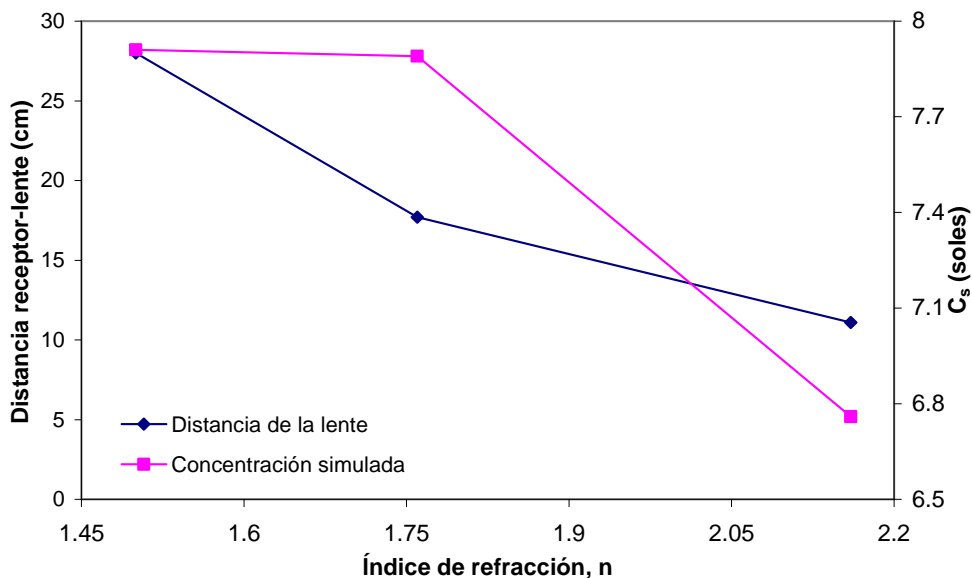


Figura 2.31. Características lente plano convexa en función del material de constitución.

Generalizando el gráfico anterior a lentes cuyos materiales tengan índices de refracción comprendidos entre 1,1 y 4, se obtiene la siguiente tendencia exponencial negativa:

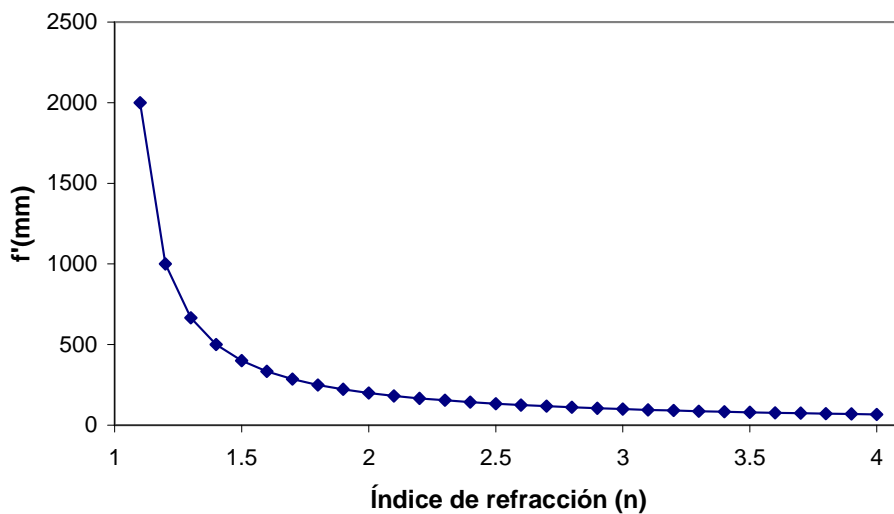


Figura 2.32. Distancia focal lente plano convexa en función del material de constitución.

Sin embargo, por contrapartida al haber una mayor diferencia entre los índices de refracción del medio (aire) y del concentrador, las pérdidas ópticas de Fresnel aumentan considerablemente. Además el sistema también incrementa globalmente las pérdidas ópticas (por reflexión y absorción).

Los materiales que son útiles como lentes con índices refractivos elevados tienen un coste muy elevado, como es el caso del Zirconio. Por esto, para concentraciones bajas y medias no tiene sentido su uso, siendo los materiales más frecuentes el vidrio y los acrílicos.

De los diferentes parámetros tratados, para terminar este subapartado, se ilustra (ver figura 2.33) que el hecho de que, para una lente con anchura constante, se varíe su radio de curvatura o su índice de refracción tienen efectos similares en la concentración que produce.

Recordando que la focal  $f'$  es igual a dos veces el radio de curvatura y que en el caso de la relación con el índice de refracción, para valores de  $n < 1,5$   $f'$  toma una tendencia de crecimiento que sigue prácticamente una asíntota vertical (ver figura 2.32).

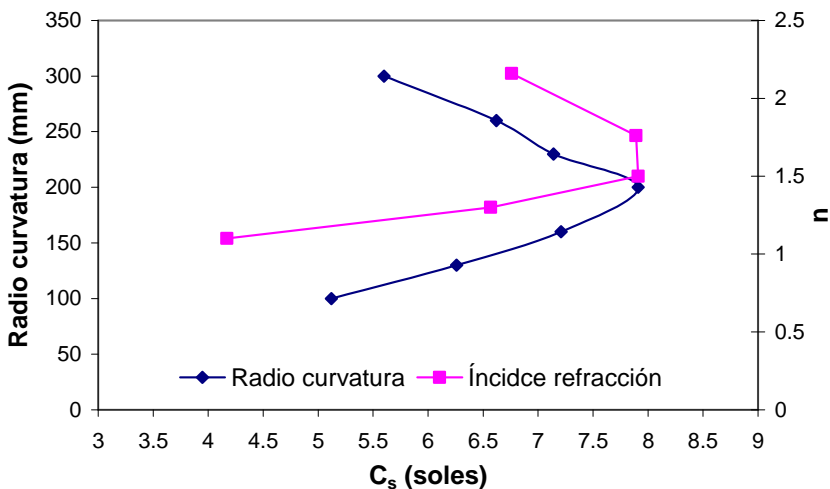


Figura 2.33. Variabilidad de parámetros lente planoconvexa.

A continuación se realizarán los desarrollos con materiales con un índice de refracción de 1,5, como son el vidrio y el polimetilo de metacrilato (materiales más usuales en tecnologías de concentración).

### 2.2.2.2. Lente cilíndrica biconvexa

La segunda lente de estudio está compuesta por dos superficies convexas análogas a la lente número 1:

Anchura de las lentes: 200mm

Radio de curvatura:  $2 \times 200\text{mm}$

Índice de refracción: 1,5

Anchura del receptor: 20mm (concentración geométrica 10X)

Grosor de la lente (separación entre las dos lentes): 0mm.

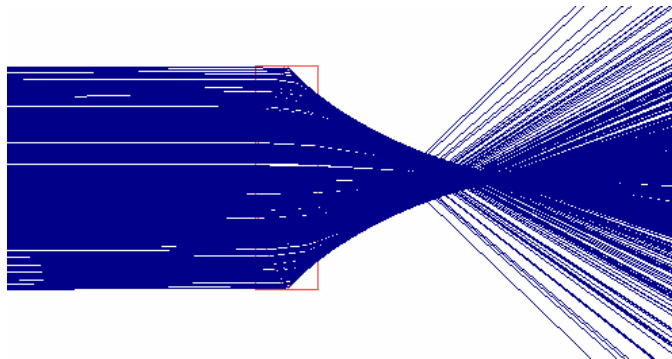


Figura 2.34. Trazado de rayos lente cilíndrica biconvexa.

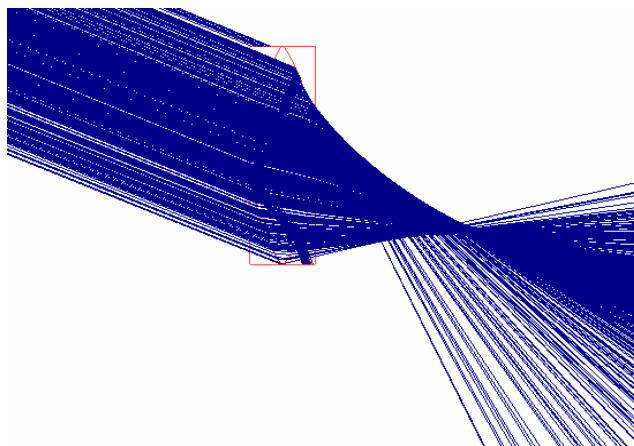


Figura 2.35. Trazado de rayos lente cilíndrica biconvexa para declinación  $23,5^\circ$ .

En eje, la distancia focal  $f^*$  es de 20cm (mitad que para la lente convexa)<sup>10</sup>, y para que se ilumine totalmente el receptor se sitúa éste a 13,18 cm de la lente, alcanzando una concentración es de 7,62X.

En los solsticios la respuesta de la lente es de 6,72X de concentración con el receptor colocado 6,24 cm por debajo del eje de la lente y a una distancia de 10,8 cm.

A medida que se aumenta el grosor de la lente, el seguimiento mejora considerablemente y la distancia focal se acorta. Para poder apreciar cualitativa y cuantitativamente lo descrito se ejemplifica el caso en que el grosor de la lente biconvexa es de 145mm:

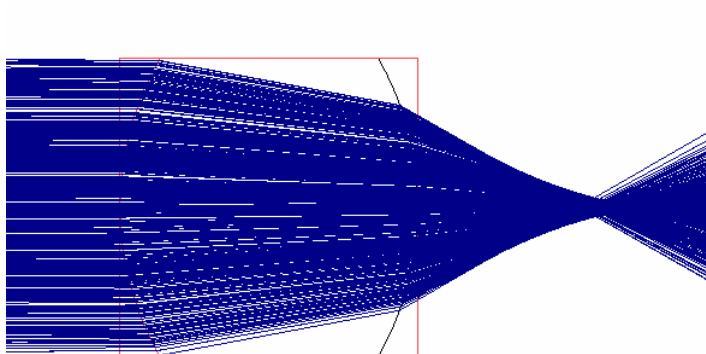


Figura 2.36. Trazado de rayos lente cilíndrica biconvexa con grosor 145mm.

A partir de aquí se caracterizarán las diferentes lentes por la distancia a la que se posiciona el receptor para que éste quede totalmente iluminado, ya que la distancia focal para el estudio que se está realizando carece de trascendencia.

En este caso el receptor se emplaza a 10,6 cm de la lente (se reduce en 6,7 cm respecto al anterior). La concentración simulada es de 7,87X (fig. 2.36).

<sup>10</sup> En este caso, y según la definición de  $f^*$ , se da la situación de que la focal es igual al radio de curvatura de las superficies que forman la lente.

En los solsticios la posición del receptor es 7,44 cm por debajo del eje de la lente y a una separación de 8,53 cm (respecto al vértice de la superficie de la lente más cercana al foco de la imagen), alcanzándose una concentración de 6,94 soles.

Las variables de emplazamiento del secundario con respecto a la lente y concentración varían respecto al grosor de la lente de la siguiente forma.

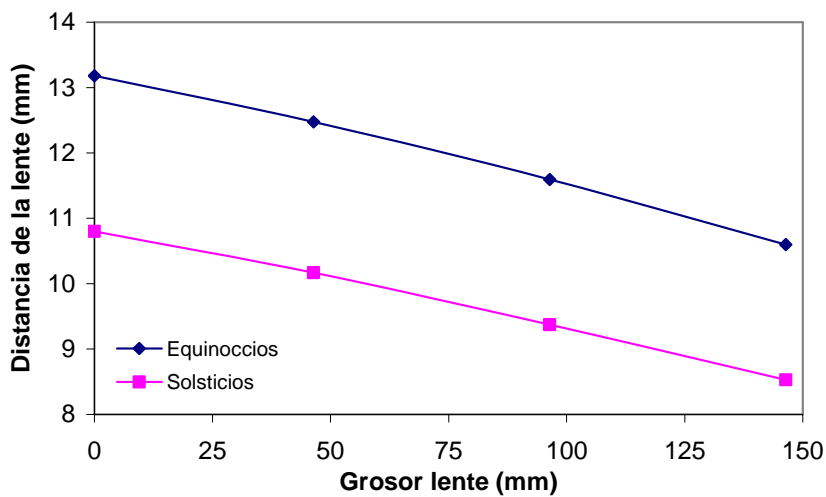


Figura 2.37. Distancia del receptor a la lente vs grosor lente.

Se observa que se produce una mejora en cuanto se acorta la focal al aumentar el espesor de la lente, pero se considera que este acortamiento no es significativo con respecto a la lente formada por dos superficies convexas sin separación entre ambas. Por razones mecánicas, y de viabilidad en general se opta por la lente de menor espesor (0mm).

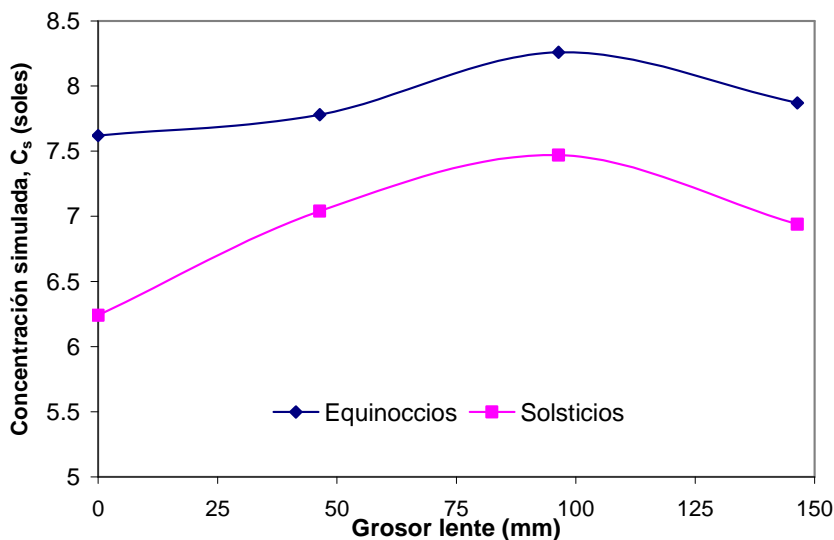


Figura 2.38. Concentración simulada vs grosor lente.

La concentración tiene una tendencia ascendente a medida que se aumenta el grosor, hasta que se alcanza un grosor crítico (96mm en el caso de la lente estudiada) a partir del cual empieza a decrecer.

### 2.2.2.3. Lente de Fresnel plana

En este apartado se analiza el funcionamiento de las lentes de Fresnel simples para la situación problema definida anteriormente<sup>11</sup>. El diseño de este tipo de lentes se realiza prisma a prisma (crecimiento de la lente), fijando la distancia focal y la altura o la anchura del prisma. A partir de aquí, teniendo en cuenta la ley de Snell y por trigonometría, se calcula el ángulo que caracteriza a cada prisma, respecto a la horizontal.

---

<sup>11</sup>Hay que tener en cuenta que las lentes de Fresnel planas producen aberraciones, sobre todo del tipo cromático. Para cada banda de color, la lente presenta un índice de refracción diferente, y por consiguiente distinta focal.



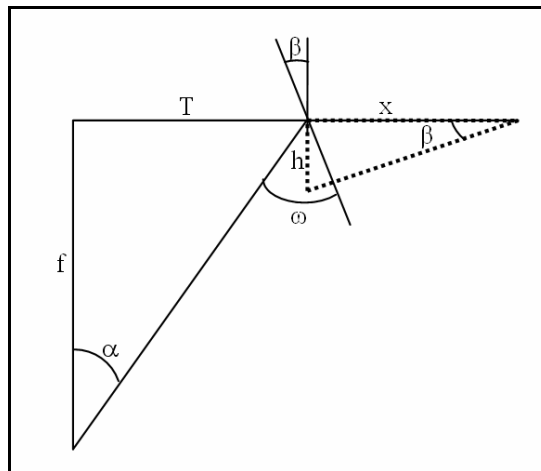


Figura 2.39. Esquema de diseño.

El ángulo que define el prisma es  $\beta$ . Las incógnitas  $x$  y  $h$  representan a la anchura y altura del prisma respectivamente.

Teniendo en cuenta los parámetros de la figura anterior se obtiene:

Aplicando la ley de Snell en el prisma ( $n = 1,5$ ) y teniendo en cuenta que el índice de refracción del aire es 1:

$$n \sin \beta = \sin \omega \tag{2.20}$$

Y a partir de aquí por trigonometría:

$$\tan \alpha = \frac{T}{f}$$

$$\omega = \alpha + \beta$$

$$n \sin \beta = \sin \omega = \sin(\alpha + \beta)$$

$$n \sin \beta = \sin \beta \cos \alpha + \cos \beta \sin \alpha$$

$$\tan \beta = \frac{\sin \alpha}{n - \cos \alpha}$$

$$\sin \alpha = \frac{T}{f} \cos \alpha$$

$$\tan \beta = \frac{T}{f} \frac{\cos \alpha}{n - \cos \alpha}$$

$$\text{como } \rightarrow \cos \alpha = \frac{f}{\sqrt{T^2 + f^2}}$$

$$\tan \beta = \frac{T}{n\sqrt{T^2 + f^2} - f}$$

$$x = \frac{h}{\tan \beta} \text{ para } h = \text{cte.} \quad (2.21)$$

$$h = x \tan \beta \text{ para } x = \text{cte.}$$

Se estudian pues: lentes diseñadas fijando la altura o fijando la anchura de los prismas.

### 2.2.2.3.1. Crecimiento con altura de prismas constante

La lente se diseña tomando una distancia focal ( $f'$ ), a partir de aquí aplicando las diferentes ecuaciones se calculan los ángulos que definen los prismas ( $\beta$ ) y sus anchuras ( $x$ ), manteniéndose su altura constante ( $h$ ). (Ver figura 2.39).

Se analizan las lentes diseñadas para varias alturas de prisma constantes. Se parte de la premisa de que la altura máxima de los prismas es de 3mm, estudiándose configuraciones con 3, 2 y 1mm de altura de prismas.

Las lentes de Fresnel simples tienen mejor comportamiento cuanto mayor sea la relación focal( $f$ )/anchura( $d$ ) ( $f \gg d$ ) (Leutz y Suzuki, 2001), teniendo en cuenta esta relación de aspecto y que un requerimiento de diseño es la compacidad se muestran los resultados obtenidos.

Altura prisma	3mm	2mm	1mm
<b>C<sub>s</sub> en eje</b>	9,69	9,50	9,19
<b>Anchura lente (mm)</b>	297	228	166
<b>Distancia del receptor a la lente(mm)</b>	245	236	215

Tabla 2.11. Características lente con prismas de altura constate.

Al igual que en los apartados anteriores la concentración geométrica de estudio es de 10 X. Se observa que la lente que tiene una mayor concentración óptica simulada (OptiCad) es la de altura de prisma de 3mm.

<b>Altura prisma</b>	<b>3mm</b>	<b>2mm</b>	<b>1mm</b>
<b>Ratio focal/anchura de la lente</b>	1,01	1,32	1,81
<b>Ratio distancia receptor/anchura lente</b>	0,82	1,03	1,29

Tabla 2.12. Características lente con prismas de altura constante.

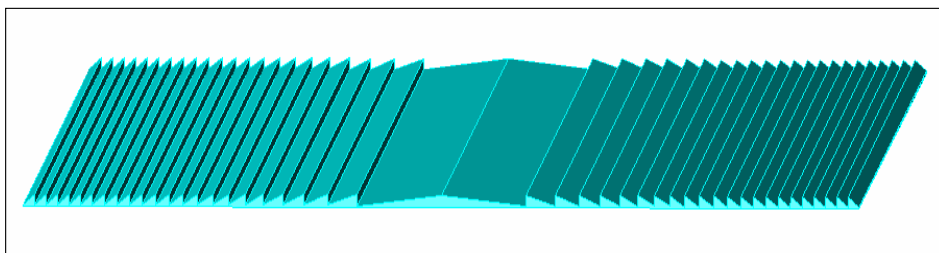
En el caso de las lentes de Fresnel se añade un criterio adicional para compararlas que es que todas están constituidas por el mismo número de prismas y todas ellas con la relación geométrica de concentración entre la lente y el receptor de 10X.

La lente que tiene la relación focal/anchura de 1 y los prismas de mayor tamaño es con la que se obtiene una concentración mayor con el sistema en eje. La problemática surge cuando el sistema se encuentra fuera de eje. En las tres lentes el rendimiento decrece drásticamente para la inclinación solar en los solsticios. Dentro de este empeoramiento el rendimiento decrece en menor cantidad cuando la relación  $f/d$  es mayor y la altura de los prismas es menor (menor reflexión interna-dispersión).

Como la lente de Fresnel no puede constituir por sí misma el sistema para satisfacer los condicionantes<sup>12</sup> (requiere de otro elemento óptico para satisfacer el seguimiento estacional) se selecciona la lente de 3mm. Esta lente es la que produce mayor concentración (diferencia de casi 2 décimas), y el receptor se sitúa sólo 1 cm más alejado de la lente que la de altura de prismas de 2mm. (prácticamente la misma compacidad).

El esquema de la lente es:

(se muestra la lente rotada 180° de su posición natural para así poder distinguir su geometría con mayor claridad)



<sup>12</sup> La concentración simulada con ángulo de incidencia de los rayos solares de 23.5 es menor a 5X y las pérdidas son superiores al 40% (requisitos iniciales).

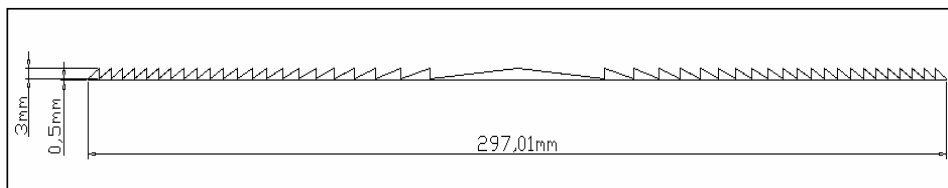


Figura 2.40. Lente de Fresnel,  $h=3\text{mm}$ .

A continuación se muestran los esquemas de trazado de rayos en la lente con  $h = 3\text{mm}$ , para cuando la radiación incide en la superficie de la lente con una inclinación respecto a su normal de  $0$  y  $23,5^\circ$ :

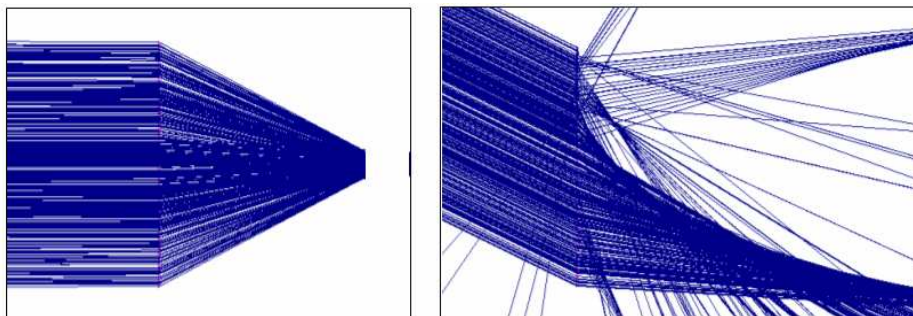


Figura 2.41. Trazado de rayos lente de Fresnel con  $h=3\text{mm}$ .

Como anteriormente se ha comentado, la concentración en eje del sistema es de  $9,69X$ . Sin embargo, globalmente:

	$C_s$	Distancia del eje(mm)	Distancia de la lente(mm)
Sistema en eje	$9,69X$	0	245
Pérdidas, % (abs./rel.)	3,1/-		
Sistema a $23,5^\circ$	$4,2X$	-155	390
Pérdidas, % (abs./rel.)	58/56,6		

Tabla 2.13. Características lente con prismas de altura constante 3mm.

Las pérdidas que se producen son mayores al 50% (58% de pérdidas absolutas, 56,6% de pérdidas relativas). Hay que tener en cuenta que el emplazamiento del receptor para la situación fuera de eje no tiene una posición bien determinada. Por esto la concentración con el sistema recibiendo la radiación solar con una inclinación de 23,5° tiene un error asociado a esta imprecisión.

Las perdidas absolutas se refieren al valor máximo de concentración de diseño (10X) y las pérdidas relativas al valor máximo de concentración óptica simulada ( $C_s$ ) obtenido.

$$\text{Pérdidas absolutas} = \frac{C_s}{C_x(\text{diseño}, 10X)} \tag{2.22}$$

$$\text{Pérdidas relativas} = \frac{C_s}{C_{s,máx}} \tag{2.23}$$

### 2.2.2.3.2. Crecimiento con anchura de prismas constante

Para diseñar este tipo de lentes de Fresnel, se fija la anchura del prisma, y lo que varía a medida que la lente crece es la altura de éstos.

Este apartado es análogo al anterior, las lentes en eje con el Sol tienen un comportamiento muy bueno, pero al encontrarse fuera de eje su funcionamiento empeora notablemente.

Se estudia ahora la importancia de la relación  $f/d$  para una lente diseñada con anchura de prismas constante de 2mm. Cabe resaltar que en esta lente la altura de todos los dientes es inferior a 1mm.

Para un ratio  $f/d$  de 1,5, los resultados del trazado de rayos son: una concentración simulada óptica en eje de 8,97X y fuera de eje (23,5°) de 5,62X.

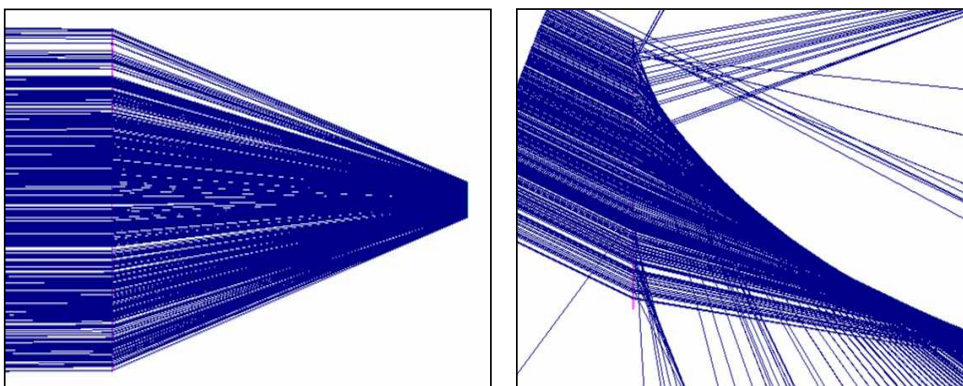


Figura 2.42. Trazado de rayos lente de Fresnel con  $x = 2\text{mm}$ .

	$C_s$	Pérdidas absolutas (%)	Pérdidas relativas (%)
Sistema en eje	8,97	10,3	-
Sistema a 23,5°	5,62	43,8	37,34

Tabla 2.14. Características lente con prismas de anchura constante 2mm.

Si se aumenta el ratio  $f/d$  hasta 2,5, las nuevas dimensiones y los resultados de la lente son:

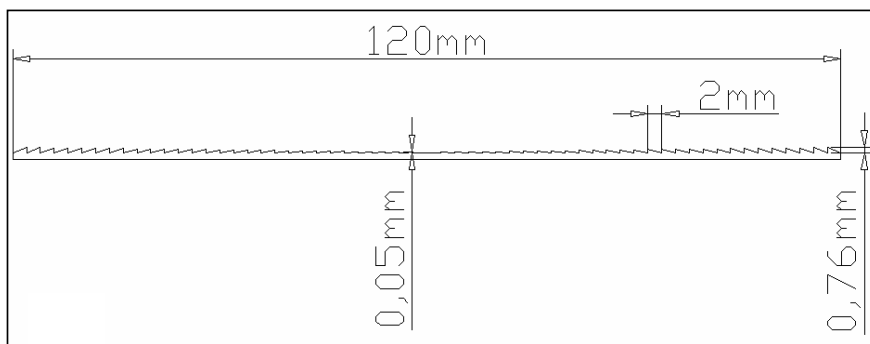


Figura 2.43. Esquema lente de Fresnel  $x = 2\text{mm}$  y  $f/d = 2,5$ .

	$C_s$	Pérdidas absolutas (%)	Pérdidas relativas (%)
Sistema en eje	9,4	6	-
Sistema a 23,5°	6,88	31,2	26,8

Tabla 2.15. Características lente con prismas de anchura constante 2mm y  $f/d = 2,5$ .

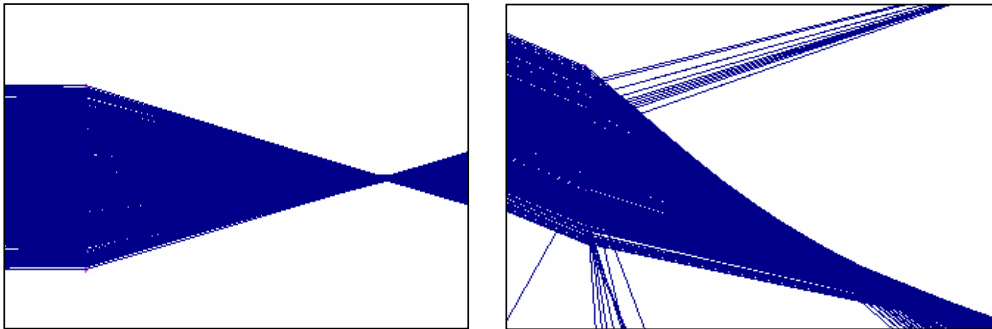


Figura 2.44. Trazado de rayos lente de Fresnel con  $x = 2\text{mm}$  y  $f/d = 2,5$ .

En las imágenes de OptiCad se aprecia que las pérdidas son mucho menores en el caso en que se aumenta la relación  $f/d$ , siendo estas del 31,2% (absolutas).

La lente cumple ahora con todos los requisitos iniciales.

Si en vez de trabajar con una concentración geométrica de 10X, se toma 5X, la tipología de lente de Fresnel responde muy bien al seguimiento estacional.

	$C_s$	Pérdidas absolutas (%)	Pérdidas relativas (%)
<b>Sistema en eje</b>	4,8	2	-
<b>Sistema a 23,5°</b>	4,66	3,4	2,9

Tabla 2.16. Características lente con prismas de anchura constante 2mm y  $f/d = 2,5$  para concentración 5X.

El único problema es que hay que situar el receptor a una distancia bastante grande. En una lente de anchura 12cm, la separación del receptor en eje es de 23,3cm (casi el doble de la anchura de la lente). Cuando el sistema se encuentra captando el Sol en los solsticios la separación es de 17,8cm, y 8,9cm por debajo del eje de la lente.

Es a 5X cuando se optimiza el funcionamiento para lentes con estas características ( $f/d = 2,5$ ), ya que se captan todos los rayos que la lente concentra (exceptuando las dispersiones que no siguen el cono del haz).

Para concentraciones bajas, y con una compacidad de dos veces la anchura de la lente (baja compacidad), este sistema responde muy satisfactoriamente al seguimiento estacional.

Analizando los resultados de las dos mejores lentes de Fresnel estudiadas, en concentración simulada para la situación óptima y la más negativa se obtiene:

	<b>Lente de 3mm de altura constante</b>	<b>Lente 2mm de anchura constante</b>
<b>C<sub>s</sub> en eje</b>	9,69	8,97
<b>C<sub>s</sub> fuera de eje</b>	4,2	5,62
<b>C<sub>s</sub> media</b>	6,9	7,3
<b>Ángulo de homogeneidad haz máx.<sup>13</sup></b>	4°	11°

Tabla 2.17. Resumen resultados lentes de Fresnel simples.

La lente de Fresnel simple que mejor responde para, siendo estacional, captar la radiación solar es la de 2mm de anchura constante de los prismas, atendiendo a la concentración media y al ángulo de homogeneidad del haz máximo.

#### 2.2.2.4. Combinación de lentes

Como se ha visto en el apartado 3.2 la lente que responde mejor en términos de concentración y tolerancia es la lente de Fresnel con crecimiento de los prismas de anchura constante de 2mm.

<sup>13</sup> Se define el ángulo máximo de homogeneidad del haz, como el número de grados en inclinación solar en los que la lente concentra los rayos sobre la superficie del receptor en un valor medio simulado por encima de 8X.



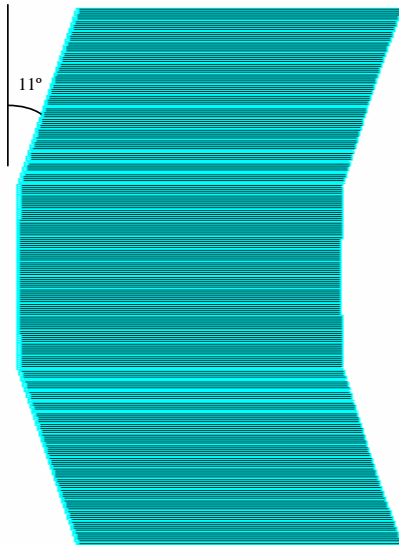


Figura 2.45. Combinación lentes de Fresnel.

Teniendo en cuenta que el ángulo de homogeneidad del haz máximo de esta lente es de  $11^\circ$  y que en los solsticios la inclinación solar es de  $\pm 23,5^\circ$ , una posibilidad de diseño interesante es unir tres lentes. La lente central en eje con el Sol en el equinoccio y las otras dos con un ángulo de  $11^\circ$  respecto al plano de la lente central (fig. 2.45).

El funcionamiento del sistema cuando el Sol se encuentra en eje con la lente central ( $0^\circ$ ) es el siguiente (Fig x):

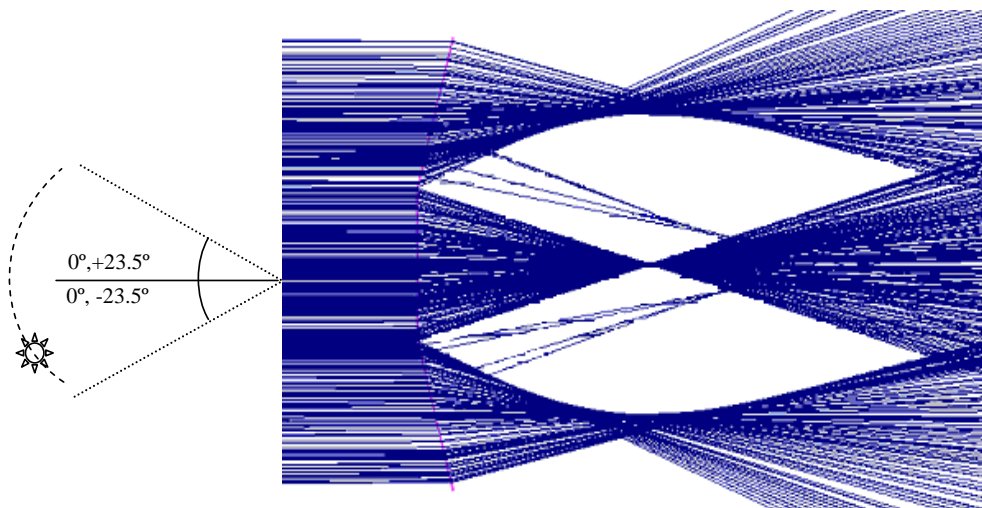


Figura 2.46. Trazado de rayos combinación lentes de Fresnel.

Como se aprecia en la figura anterior el sistema concentra en tres haces. Esta lente funcionando estática todo el año tendrá unos rendimientos menores para los solsticios, ya que las lentes inclinadas recibirán la radiación muy oblicua (máximo de

34,5°). El rendimiento óptimo se producirá cuando el Sol se encuentre en los equinoccios. Este comportamiento se puede apreciar en el gráfico que se muestra a continuación:

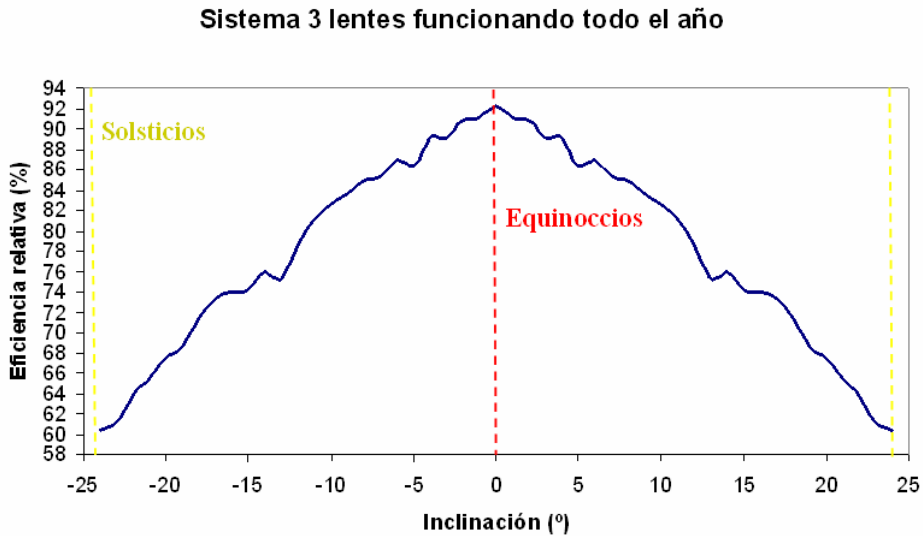


Figura 2.47. Eficiencia relativa lente de Fresnel compuesta con 3 receptores.

Para la elaboración de este gráfico se ha simulado el sistema por trazado de rayos, obteniendo la concentración para cada inclinación. Se toma como referencia el ángulo de inclinación del Sol con respecto a la lente del centro. La eficiencia se obtiene considerando como 100% al valor máximo de concentración que consigue la lente.

Al igual que en todos los casos estudiados, se fija que la concentración geométrica de cada lente del conjunto sea de 10X.

Las eficiencias relativas máximas y mínimas son de 92,25 % y 60,25%, siendo la eficiencia media anual del 77,8 %.

$$\text{Eficiencia relativa} = \frac{C_{S_i}}{C_{S_{\text{máxima}}}} \quad (2.24)$$

En el sistema anterior se producen tres haces, el aprovechamiento de la energía de los haces de las lentes laterales se ve altamente mermado en el solsticio opuesto a la inclinación de la lente.

Una alternativa para mejorar el rendimiento del sistema es captar la energía que producen dos haces dependiendo del periodo anual. Es decir, cuando el Sol irradia con unas inclinaciones de entre 0° y 23,5° el rendimiento óptimo del concentrador sería utilizando los haces que producen las lentes superior y central. Por antítesis para inclinaciones solares comprendidas entre 0° y -23,5° se colectarían los rayos de las lentes central e inferior.

Los sistemas de colección de rayos del sistema concentrador primario se analizarán más adelante en el capítulo.

Las efectividades de esta alternativa de funcionamiento aumentan considerablemente, lográndose un mayor periodo de tiempo en el que el sistema funciona a máximo rendimiento. Los rendimientos relativos máximo, mínimo y medio son ahora: 95,9%, 67,25% y 86,04%. Las mejoras con respecto al sistema en el que se aprovechan los tres haces de radiación concentrada durante todo el año son patentes: mejoran los rendimientos máximo y mínimo, por lo que en consecuencia se incrementa la eficiencia relativa media en un 8%. Otra mejora muy importante es que se mantiene altamente constante el rendimiento en prácticamente 6 meses, y además en sus valores mayores.

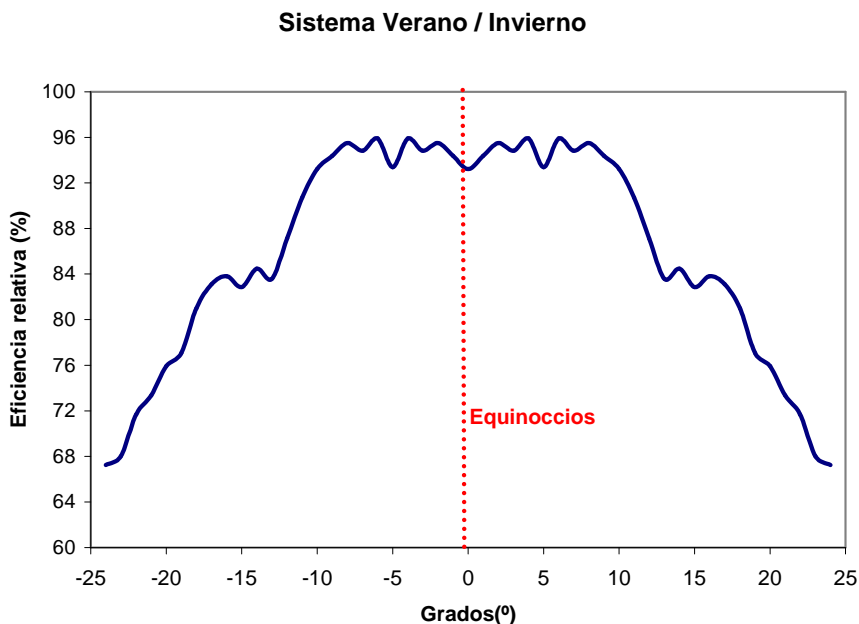


Figura 2.48. Eficiencia relativa lente de Fresnel compuesta con 2 receptores.

Todos los prismas de la lente dirigen la radiación hacia un punto común o foco, pero no todos los prismas lo hacen con la misma eficiencia. Se define la eficiencia del prisma como la cantidad de radiación incidente que traspasa la lente. Hay un determinado porcentaje de radiación incidente que se pierde por los efectos del sombreado en los prismas. A continuación se analizan estos efectos sobre el sistema tri-lente.

La eficiencia o rendimiento medio por prisma en la refracción, para las declinaciones solares anuales, varía de distinto modo en la lente central que en las laterales.

En el caso de la lente central el sombreado no varía para las dos configuraciones estudiadas de esta tipología de lente. En los dos casos los rayos que recibe la lente inciden según las declinaciones solares.

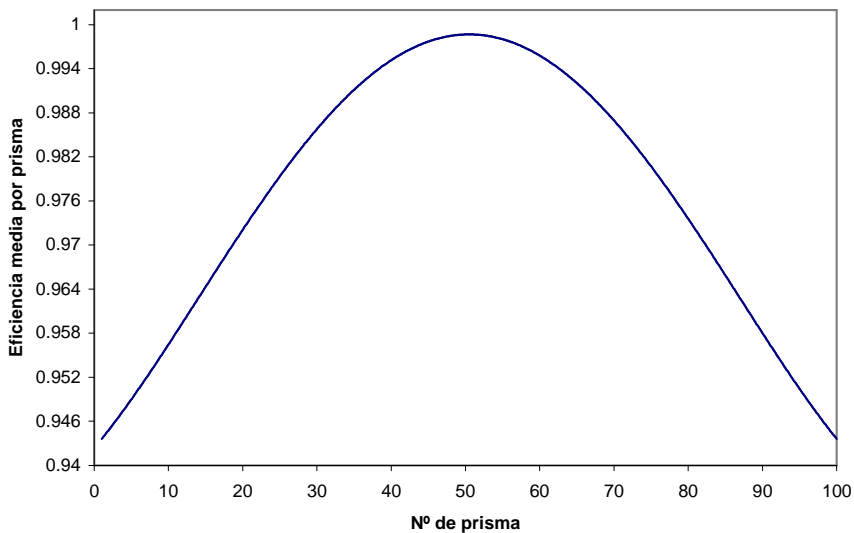


Figura 2.49. Eficiencia en la transmisión de luz de la lente central.

Generalizando para una lente de Fresnel simple, a medida que el crecimiento de prismas se realiza para una anchura de lente mayor (para  $x$  o  $h$  constantes) la eficiencia ponderada varía. Esto se debe a que el ángulo que define el prisma, a medida que el

crecimiento se produce a una distancia mayor del eje, aumenta. Por lo tanto, la relación que se tiene entre altura y anchura del prisma crece proporcionalmente al incremento angular de éste ( $\beta$ , ver figura 2.39).

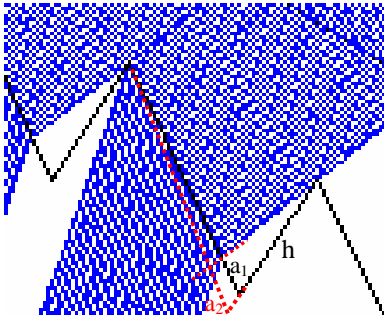


Figura 2.50. Detalles sombreado en prismas.

Cuando la altura ( $h$ ) del prisma es mayor, en proporción, el sombreado que se produce es más grande. Este efecto se debe a que si  $h$  aumenta la zona de sombreado se incrementa de  $a_1 \rightarrow a_2$ , tal y como se observa en la figura de la izquierda.

Se completa esta apreciación en el siguiente gráfico, donde se estudia el efecto de cómo la lente varía su eficiencia media de transmisión en función de la desviación del prisma más extremal con respecto a la focal de diseño en eje. El

crecimiento de la lente es simétrico, por lo que la desviación graficada tiene el mismo valor a ambos lados del eje de la lente.

Para no discretizar el análisis a un número determinado de prismas se define un nuevo parámetro que se denomina desviación. La desviación se considera como el ángulo que se forma desde el extremo (inicio) de un prisma con la focal respecto al eje de la lente. La desviación máxima será pues la que formará el inicio del prisma más alejado del eje de la lente (ver figura 2.39, parámetro  $\alpha$ )

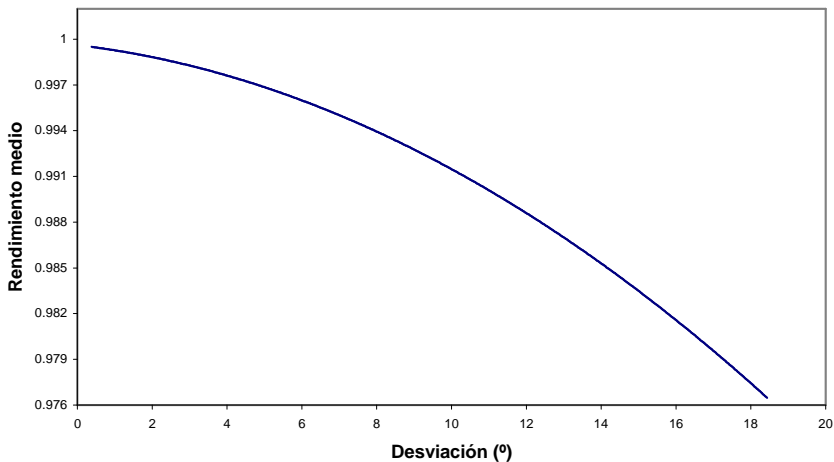


Figura 2.51. Eficiencia en la transmisión de luz de la lente central en función de la desviación.

Con las lentes que constituyen los laterales del sistema, el comportamiento en cuanto al sombreado será diferente para la configuración con dos y con tres receptores. Viéndose anteriormente que el comportamiento de la lente con dos receptores es más eficiente, se presenta el análisis del sombreado para esta estructura de lente.

En el sistema con dos receptores los dos laterales funcionan de igual modo, ya que son lentes iguales que reciben la radiación con el mismo ángulo de incidencia (aunque en diferentes periodos anuales).

Se obtiene que para estas lentes el comportamiento al sombreado es el siguiente:

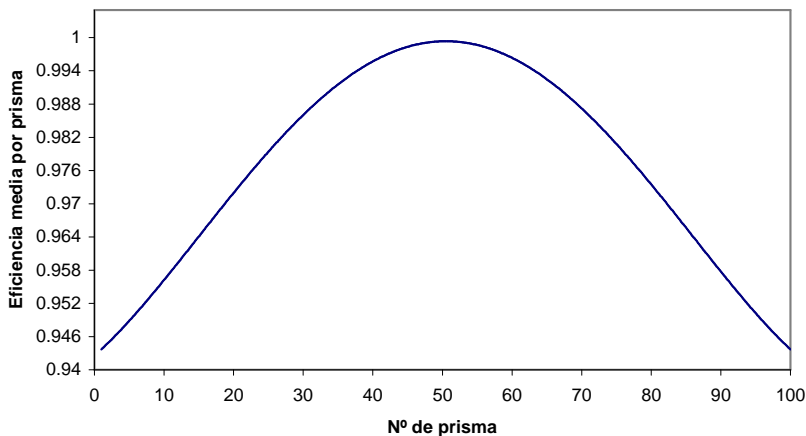


Figura 2.52. Eficiencia en la transmisión de luz en las lentes laterales.

Comparando este gráfico con el obtenido para la lente central se observa que son prácticamente idénticos. Este funcionamiento es el que se pretendía al emplazar los laterales inclinados  $11^\circ$  con respecto al plano central, que el receptor superior funcionase para declinaciones positivas (por encima de la latitud) y que el inferior para declinaciones negativas.

Su eficiencia en función de la desviación (referenciada a su eje) es, para las dos lentes inclinadas:

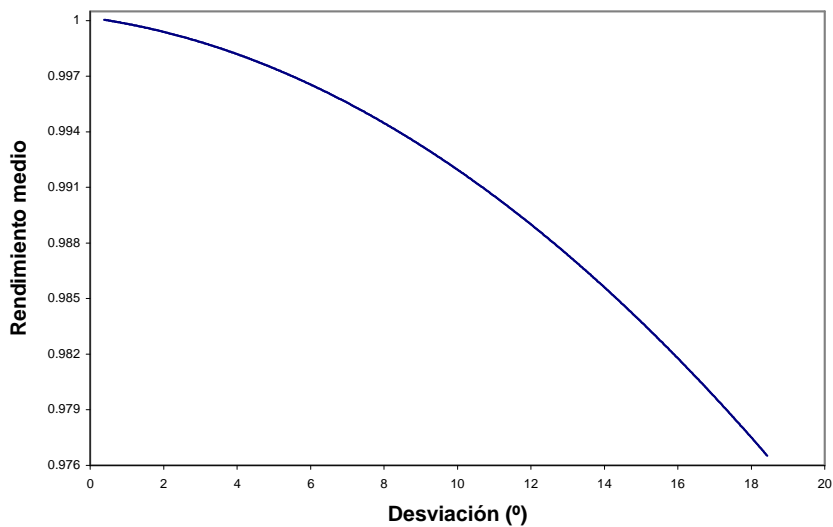


Figura 2.53. Eficiencia en la transmisión de luz de las lentes laterales en función de la desviación.

La eficiencia media por prisma de una lente equivalente a la lente central en conjunto con la superior o la inferior sigue la tendencia siguiente:

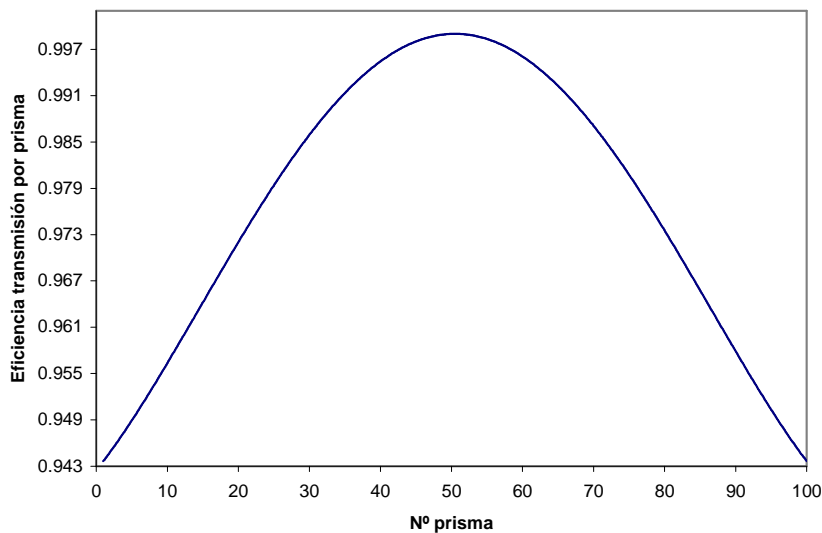


Figura 2.54. Eficiencia en la transmisión de luz en una lente equivalente.

En el caso del tratamiento global de la lente no tiene sentido generalizar los resultados en función de la desviación, ya que cada lente que constituye el sistema concentra los rayos a una focal diferente. Este aspecto se puede tratar si lo hacemos considerándola como una lente equivalente:

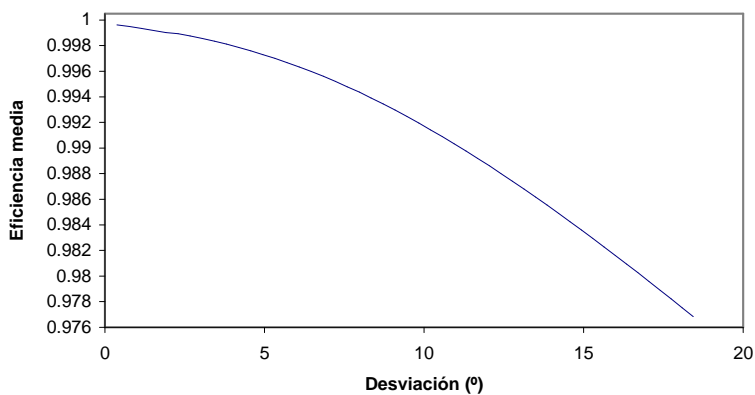


Figura 2.55. Eficiencia en la transmisión de luz para una lente equivalente en función de la desviación.



### 2.2.2.5. Lente de Fresnel con curvatura

Teniendo en cuenta las facilidades que supone la utilización de lentes de Fresnel, en cuanto a ahorro en material de constitución de la lente, como en facilidad de manejo atendiendo a su disminución en peso. Y conociendo el buen funcionamiento de las lentes cilíndricas para aceptar la variación en inclinación solar sin que el haz concentrado sufra perturbaciones. El siguiente diseño que se estudia es una lente de Fresnel curvada con prismas de anchura constante.

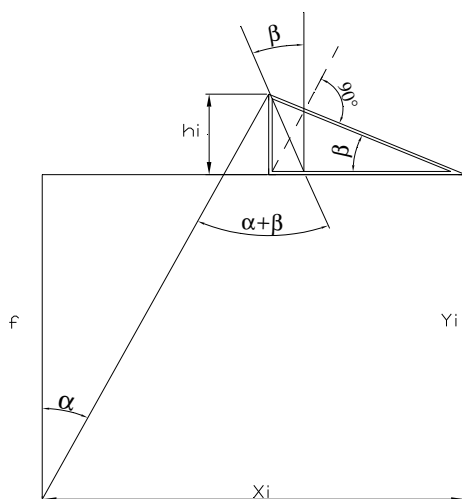


Figura 2.56. Esquema de diseño lente de Fresnel arqueada.

El método de diseño de la lente consiste en la aproximación a una lente cilíndrica con un sistema de prismas que constituyen la lente de Fresnel con curvatura.

En primer lugar se define el par radio de curvatura-distancia focal utilizándose la definición de focal en lentes delgadas:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{Rc} \right) \tag{2.25}$$

Para el diseño del crecimiento de los prismas se sigue la ecuación de la circunferencia de radio igual a  $R_c$  (radio de curvatura).

$$Y_i = \sqrt{R_c^2 - X_i^2} \quad (2.26)$$

Donde  $X_i = iT$ , siendo  $T$  la anchura del prisma.  $T$  se considera constante en el diseño de la lente. De forma que la variación de la geometría de los prismas a lo largo de la curva, para que estos enfoquen al punto focal se consigue variándose  $h_i$ .

Teniendo en cuenta la condición de refracción, y calculando el ángulo que define cada prisma ( $\beta$ ), se obtiene:

$$\begin{aligned} X_i &= iT \\ \tan \alpha_i &= \frac{X_i}{Y_i} \\ n \operatorname{sen} \beta_i &= \operatorname{sen}(\alpha_i + \beta_i) \\ \tan \beta_i &= \frac{\sin \alpha_i}{n - \cos \alpha_i} \\ h_i &= T \tan \beta_i \end{aligned} \quad (2.27)$$

$i$ : número de prisma,  $(1, \dots, n)$ . El radio de la lente será igual a  $\sum_{i=1}^n X_i$ .

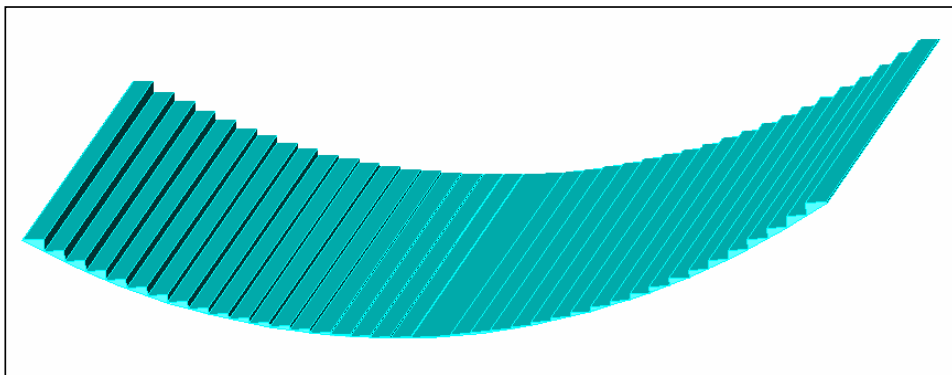


Figura 2.57. Representación lente de Fresnel arqueada.

Con esta configuración la lente se beneficia de las ventajas tanto de las lentes de Fresnel como de las cilíndricas.

Las características de la lente son las que se representan en el siguiente esquema, teniendo en cuenta que la anchura de los prismas es constante (10 mm) y el radio de curvatura de 335 mm:

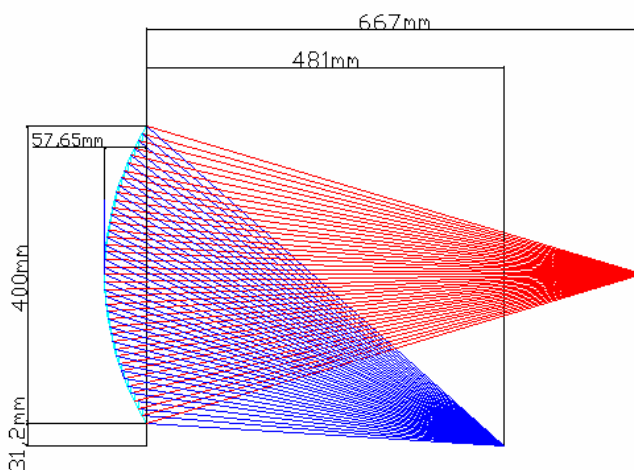


Figura 2.58. Trazado de rayos lente de Fresnel arqueada.

La distancia focal se obtiene del OptiCad y se corrobora calculándola como la distancia focal en lente delgada,  $f'$ . Siendo en ambos casos de 667 y 670 mm respectivamente.

Los rayos representados en color rojo son cuando el sistema concentra en eje, y los azules son cuando la inclinación solar es de  $23,5^\circ$  respecto al eje de la lente.

La lente tiene una anchura de 400 mm, por lo que si los prismas tienen una anchura de 10 mm el número de prismas que forman la lente es de 40.

Tal y como se ha visto en apartados anteriores relaciones  $f/d$  menores a la unidad conllevan aspectos negativos al rendimiento de la lente. En este caso la relación  $f/d$  es de 1,675.

Al igual que con la lente anterior, se analiza de un modo análogo, los efectos del sombreo en los prismas sobre la radiación que la lente transmite. La eficiencia del prisma se refiere a la cantidad de radiación incidente que traspasa la lente. Hay un determinado porcentaje de radiación incidente que se pierde por los efectos del sombreo en los prismas.

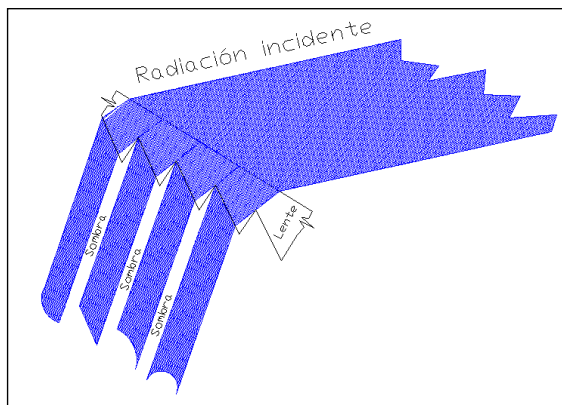


Figura 2.59. Esquema de sombreo.

Se ha considerado como límite que la transmitancia sea como mínimo del 50%, es decir, que como mínimo se transmita la mitad de la radiación incidente media para todas las declinaciones solares anuales.

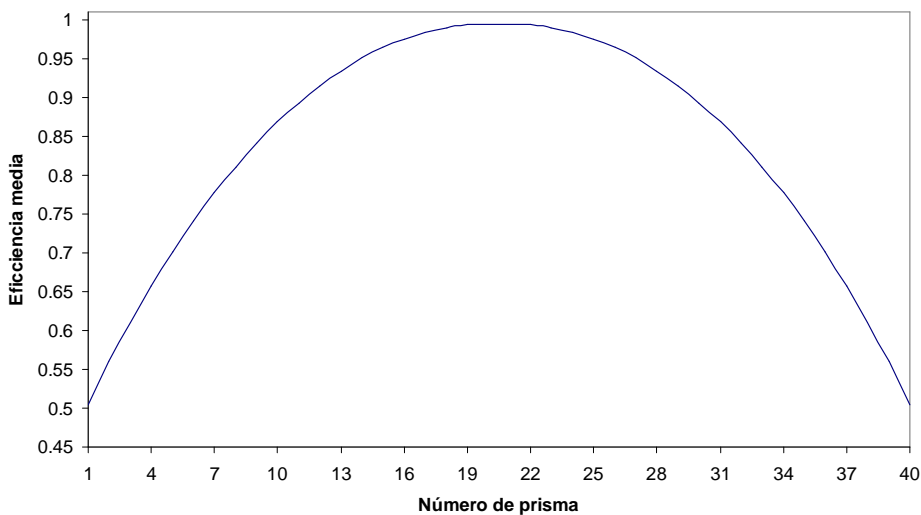


Figura 2.60. Eficiencia en la transmisión de luz lente de Fresnel arqueada.

Cada prisma (con simetría axial) tiene una altura o espesor diferente, la relación de arco tangente entre este espesor y la anchura del prisma<sup>14</sup> (10mm, constante) es la que define el ángulo característico de cada prisma. Se ha considerado que la pareja de prismas emplazados junto al eje de la lente tienen un espesor despreciable, por lo que su eficiencia en la transmisión es de 1 (prismas 20 y 21). Los prismas se enumeran empezando por el extremo superior de la lente.

Traduciendo los datos mostrados en el gráfico anterior en el flujo que transmite cada prisma y teniendo en cuenta la simetría:

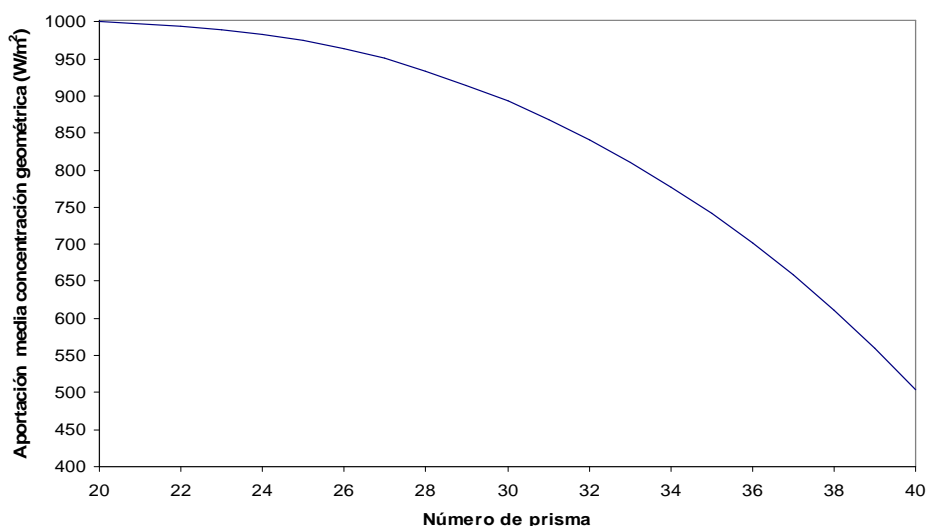


Figura 2.61. Aportación de flujo lente Fresnel arqueada en función del prisma.

Para no discretizar el análisis a un número determinado de prismas se ha definido un nuevo parámetro que se denomina desviación. Se recuerda que la desviación se considera como el ángulo que se forma desde el extremo (inicio) de un prisma con la focal en el eje de la lente.

En el siguiente gráfico se muestra la eficiencia anual media en función de la desviación. Las diferentes eficiencias corresponderían a diferentes lentes que tienen crecimiento de prismas simétricos axialmente (comenzando desde el eje de la lente), hasta la desviación indicada.

<sup>14</sup>  $\beta = \arctan(h_i / T)$

Es decir, una lente cuyos prismas extremales tengan una desviación de  $10,5^\circ$  tendrá un rendimiento medio anual del 93% (en cuanto a la radiación incidente que refracta en la lente para poder ser concentrada, y teniéndose en cuenta el tamaño del prisma).

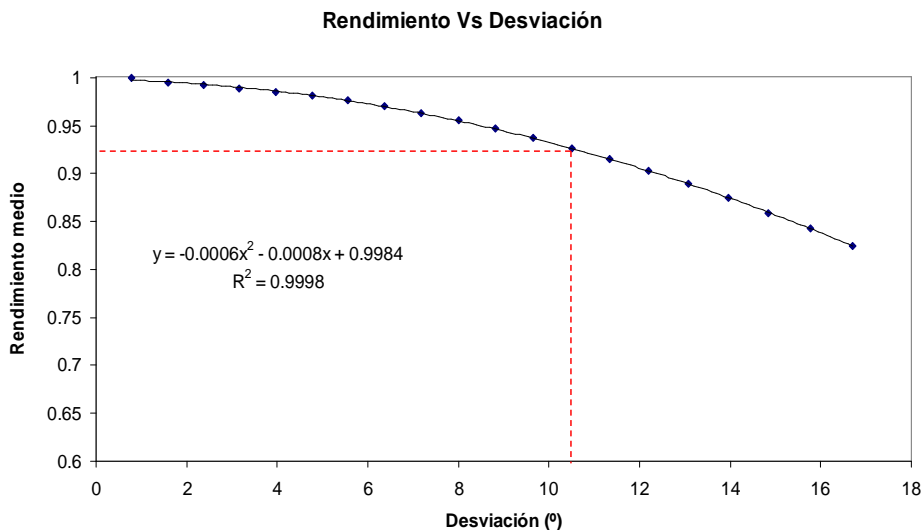


Figura 2.62. Eficiencia en la transmisión de luz lente Fresnel arqueada en función de la desviación.

A continuación se analiza la lente en OptiCad:

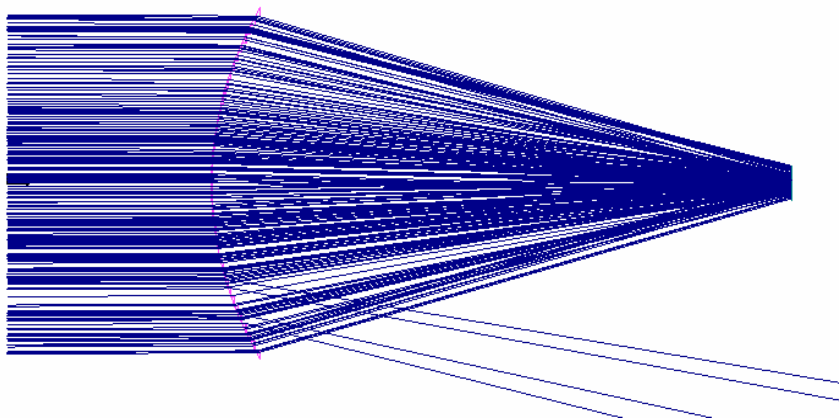


Figura 2.63. Trazado de rayos lente de Fresnel arqueada.

El receptor cuando el sistema está en eje se posiciona a una distancia de (63 + 5,76) cm del punto central de la lente, captando la radiación con una concentración de 9,53X.

Desviando los rayos solares hasta la inclinación de 23,5°, se obtiene una concentración media simulada en el receptor de 9,01X. Emplazando éste a una distancia de (45,4 + 5,76) cm de la lente y 21,1 cm por debajo de su eje.

Se aprecia como el sistema prácticamente no tiene pérdidas debidas a la variación de la inclinación solar (5,45% de pérdidas relativas máximas).

Analizando las diferentes características de las opciones estudiadas la solución que responde mejor es la de la lente de Fresnel con curvatura por lo siguiente:

- Su coste de manufactura es menor que el de las lentes cilíndricas.
- Al ser una Lente de Fresnel su espesor es mínimo, por lo que la estructura que la soporta debe soportar una carga mucho menor que en el caso de lentes cilíndricas.
- Su seguimiento del Sol es satisfactorio, con unas pérdidas mínimas.
- La concentración simulada media es superior al del resto de lentes de Fresnel.
- Al tratarse de una lente arqueada se disminuyen las aberraciones ópticas (Winston *et al.*) en comparación con las lentes de Fresnel
- En comparación con la lente de Fresnel triple, aprovecha su superficie de captación mejor y con unas pérdidas menores y una concentración mayor.

### 2.3. CONCENTRADOR SECUNDARIO

El concentrador secundario tiene que cumplir una serie de condiciones para el buen funcionamiento del sistema.

- ✓ Tener una aceptación elevada, para de esta forma poder captar la mayor cantidad de rayos con el menor movimiento posible.
- ✓ Homogeneizar el perfil de la radiación concentrada que recibe el receptor. Al ser el primario una lente de Fresnel el patrón de concentración es altamente gaussiano. Este efecto se contrapone a la efectividad de las células fotovoltaicas

de concentración, ya que éstas acostumbran a tener los contactos metálicos en los laterales.

- ✓ Concentrar la radiación que recibe, aumentando la concentración en un ratio mínimo de 2X.

La célula fotovoltaica se situará en la base del secundario, por lo que sus dimensiones coincidirán con las de zona de salida de los rayos de éste.

Se analizará en el concentradores primario considerado como óptimo en el punto A el efecto del acople del concentrador secundario.

### 2.3.1. LENTE DE FRESNEL CON CURVATURA + CPC

Esta lente produce un haz concentrado que no sufre prácticamente dispersión con la variación estacional de inclinación del Sol. Por esto, el secundario tendrá una mayor facilidad en la colección del haz concentrado.

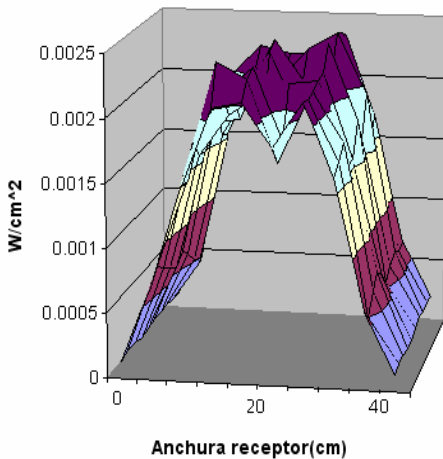


Figura 2.64. Distribución del flujo sobre el receptor.

En este caso la homogeneidad no supone un problema, ya que el error cuadrático medio ( $ECM^{15}$ ) de la distribución de radiación por unidad de superficie del receptor (sin secundario) tiene un valor muy bajo. ( $ECM = 0,0008184 \text{ W/cm}^2$  – equinoccios-,  $ECM = 0,000852 \text{ W/cm}^2$  –solsticios-).

El concentrador secundario no requiere la función de uniformizar el flujo como característica definitoria.

Para el diseño de los secundarios es determinante conocer la inclinación máxima con la que la lente refracta concentrando los rayos.

<sup>15</sup> Se denomina Error Cuadrático Medio (ECM) a la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de los errores verdaderos ( $E_i$ ).



En el caso de esta lente la inclinación máxima viene dada para la situación de solsticio y por la refracción en los prismas extremales. El ángulo característico de estos prismas ( $\beta$ ) es de  $31,34^\circ$  y la inclinación solar en los solsticios es de  $23,5^\circ$ , por lo tanto los rayos inciden en la lente con un ángulo  $54,84^\circ$ . Aplicando Snell se obtiene que la inclinación máxima de los rayos del haz concentrado es de  $33,03^\circ$ .

### 2.3.1.1 Concentrado Parabólico Compuesto – CPC-

El CPC tiene unas características (ver apartado 2.1.2.2) que le hacen ser uno de los candidatos idóneos como concentrador secundario para lentes de Fresnel (Swanson, 2003).

La lente primaria tiene una anchura de 0,40 m, por lo que para que la concentración geométrica final sea de por ejemplo 20X la longitud de la célula sería de 0,2 m. Téngase en cuenta que manteniendo las proporciones los resultados son extensibles a cualquier tamaño del sistema.

Todos los CPCs que se tratan se diseñan con un ángulo de salida de los rayos de  $90^\circ$ .

Dentro del rango de concentraciones pretendidas para el dispositivo final se estudian las siguientes:

#### 2.3.1.1.1. CPC con ángulo de media aceptación<sup>16</sup> ( $\theta$ ) de $30^\circ$ para concentración geométrica final de 20X

Conociendo que la inclinación máxima de los rayos que tiene que captar el secundario es de  $33,03^\circ$  y que para alcanzar 20 aumentos el tamaño de la célula tiene que ser de 0,2m y el ratio de concentración del CPC como mínimo de 2X. El diseño a priori es un CPC con  $\theta^{17} = 30^\circ$ , ya que para este ángulo la relación abertura/salida del secundario es de 2 (para CPCs con aceptancias mayores a  $30^\circ$  el ratio de concentración es menor a 2, i.e.  $\theta = 45^\circ \rightarrow 1,41X^{18}$ ).

Simulando este CPC en Opticad se obtiene los resultados siguientes:

---

<sup>16</sup> Ángulo de aceptación se define como el ángulo máximo entre el rayo solar y la normal del receptor que recibe la radiación.

<sup>17</sup> La inclinación solar para la cual se produce el mayor ángulo de incidencia se da puntualmente en los solsticios, resultando para el resto del año menor. Por lo tanto el hecho de que el ángulo de media aceptación sea  $3^\circ$  inferior afecta ínfimamente al rendimiento global y facilita la posibilidad de adquisición de un CPC más estándar/comercial.

<sup>18</sup> Además para ángulos de aceptación mayores la longitud de abertura del CPC es demasiado pequeña para captar el diámetro del cono solar concentrado en la totalidad del seguimiento estacional.

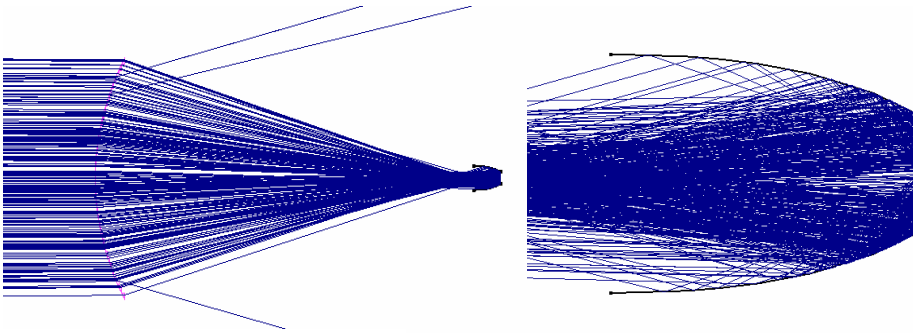


Figura 2.65. Trazado de rayos lente Fresnel arqueada + CPC.

Cuando el sistema se encuentra centrado con el Sol el punto más alejado del CPC se sitúa a una distancia de 73cm de la lente. Obteniéndose de esta forma una concentración simulada de 19,47X. La uniformidad de flujo en la célula cuantificada mediante el ECM es de  $0,0004937 \text{ W/cm}^2$ .

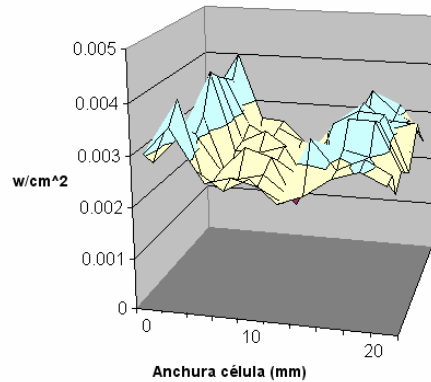


Figura 2.66. Distribución de flujo sobre el receptor de lente Fresnel arqueada + CPC.

Se aprecia que la uniformidad es mayor, pero en unos valores que como se ha comentado ya eran uniformes. La característica que si que se aprecia, aunque la uniformidad sea muy elevada, es que el perfil del flujo cambia. Adquiriendo ahora una

forma de U muy interesante<sup>19</sup>, ya que los contactos de la célula están en sus laterales. De esta forma la mayor densidad de electrones se producirá en la zona de evacuación de la corriente generada por la célula.

Para una inclinación solar intermedia de 12°, la concentración resultante es de 19,69X con un ECM de 0,001274, posicionándose a 64,9cm de la lente en el eje horizontal y 13,69cm por debajo de su eje.

Este pequeño incremento en la falta de uniformidad (con un valor de ECM que sigue siendo muy bajo) se aprecia en el siguiente gráfico (fig 2.67).

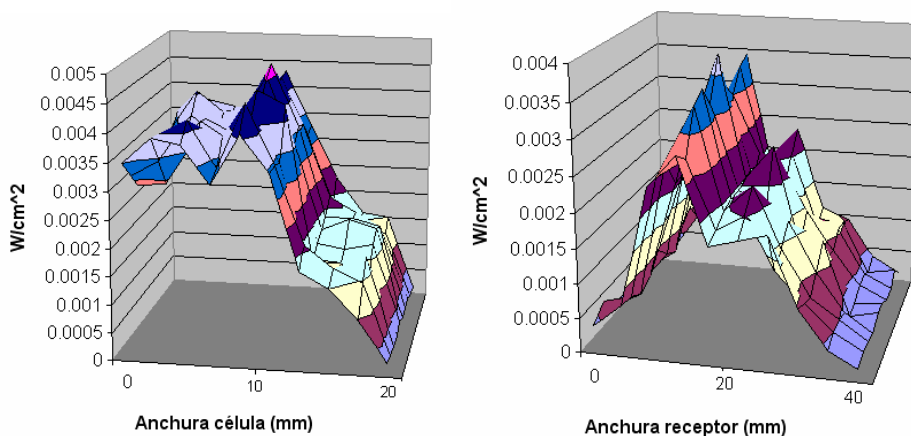


Figura 2.67. Distribución de flujo sobre el receptor de lente Fresnel arqueada + CPC para declinación 12°.

En los perfiles se ve que en ambos gráficos llega una mayor cantidad de radiación a una de las mitades de la célula, esto se debe a que el receptor o CPC capta los rayos que tienen una incidencia con el primario<sup>20</sup> de 12° sin estar rotado el mismo ángulo.

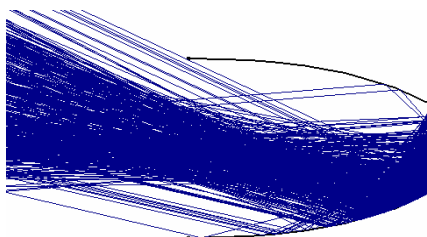


Figura 2.68. Trazado de rayos lente Fresnel arqueada + CPC para declinación 12°.

<sup>19</sup> El Concentrador Parabólico Compuesto concentra por sus características geométricas una mayor densidad de flujo en los extremos de la abertura de salida (célula en este caso).

<sup>20</sup> Tras la refracción, el ángulo máximo con el que llega el rayo al CPC sin rotar es de 27.23°, siendo menor al de la aceptación de diseño.

Se han simulado situaciones en las que se rota el CPC, obteniéndose resultados de uniformidades mejores, pero en un rango de mejora insignificante (del orden de  $10^{-4}$ ). Por ejemplo situando el CPC con un ángulo de rotación de  $12^\circ$ , que es el ángulo de la inclinación de los rayos, se obtiene una concentración de 19,41X con un ECM de  $0,000872 \text{ W/cm}^2$ .

En los solsticios, cuando los rayos alcanzan una inclinación de  $23,5^\circ$  respecto al eje de la lente, la casuística que se produce es la siguiente:

Si el CPC se posiciona sin estar rotado, la concentración resultante es de 11,08X; para intentar aumentar la concentración se rota el CPC, de forma que éste colecte un mayor número de rayos.

La solución que se adopta es rotar el CPC  $23,5^\circ$  (inclinación solar) y la concentración resultante es de 18,89X (ECM =  $0,001266 \text{ W/cm}^2$ ). Posición del CPC:

- ✓ Distancia de la lente: 54,4cm.
- ✓ Altura referenciada al eje de la lente: 23,62cm por debajo de eje.

En resumen, para estas tres inclinaciones del Sol los resultados son:

<b>CPC, <math>\theta = 30</math></b>	$0^\circ$	$12^\circ$	$23,5^\circ$
$C_s$	19,47X	19,41X	18,89X
ECM ( $\text{W/cm}^2$ )	0,000494	0,00127	0,00126
Pérdidas relativas (%)	-	0,31	3,07

Tabla 2.18. Resumen resultados para ángulo de media aceptación de  $30^\circ$ .

Para ángulos de media aceptación menores a  $30^\circ$  se aprecia globalmente que los tres parámetros resumidos en la tabla anterior empeoran, por ejemplo para  $\theta = 25$  ya se vislumbra esta tendencia (ver tabla 2.19).

$\theta = 25$	0°	12°	23,5°
Cs	19,25X	19,05X	18,21X
ECM (W/cm <sup>2</sup> )	0,000676	0,00131	0,00154
Pérdidas relativas (%)	-	1,05	5,71

Tabla 2. 19. Resumen resultados para ángulo de media aceptación de 25°.

### 2.3.1.1.2. CPCs para concentración geométrica final de >20X

Para alcanzar concentraciones mayores, sin variar la anchura de la lente primaria, es necesario que se disminuya la superficie de la célula fotovoltaica.

De esta forma, para doblar la concentración estudiada en el apartado anterior la nueva longitud de la célula debe ser de 1cm, de forma que el cociente que relaciona las superficies iluminadas de lente y célula sea de 40 aumentos.

$$\frac{\text{anchura\_lente} = 400\text{mm}}{\text{longitud\_célula} = 10\text{mm}} = 40X \quad (2.28)$$

El secundario tendrá pues un orificio de salida de los rayos de 1cm. La abertura del CPC viene determinada por el tamaño del haz concentrado que produce la lente de Fresnel, que tiene una longitud media de aproximadamente 40mm. Al conocerse estos condicionantes de longitudes de abertura y de salida, el concentrador queda definido. Siendo  $\theta = 15^\circ$  el ángulo para el cual se cumplen las dimensiones necesarias.

Se analiza el sistema en el cual se implementa dicho concentrador, obteniéndose que la concentración en los equinoccios es de 34,16X y en los solsticios de 31,3X.

Queda patente que tal como se podía intuir la aceptación es demasiado baja para el sistema por lo que se producen unas pérdidas demasiado grandes (porcentaje medio de pérdidas por encima del 20%).

Tomándose un tamaño intermedio de célula de 1,5cm (concentración geométrica de 26,67X), el CPC que satisface en un mayor grado los requisitos es el que tiene un ángulo de media aceptación de  $\theta = 25^\circ$ . Para  $\theta = 15^\circ$  la longitud de abertura no es la suficiente para coleccionar los rayos del primario, y aunque conociendo que con  $\theta = 25^\circ$  se

producirán algunas pérdidas (ver tablas 2.19), éstas no adquieren valores elevados (ver tabla 2.20).

$\theta = 25$	$0^\circ$	$23,5^\circ$
Cs	26,04X	24,44X
ECM ( $W/cm^2$ )	0,000771	0,00199
Pérdidas relativas (%)	-	6,55

Tabla 2.20. Resumen resultados para ángulo de media aceptación de  $25^\circ$ .

En función de la concentración final que se desee alcanzar, del espacio de que se disponga para situar el sistema, de la compacidad deseada, etc. se optará por un CPC con unas características u otras.

## 2.3.2. ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO ESTACIONAL Y DIARIO

Para finalizar el capítulo se analiza en la lente escogida como concentrador primario el movimiento que debe de seguir el receptor para captar la mancha focal a lo largo del año.

Se estudian dos casos diferentes:

Tipo I.- Concentrador Fresnel arqueado con una concentración geométrica de 10X, sin secundario. (F10X). (ver apartado 2.2.2.5).

Tipo II.- Concentrador Fresnel arqueado con concentración geométrica de 5X combinado con un CPC de  $\theta = 30^\circ$ , 2X (F5X+CPC).

El objetivo es cuantificar diferentes parámetros para de este modo poder discernir en los aspectos diferenciadores del uso de secundario o no, para alcanzarse el mismo ratio de concentración.

### 2.3.2.1. Sombreo

Recordando la figura 2.62, se pueden conocer las diferencias en los dos casos estudiados. La desviación máxima para F10X es de  $16,94^\circ$ , mientras que para el

dispositivo F5X+CPC la máxima desviación es de  $12,02^\circ$ . Siguiendo la curva, esta diferencia significa un 8% menos de eficiencia en la transmisión del F10X.

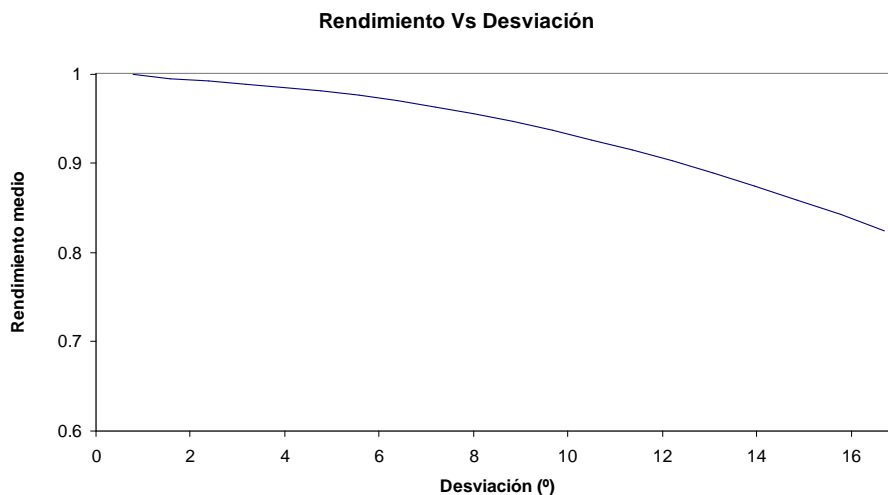


Figura 2.69. Eficiencia en la transmisión de luz lente Fresnel arqueada en función de la desviación.

### 2.3.2.2. Posición de la mancha focal

Mediante simulación óptica con Opticad se ha determinado el lugar del mejor foco de los sistemas ópticos propuestos. El área focal donde se situará el captador móvil se localiza maximizando la irradiancia recibida por un captador de área 10 veces inferior a la de la proyección plana de la lente Fresnel.

La dirección de la radiación solar directa incidente en la lente de Fresnel se define por dos ángulos, tal y como muestra la figura 2.70. El rayo solar incidente se proyecta en dos planos normales a la lente, el paralelo al eje de la lente y el perpendicular. Los ángulos definidos entre la dirección normal respecto a la lente y las proyecciones paralela y perpendicular de los rayos se denominan ángulo longitudinal y transversal respectivamente. El ángulo de incidencia longitudinal  $\psi$  y transversal  $\theta$  son pues los formados por el rayo incidente longitudinal y transversal, respectivamente, con la normal a la lente.

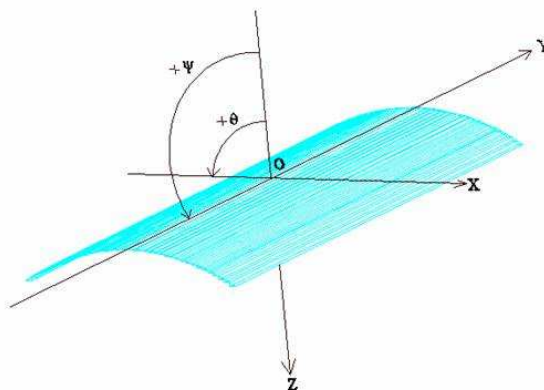


Figura 2.70. Esquema posicionamiento de la lente con los ángulos descriptores del movimiento solar.

Las simulaciones y la determinación del lugar del mejor foco permiten obtener la posición del centro del área focal para un amplio conjunto de pares  $(\psi, \theta)$  referido a los ejes de coordenadas centrados en la lente (figura 2.70). Se han ajustado a estos datos simulados las funciones presentadas en las tablas 2.21 y 2.22.

$X = A_0\theta + A_1\theta^3 + A_2\theta\psi^2$	$A_0 = 1,170257 \cdot 10^1$	$r^2 = 0,9988$
	$A_1 = -4,479983 \cdot 10^{-3}$	
	$A_2 = -7,603511 \cdot 10^{-4}$	
$Y = B_0\psi + B_1\psi^3 + B_2\theta^2\psi$	$B_0 = 1,087783 \cdot 10^1$	$r^2 = 0,9950$
	$B_1 = -1,145439 \cdot 10^{-3}$	
	$B_2 = -4,306718 \cdot 10^{-3}$	
$Z = C_0 + C_1\theta^2 + C_2\psi^2 + C_3\theta^2\psi^2$	$C_0 = 6,093972 \cdot 10^2$	$r^2 = 0,9679$
	$C_1 = -3,048345 \cdot 10^{-1}$	
	$C_2 = -1,185177 \cdot 10^{-1}$	
	$C_3 = 3,748297 \cdot 10^{-5}$	

Tabla 2.21. Localización del centro de la banda focal para el concentrador tipo I (F10X).

$X = A_0\theta + A_1\theta^3 + A_2\theta\psi^2$	$A_0 = 1,210165 \cdot 10^1$	$r^2 = 0,9940$
	$A_1 = -4,796646 \cdot 10^{-3}$	
	$A_2 = -1,009409 \cdot 10^{-3}$	
	$B_0 = 1,093246 \cdot 10^1$	$r^2 = 0,9954$



$Y = B_0 \psi + B_1 \psi^3 + B_2 \theta^2 \psi$	$B_1 = -7,829151 \cdot 10^{-4}$
	$B_2 = -6,673495 \cdot 10^{-3}$
$Z = C_0 + C_1 \theta^2 + C_2 \psi^2 + C_3 \theta^2 \psi^2$	$C_0 = 6,571176 \cdot 10^2 \quad r^2 = 0,9342$
	$C_1 = -2,624433 \cdot 10^{-1}$
	$C_2 = -9,496083 \cdot 10^{-2}$
	$C_3 = -2,278310 \cdot 10^{-5}$

Tabla 2.22. Localización del centro de la banda focal para el concentrador tipo II (F5X+CPC).

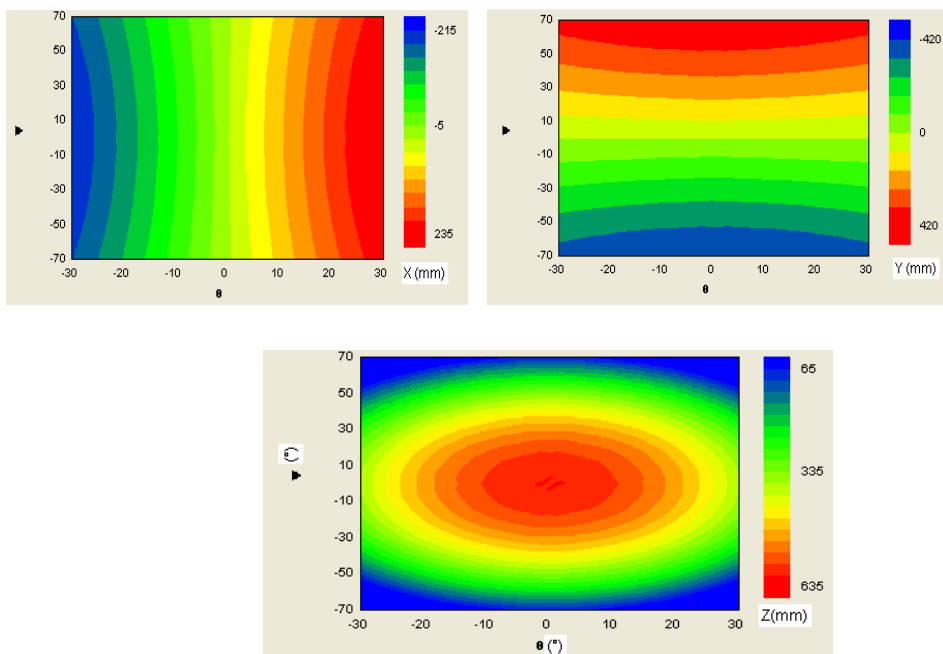


Figura 2.71. Coordenadas X,Y,Z del centro de la banda focal según los ángulos de incidencia solares (Concentrador tipo I).

Se puede enumerar que:

- El alejamiento máximo del área focal a la lente ocurre para incidencia normal.
- La posición del área focal depende tanto del ángulo de incidencia longitudinal como transversal.

- Se cumple el principio de superposición. El acortamiento de la distancia focal por la variación simultánea del ángulo longitudinal y transversal resulta prácticamente de la suma de los acortamientos producidos por cada una de las variaciones angulares por separado.

### 2.3.2.3. Concentración

La determinación de la irradiancia recibida en la banda focal permite obtener la concentración y la uniformidad del área focal para un amplio conjunto de pares  $(\psi, \theta)$ . Se han ajustado a estos datos simulados las funciones presentadas en la Tabla 2.23.

$$\begin{aligned} C_s(\theta, \psi) = & (D0) + (D1)\theta + (D2)\theta^2 + (D3)\theta^3 + (D4)\theta^4 + (D5)\psi + (D6)\psi^2 + (D7)\psi^3 + \\ & (D8)\psi^4 + (D9)\theta\psi + (D10)\theta\psi^2 + (D11)\theta\psi^3 + (D12)\theta^2\psi^2 + (D13)\theta^2\psi^2 + (D14)\theta^2\psi^3 + \\ & (D15)\theta^3\psi^1 + (D16)\theta^3\psi^2 + (D17)\theta^3\psi^3 \end{aligned} \quad (2.29)$$

Coeficientes	$r^2$
D0 = 9,317469 D1 = -2,47433851.10-16 D2 = 8,20810458.10-4 D3 = 3,65912705.10-19 D4 = 8,03536735.10-7 D5 = 3,56808767.10-17 D6 = 7,66543562.10-4 D7 = -9,75143971.10-21 D8 = -3,06797989.10-7 D9 = 6,17840586.10-33 D10 = 7,53207971.10-20 D11 = -2,63445299.10-36 D12 = -5,40022972.10-20 D13 = ,17597364.10-6 D14 = 1,46653710.10-23 D15 = 1,05759060.10-35 D16 = ,12087636.10-22 D17 = +4,86285080.10-39	0,96

Tabla 2.23. Ajuste que describe la concentración para cualquier momento del año.

Las figuras 2.72 y 2.73 muestran los mapas de concentraciones:

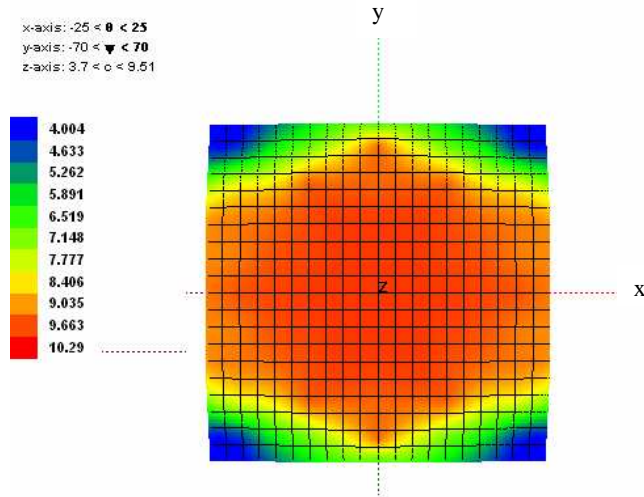


Figura 2.72. Concentración alcanzada en la banda focal según los ángulos de incidencia solares (Concentrador tipo I).

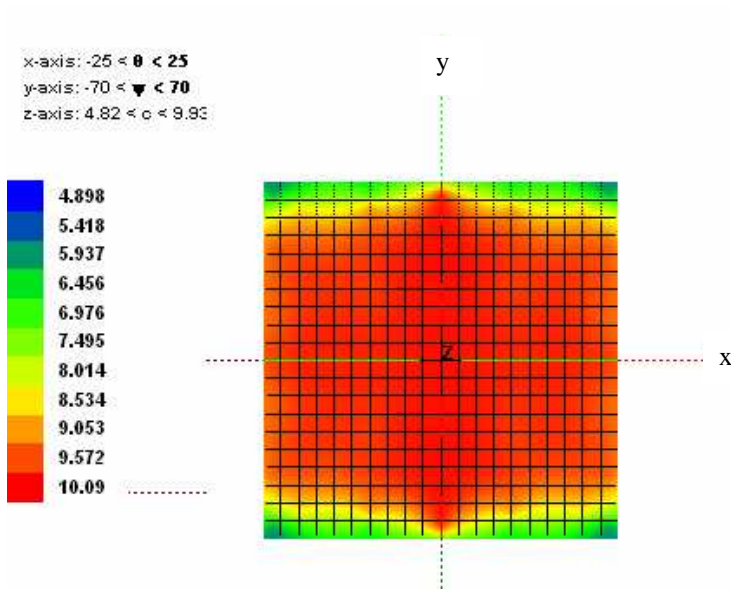


Figura 2.73. Concentración alcanzada en la banda focal según los ángulos de incidencia solares (Concentrador tipo II).

- Para un amplio rango de ángulos de incidencia la concentración óptica se mantiene por encima de 9X en los dos dispositivos de concentración.
- La dependencia de la concentración con el ángulo de incidencia longitudinal es clara.
- El concentrador tipo II ofrece mejores resultados para ángulos de incidencia longitudinales grandes.
- El valor medio de concentración del dispositivo tipo I en el rango de ángulos estudiados ( $-25^\circ < \theta < 25^\circ$  y  $-70^\circ < \psi < 70^\circ$ ) es 8,3 mientras que para el dispositivo tipo II es 9,6.

$\theta$ (°)	$\psi$ (°)	Type I	Type II
0	0	9,6	9,9
0	60	9,1	9,8
23,5	0	9,1	9,6
23,5	60	3,7	7,7

Tabla 2.24. Ratios de concentración para diferentes ángulos.

Se plantea comparar el efecto de las diferentes concentraciones alcanzadas por los dos dispositivos ópticos en diversas localidades climáticamente bien diferenciadas. A partir de datos climáticos de Meteonorm y aplicando Trnsys16, se evalúa la irradiancia solar directa y los ángulos de incidencia longitudinal y transversal en un plano orientado al Sur con inclinación igual a la latitud del lugar. Para evaluar los ángulos de incidencia se asume que el ángulo de incidencia longitudinal es  $0^\circ$  al mediodía solar. Es decir, el eje de simetría de la lente Fresnel se sitúa perpendicular a la dirección N-S. Aplicando las funciones de concentración descritas se evalúa que fracción de esta radiación solar directa incidirá en la banda focal del dispositivo óptico. Los resultados se muestran en la figura 2.74.

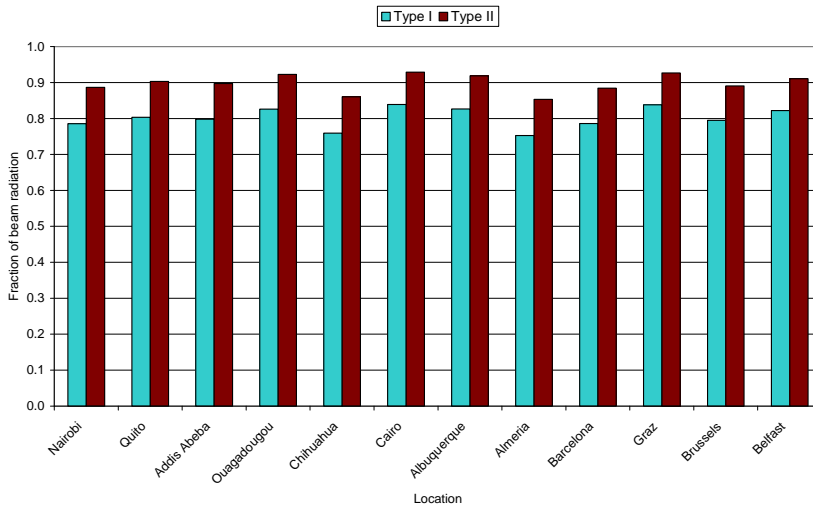


Figura 2.74. Fracción de la radiación solar directa recibida en la banda focal para diferentes localidades.

- El dispositivo tipo I da un valor medio de la fracción captada de 0,80 frente a un valor medio de 0,90 en el dispositivo II.
- Para el dispositivo tipo II el menor valor se obtiene en Almería con un 85% de la radiación solar directa focalizada. Esto es debido al peso de la radiación solar directa en verano en el total anual para una inclinación del receptor igual a la latitud. Este valor es mejorable optimizando la inclinación de la superficie receptora para las condiciones climáticas de Almería.
- El dispositivo Tipo II con secundario mejora la captación en todas las localidades frente al dispositivo I. Las diferencias son más importantes cuanto más homogéneamente se distribuye la radiación solar directa a lo largo del año en la localidad.

### 2.3.2.4 Radiación solar incidente

A partir de los resultados obtenidos se plantea comparar la radiación directa recibida en la banda focal con la radiación global recibida por un captador fijo de área igual a la lente de Fresnel. Para ello se define el cociente:

$$FR = \frac{IBF}{IGL} \tag{2.30}$$

Donde:

-IBF: Irradiancia solar directa incidente en la banda focal

-IGL: Irradiancia solar global en la lente Fresnel

Tanto el captador fijo como la lente de Fresnel se sitúan con una inclinación igual a la latitud del lugar para maximizar la captación anual. El eje de simetría de la lente se orienta en la dirección E-W. Dado que el resultado depende de la radiación directa y por lo tanto de las condiciones climáticas de la localidad, se ha evaluado su dependencia con el índice de claridad. Se ha realizado el estudio en las 12 localidades mostradas en la figura 2.74.

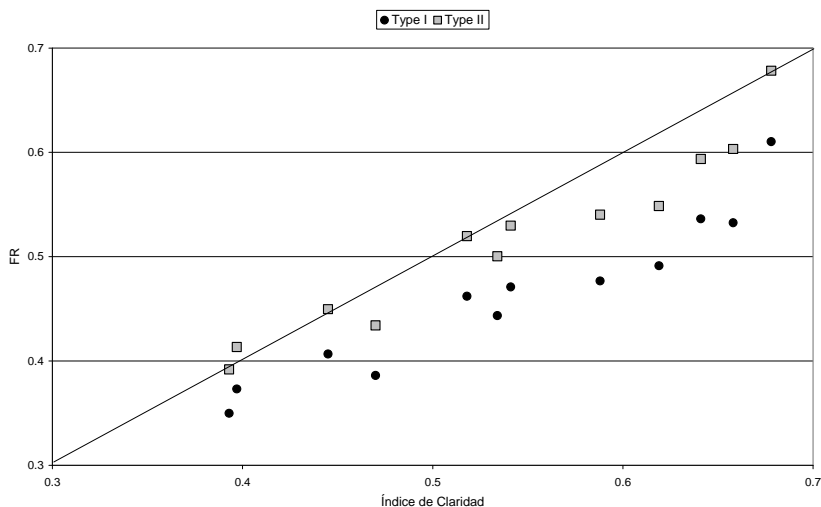


Figura 2.75. Fracción de la radiación solar directa recibida en la banda focal para diferentes localidades vs índice de claridad.

- En la mayor parte de los emplazamientos el concentrador tipo I permite aprovechar más del 40% de la radiación global incidente en la superficie inclinada fija.

- Para localidades relativamente favorables, con índices de claridad superiores a 0,5 el concentrador tipo II permite concentrar el 50% de la radiación incidente en la lente fija. Llegándose a valores próximos al 70% en localidades excepcionalmente adecuadas por su alta fracción solar directa. Para el concentrador tipo II la relación entre el índice de

claridad y la fracción concentrada es aproximadamente 1:1 en buena parte de las localidades.

- La superficie de célula fotovoltaica invertida en el concentrador es un 10% de la dedicada en el módulo plano y además se puede considerar que la radiación no incidente en la banda focal tendrá otros usos como la iluminación de ambiente interiores.

Fruto de este capítulo se ha patentado el sistema con número P200801012.

Las publicaciones derivadas del mismo son (ver apéndice D):

Chemisana, D., Ibáñez, M., Abdel Mesih, B., Rosell, J.I. Effect of a secondary concentrator on the Si solar cell electrical parameters. In Proceedings: *International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen*, El Escorial, 2007.

Chemisana, D., Ibáñez, M., Barrau, J. Comparison of Fresnel concentrators for building integrated photovoltaics. Accepted in *Energy Conversion and Management*, 2008.

# Capítulo 3

## Fase experimental óptica

---

El objetivo de este capítulo es doble. Por un lado es describir una metodología innovadora y factible para la caracterización experimental de elementos ópticos fundamentalmente refractivos y, además, su aplicación concreta en una lente de Fresnel lineal (tipología adoptada en el sistema desarrollado).

### 3.1. INTRODUCCIÓN

#### 3.1.1. MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DE CONCENTRADORES SOLARES

De los métodos existentes para caracterizar elementos ópticos, y concretamente concentradores solares, se describen a continuación los que se ha considerado son más relevantes en relación al método que se desarrolla en el presente capítulo.

- **VSHOT (Video Scanning Hartmann Optical Tester)**: este método, al igual que su predecesor SHOT (Wendelin *et al.*, 1991) se utiliza para caracterizar elementos ópticos reflexivos de grandes dimensiones (concentradores disco-parabólicos), midiendo la pendiente de la superficie de un gran número de puntos del espejo apuntándolos con un láser. El haz de luz reflejado del láser se capta sobre una pantalla situada en la misma posición que el emisor láser. La reflexión queda registrada mediante una cámara CCD (Jones *et al.*, 1997).
- **SCCAN (Solar Concentrator Characterization At Night)**: fue descrito caracterizando los heliostatos de una torre solar. El método básicamente consiste en situar una cámara CCD sobre la torre, orientar el heliostato a caracterizar de forma que la cámara capte el reflejo de una estrella determinada de intensidad lumínica adecuada. (Arqueros *et al.*, 2003).



- **Fotogrametría:** consiste en medir las desviaciones de los rayos solares reflejados debidos a las deformaciones de los espejos concentradores mediante la toma y análisis gráfico posterior de una secuencia de fotografías (Shortis *et al.*, 1996; Shortis *et al.*, 1997).
- **Fotogoniometría:** se utiliza para medir la transmitividad de elementos ópticos refractivos y distribución de intensidad lumínica de la luz transmitida. El procedimiento consiste en emplazar el elemento a caracterizar sobre una plataforma dotada de seguimiento en dos ejes; el haz luminoso transmitido se capta sobre un pantalla lambertiana, del cual se toma una fotografía con una cámara CCD. Este procedimiento se realiza para varias posiciones, de forma que la lente quede totalmente caracterizada mediante un mapeo de las fotografías en función de la intensidad lumínica (Andersen *et al.*, 2003).
- **Caracterización de la mancha focal concentrada sobre superficies lambertianas:** en este último apartado se engloban una serie de procedimientos similares que se fundamentan en la utilización de una pantalla lambertiana sobre la cual se dirige la radiación concentrada (Chemisana *et al.*, 2007). Se fotografía la pantalla con una cámara CCD y mediante tratamiento de la imagen se conocen los distintos niveles de iluminación de la mancha focal (patrón de iluminación). Si los niveles de iluminación obtenidos de la fotografía se quieren referenciar a unos niveles de flujo concentrado, se requiere la utilización de elementos de medida de flujo (calorímetros Gardon, termopilas, etc) que caractericen la irradiancia en una serie de puntos del blanco lambertiano. (Ballestrín *et al.*, 2004).

De los métodos descritos, los 3 primeros se utilizan para caracterizar reflectores, aspecto por el cual se descartan para la caracterización de un elemento refractivo.

Los métodos que en general utilizan superficies reflectantes lambertianas sobre las que se toman fotografías, funcionan de un modo correcto y con cierta simplicidad para elementos ópticos de reflexión que no sean de pequeño tamaño. En los espejos se sitúa la pantalla lambertiana sobre el foco del concentrador, de modo que la cámara CCD se puede emplazar sin ningún problema sobre la misma recta donde se encuentra la superficie lambertiana sin que sombree más de lo que lo hace ésta (efecto inevitable). En el caso de torres solares, el reflector lambertiano se situaría en la torre y la cámara CCD en algún punto del campo de heliostatos, intentando que este punto sea lo más

elevado posible para minimizar el ángulo con el que la cámara enfoca el blanco lambertiano.

En sistemas reflexivos de pequeño tamaño, la utilización del blanco lambertiano no es adecuada por varias razones. En primer lugar porque, a no ser que el blanco sea de unas dimensiones mínimas, sombreará al concentrador. En segundo lugar, es imposible posicionar la cámara enfocando en línea recta al blanco debido al tamaño de la misma, (implica que habrá que realizar una corrección de ángulo en la imagen capturada al tener que inclinar la cámara, a no ser que la cámara tenga una abertura del campo de visión elevada y capte el blanco sin necesidad de inclinarla). En tercer lugar, si el elemento concentrador es de pequeño tamaño y además su distancia focal es reducida, la cámara se tendrá que inclinar sin excepción, y las correcciones por ángulo serán inevitables.

En el caso de la caracterización de lentes, conocer el patrón de iluminación a través de la técnica del blanco lambertiano implica que la cámara prácticamente nunca podrá situarse entre la lente y la pantalla, (esto sería posible en sistemas en los que las lentes tienen un tamaño muy elevado y el sombreado que produciría la cámara sería despreciable, etc). En el caso de lentes con distancias focales en términos absolutos grandes, el problema del ángulo se reduce; pero en la mayoría de las situaciones las lentes tienen unas focales reducidas, (aspecto que se requiere en la inmensa mayoría de los sistemas solares atendiendo a cuestiones de tamaño del sistema, etc), y son de dimensiones pequeñas. Para la mayoría de sistemas refractivos solares, se requeriría por este método inclinar la cámara un ángulo considerable, con la problemática asociada a esta corrección de ángulo en el tratamiento de las imágenes.

Atendiendo a esta problemática se propone a continuación una técnica que permite la caracterización de lentes tanto en campo como en laboratorio, con independencia de las características de la lente. Además este procedimiento puede ser desarrollado en sistemas concentradores de reflexión, aunque para los mismos las técnicas descritas anteriormente ya funcionan satisfactoriamente. El método se basa en la utilización de un difusor lambertiano de ópalo (ver subapartado 3.2.4), de modo que al funcionar éste como emisor es posible situarlo en el foco del elemento óptico y tomar las diferentes fotografías CCD emplazando la cámara detrás (sin necesidad de interponerse entre el elemento lambertiano y la lente o reflector a caracterizar).

## 3.2. MATERIAL UTILIZADO

### 3.2.1. LENTE DE FRESNEL

La fabricación de lentes de Fresnel de simetría lineal es un proceso que realizan unas pocas compañías a nivel mundial, la mayoría de ellas localizadas en China. La tecnología consiste básicamente en una máquina que crea un molde y a partir de éste se producen las lentes.



Figura 3.1. Máquina de fabricación de lentes de Fresnel de gran tamaño. Fuente: TOSHIBA.

El precio aproximado de producción de un molde es de 6000€, valor que ha imposibilitado la adquisición de la lente propuesta en el capítulo. Actualmente se está en proceso de búsqueda de capital para posibilitar la fabricación específica de la lente propuesta.

La lente utilizada ha sido adquirida a Nihon Tokushu Kogaku Jushi Co., Ltd., con las siguientes características:

Distancia focal (mm)	150
Material	PMMA
Dimensiones (mm <sup>2</sup> )	100x300
Espesor (mm)	2

Tabla 3.1. Características lente de Fresnel.

### 3.2.2. ESPECTRORADIÓMETRO

Para realizar una caracterización óptica es fundamental conocer en que condiciones de radiación se lleva a cabo. Para esto se han seleccionado dos espectroradiómetros de la marca Ocean Optics®, que se acoplan para medir el espectro en el rango de entre 200 y 2500 nm. De esta forma se cuantifica la radiación en la totalidad del ancho de banda en el que las células fotovoltaicas producen electricidad.

El primero de los espectroradiómetros es el modelo HR4000, que mide entre valores de 200 y 1100 nm.

---

#### CARACTERÍSTICAS MODELO HR

---

##### Físicas

Dimensiones 89,1mm x 63,3mm x 34,4mm

Peso 190 g

---

##### Especificaciones del detector

Detector Toshiba TCD1304AP Linear CCD array

Rango 200-1100nm

Píxeles 3648 píxeles

Tamaño del píxel 8µm x 200µm

Profundidad del píxel 100000 electrones

Ratio del ruido de la señal 300:1

Resolución A/D 16 bit

Ruido en oscuridad 50 RMS counts

Corrección de linealidad >99,8%

Sensibilidad 130 fotones/count a 400nm; 60 fotones/count a 600nm

---

##### Espectroscópicas

Rango de longitud de onda Dependiendo del nivel

Resolución óptica ~0,3-10,0 nm FWHM

Ratio del ruido de la señal 300:1

Resolución A/D 16 bit

Ruido en oscuridad 50 RMS counts

Tiempo de integración 3,8ms – 10s

Rango dinámico 2.10<sup>8</sup> (sistema), 1300:1 para una sola adquisición

Desviación luz <0,05% a 600nm; 0,10 % a 435nm

---

---

Especificaciones ópticas	
Diseño	f/4, Czerny-Turner asimétrica
Distancia focal	400mm entrada; 68mm salida
Apertura	5, 10, 25, 50, 100 o 200 $\mu$ m anchura de rendija o fibra
Opciones gradeado	14 opciones diferentes
HC-1	No
Detector de captación lente	Si, L4
DET4 opciones de filtro	DET4-200-50;DET4-350-1000
Otros filtros	Filtros de banda ancha OF-1
Espejos colimadores	Estándar o SAG+UPG
Amplificador de UV	Si, UV4
Conector de la fibra óptica	SMA 905 para 0,22 de apertura numérica de fibra óptica

---

Tabla 3.2. Características del espectroradiómetro, HR.

Para medir el espectro hasta 2500 nm se utiliza el modelo NIR256-2.5.

---

#### **CARACTERÍSTICAS MODELO NIR256-2.5**

---

Físicas	
Dimensiones	153,4mm x 105,2mm x 76,2mm
Peso	980 g
Especificaciones del detector	
Detector	Hamamatsu G9208-256; InGaAs matriz lineal
Rango	900-2550nm
Píxeles	256 píxeles
Tamaño del píxel	25 $\mu$ m x 250 $\mu$ m
Profundidad del píxel	188 mega electrones
Píxeles defectuosos	5%

---

Espectroscópicas	
Rango de longitud de onda	900-2500
Resolución óptica	~7,5-25,0 nm FWHM
Ratio del ruido de la señal	4000:1
Resolución A/D	16 bit
Ruido en oscuridad	12 RMS counts
Tiempo de integración	1ms – 30ms
Rango dinámico	$5 \cdot 10^6$ (sistema), 5000:1 para una sola adquisición
Corrección linealidad	>99,8%
Especificaciones ópticas	
Diseño	f/4, Czerny-Turner simétrica
Distancia focal	40mm entrada
Apertura	5, 10, 25, 50, 100 o 200 $\mu$ m anchura de rendija o fibra
Opciones gradeado	1 opciones diferentes (N2)
HC-1	No
Detector de captación lente	No
OFLV opciones de filtro	No
Otros filtros	No
Espejos colimadores	Estándar
Amplificador de UV	No
Conector de la fibra óptica	SMA 905 para 0,22 de apertura numérica de fibra óptica

Tabla 3.3. Características del espectroradiómetro, NIR.

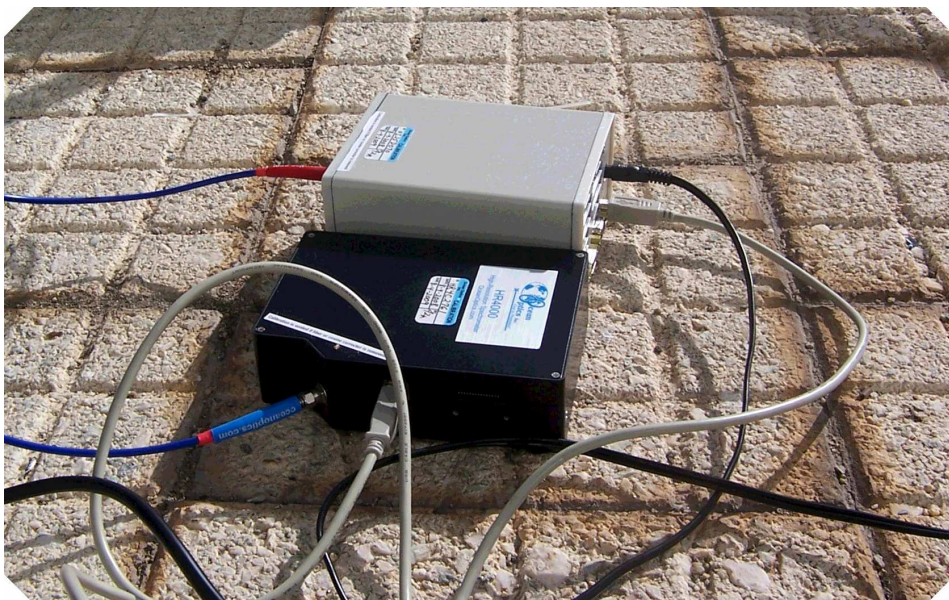


Figura 3.2. Espectroradiómetro.

### 3.2.3. CÁMARA CCD

La cámara CCD se utiliza para caracterizar el patrón de iluminación de la mancha focal, tomando imágenes sobre la pantalla lambertiana (ver figura 3.17).

Para realizar la función de fotómetro el sensor CCD deben cumplir una serie de características:

- ✓ Tener una respuesta lineal.
- ✓ Tener la resolución necesaria para captar niveles de iluminación muy diferentes (curva gaussiana).
- ✓ Respuesta espectral adecuada para captar longitudes de onda de entre 400 y 1200nm.
- ✓ Velocidad de adquisición de fotografías (fotografías por segundo, fps).

Teniendo en cuenta estos requerimientos la cámara seleccionada es de la marca Allied, modelo AVT Stingray F046 b/w.

Los datos técnicos de la cámara son:



Figura 3.4. Cámara CCD.

La velocidad máxima que permite la cámara es de 61 fotografías por segundo. Para poder trabajar a máxima velocidad es necesario incorporar un puerto *firmware v2*, ya que sino la velocidad máxima es de 30 fps.

Para tomar fotografías a corta distancia y de unas dimensiones de imagen de alrededor de un máximo de 40 mm, se acopla un macro objetivo de 50mm de focal. Dependiendo de si el tamaño de la imagen que se desea fotografiar es más pequeño o mayor al objetivo se le añaden más o menos anillos extensores. El sensor CCD utilizado es un dispositivo Sony de alta calidad.

**STINGRAY F-046B/C**  
**STINGRAY F-046B/C fiber**

Image device	Type 1/2 (diag. 8 mm); progr. scan SONY CCD
Picture Size	780 (H) x 580 (V)
Cell Size	8.3 μm x 8.3 μm
Resolution depth	8 bit / 14 bit (16 bit in High SNR mode)
Lens mount	C-Mount / CS-Mount
Digital interface	IEEE 1394b, (S 800 daisy chain)
Transfer rate	100 Mbit/s, 200 Mbit/s, 400 Mbit/s, 800 Mbit/s
Frame rates	Up to 61 fps (full frames)
Gain control	Manual: 0...24 dB, auto gain
Shutter speed	30 μs...67 s, auto shutter
Image pre-processing	LUT; shading correction*; High SNR mode; white balance; color interpolation (debayering); local color anti aliasing; hue; saturation; sub-sampling; 2x - 8x binning* or sub-sampling*; separate reference AOI for auto features
Grabber features	32 MB on-board memory; deferred image transport; trigger delay; multi-shot; mirror image*; several trigger modes; SIS (secure image signature); sequence mode*; storable user sets
Power requirements	DC 8 V – 36 V; < 3.5 W @ 12 V
Dimensions	73.2 mm x 44 mm x 29 mm (L x W x H)
Mass	92 g (without lens)
Operating temperature	+ 5... + 45 °Celsius
Storage temperature	- 10... + 60 °Celsius
Regulations	CE; FCC Class B; RoHS (2002/95/EC)
Options	Angled heads; cable tails; optical filters; board level versions; peltier cooled device; medical design on request; AVT FirePackage / Active FirePackage / Fire4Linux

Figura 3.3. Características cámara CCD (Fuente: Allied)



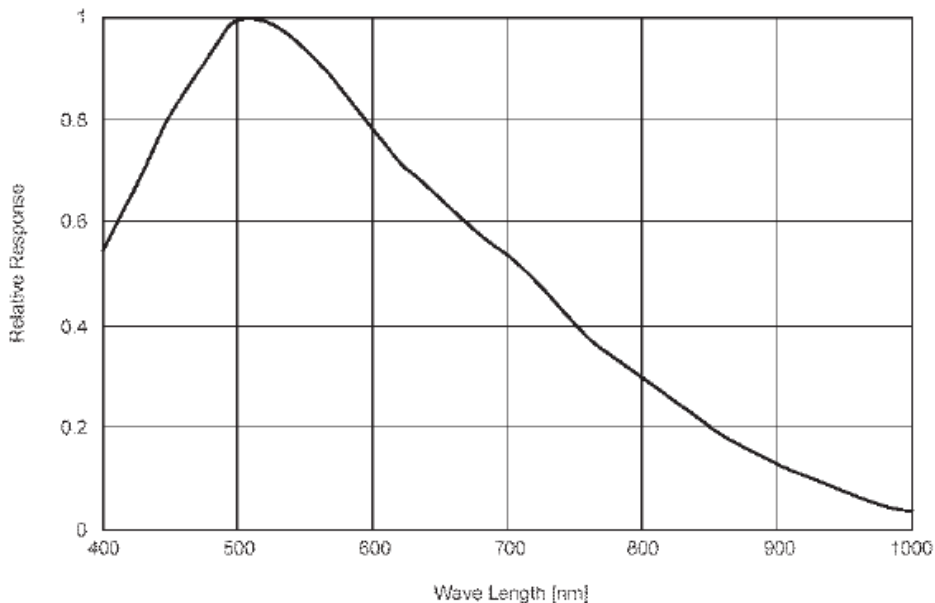


Figura 3.5. Respuesta espectral de sensor CCD.

### 3.2.4. DIFUSOR LAMBERTIANO

Lo que se denomina difusor lambertiano consiste en una lámina óptica que se posiciona en el foco de la lente. Esta lámina debe cumplir la función de emisor lambertiano. Para ser una fuente lambertiana la condición es que su absorción sea prácticamente nula, es decir, que transmita la radiación que le incide reproduciendo exactamente el mismo patrón de iluminación que recibe en su superficie.

Se pueden describir dos tecnologías que proporcionan difusores, ambas parten del mismo material que es vidrio.

- a) Vidrio arenado: consiste en erosionar la superficie del vidrio a través de un tratamiento con arena.
- b) Vidrio con lámina de ópalo: se aplica al vidrio un tratamiento superficial de adición de un recubrimiento de ópalo.

Lo más adecuado, según el fabricante, para conseguir las características lambertianas, es el cristal difusor con ópalo (Edmund optics Ltd.). El espesor de la lámina difusora es de 5 mm para unas dimensiones de  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ , con un espesor de la capa de ópalo de 0,45mm.

→ Difusor lambertiano: elemento que refleja o emite la radiación en todas las direcciones y con la misma intensidad en todas ellas.

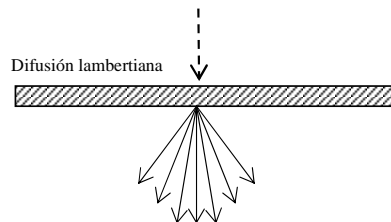


Figura 3.6. Esquema difusión lambertiana.

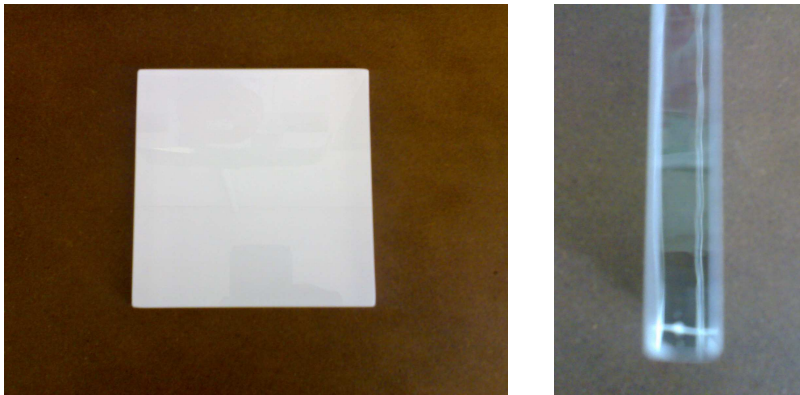


Figura 3.7. Difusor lambertiano en vistas frontal y lateral.

### 3.2.6. POTENCIÓMETRO

Para medir la potencia concentrada en el foco o para medir la potencia sin concentrar se utiliza un potenciómetro de la marca Ophir, con cabezal tipo calorímetro. El cabezal utilizado está preparado para medir potencias de hasta 30 W (F30A).


 <p>F30A</p>	Absorber:	Broadband: 0.19 - 20 $\mu$ m, LP1: 0.25-2.2 $\mu$ m	
	Aperture:	$\varnothing$ 17mm	
	Digital Power Scales:	150W / 30W for BB, 150W/30W/3W for LP1	
	Maximum Power:	150W for 50s, 100W for 90s 30W continuous	
	Maximum Average Power Density:	BB: 20KW/cm <sup>2</sup> , LP1: 35KW/cm <sup>2</sup>	
	Power Noise Level:	3mW	
	Power Accuracy:	$\pm$ 3% <sup>a</sup>	
	Maximum Energy Density J/cm <sup>2</sup>	Broadband	LP1
	<100ns	0.3	0.05
	1 $\mu$ s	0.5	0.3
	0.5ms	5	20
	2ms	10	50
	10ms	30	250
	Response Time with Display (0-95%):	1.2s	
Linearity with Power:	$\pm$ 1%		
Energy Scales:	LP1:300J/30J/3J	BB:100J/30J/3J	
Energy Threshold:	20mJ		
Cooling:	Convection		

Figura 3.8. Características del calorímetro (Fuente: Ophir)

Una vez se conoce el número de vatios que se reciben, el siguiente paso es traducir esta medida en unidades de flujo. Para esto se mide el tamaño de la zona iluminada utilizando un sistema de referencia de unidades conocidas.

### 3.2.7. SEGUIDOR

Todo el instrumental se emplaza sobre un seguidor a dos ejes con una precisión de 0,2° de la marca Feina, modelo SF9. Esta tipología de seguidor tiene una gran versatilidad, ya que en su estructura se pueden fijar desde paneles planos hasta sistemas de concentración que requieran de una alta precisión. Dependiendo del uso que se le pretenda se seleccionará un programa u otro para seleccionar las condiciones de seguimiento que se requieran.

Otro aspecto ventajoso del mismo es que su coste es reducido.

### 3.2.8. PIRHELÍOMETRO

En el seguidor se fija un pirheliómetro de la marca Kipp & Zonen, modelo CHP1. Este se posiciona con una gran precisión sobre una plataforma niveladora de modo que forme exactamente un ángulo de 90° con la estructura del seguidor.

A través del pirheliómetro se conoce el flujo de radiación directa que se está recibiendo en el plano del concentrador ( $W/m^2$ ).



Figura 3.9. Pirheliómetro.

### 3.3. METODOLOGÍA DEL EXPERIMENTO

El elemento que constituye el banco de pruebas para realizar los diferentes experimentos es el seguidor.

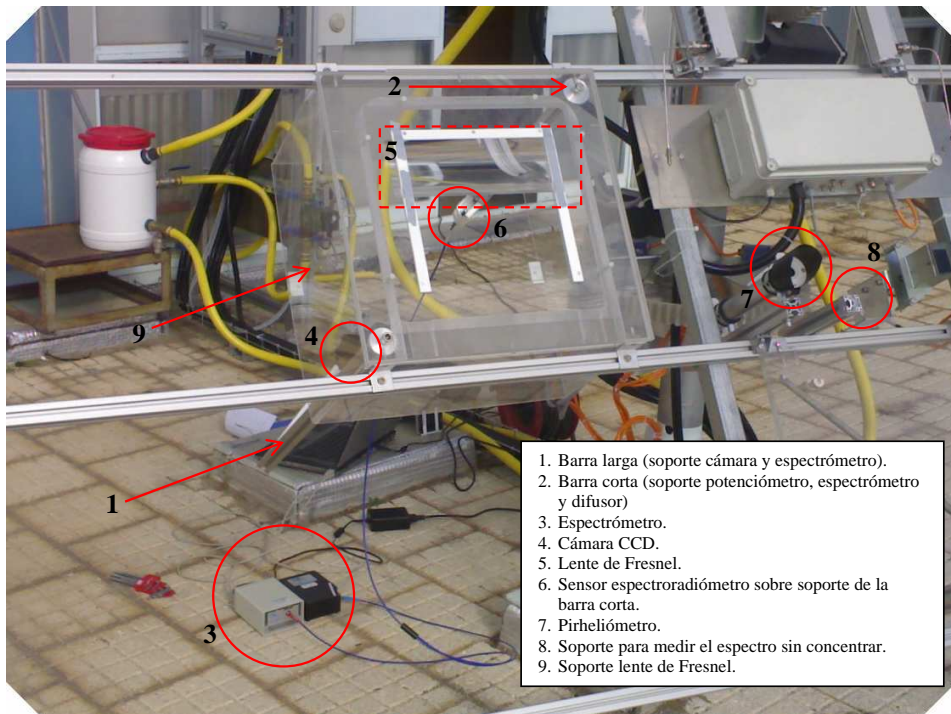


Figura 3.10. Características del calorímetro.

El proceso general del experimento es el siguiente:

1. Posicionar el elemento óptico a caracterizar (lente de Fresnel) sobre el seguidor.
2. En el elemento de soporte de la lente se encuentran dos barras sobre las cuales se emplazan los diferentes aparatos de medida. Una primera barra sobre la cual se fijan de forma alternada según la medida a realizar el potenciómetro, el espectroradiómetro y el difusor lambertiano. En la segunda barra se sitúa la cámara CCD.
3. Realizar la medición del espectro solar sin concentrar y la radiación directa normal incidente medida con el pirheliómetro.
4. Realizar la medición del espectro solar del haz luminoso que concentra la lente.
5. Medir la potencia que produce la lente con el calorímetro (la totalidad del haz concentrado debe ser captado por la cavidad del potenciómetro).
6. Medir las dimensiones de la mancha focal que produce la lente sobre un plano.
7. Conociendo la potencia que produce la lente y las dimensiones de la mancha focal se obtiene el flujo de radiación concentrado sobre el plano. Con este resultado y el flujo de radiación sin concentrar facilitado por el pirheliómetro se calcula el ratio de concentración óptica de la lente.
8. Una vez medido el espectro se fija la cámara sobre la segunda barra, extrayendo previamente el espectrómetro y sustituyéndolo por el difusor lambertiano. Tras enfocar correctamente la mancha focal que se transmite a través del difusor y asegurarse de que la imagen no está saturada, se procede a la toma de fotografías. Cuando se enfoca la mancha focal, el procedimiento para situar el difusor a la distancia focal es: a través de un eje perpendicular a la lente observar con la cámara el momento en que la mancha presenta una inflexión en la reducción o aumento de su tamaño.
9. Se analizan las fotografías con el software Euresys eVision<sup>®</sup> obteniéndose como resultado el patrón de iluminación que produce la lente y que es el que recibirán las células fotovoltaicas.

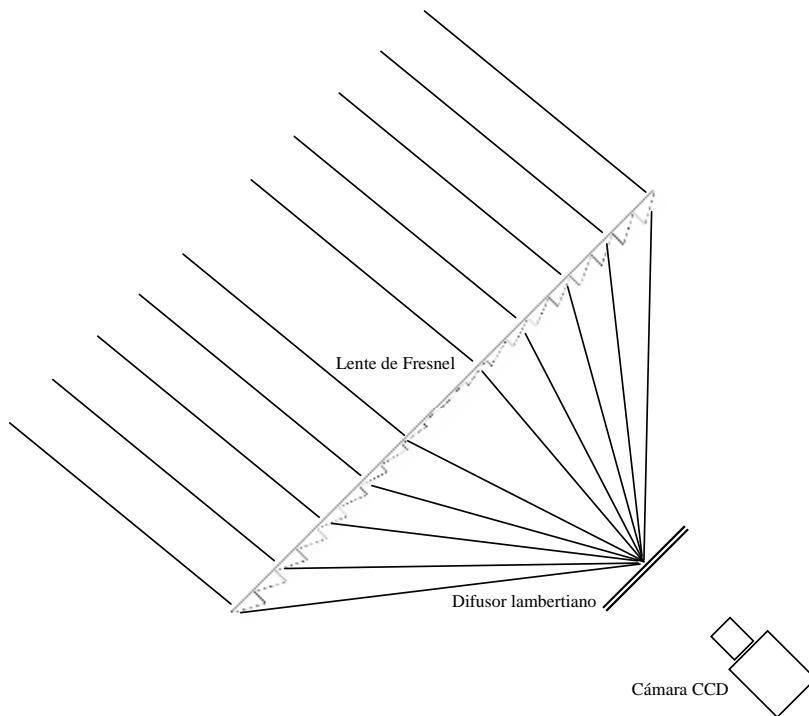


Figura 3.11. Esquema del montaje experimental.

## 3.4. RESULTADOS

### 3.4.1. MEDICIÓN DEL ESPECTRO

El primero de los espectros que se mide es el de la radiación que recibe el plano del concentrador.

Para que el espectro medido sea contrastable, se realiza un procedimiento de normalización del espectro de la radiación global a la Irradiancia de referencia de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ .

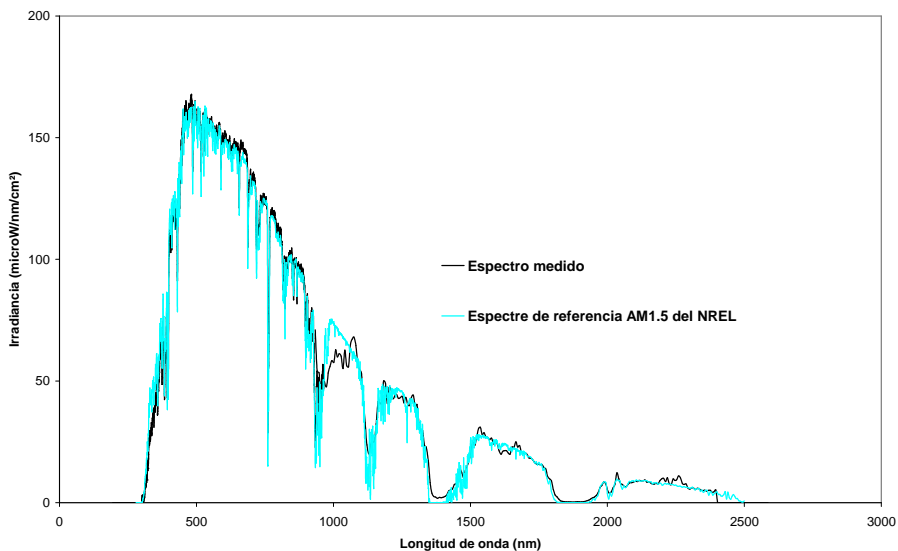


Figura 3.12. Comparación de espectros (medido 6/10/2008)

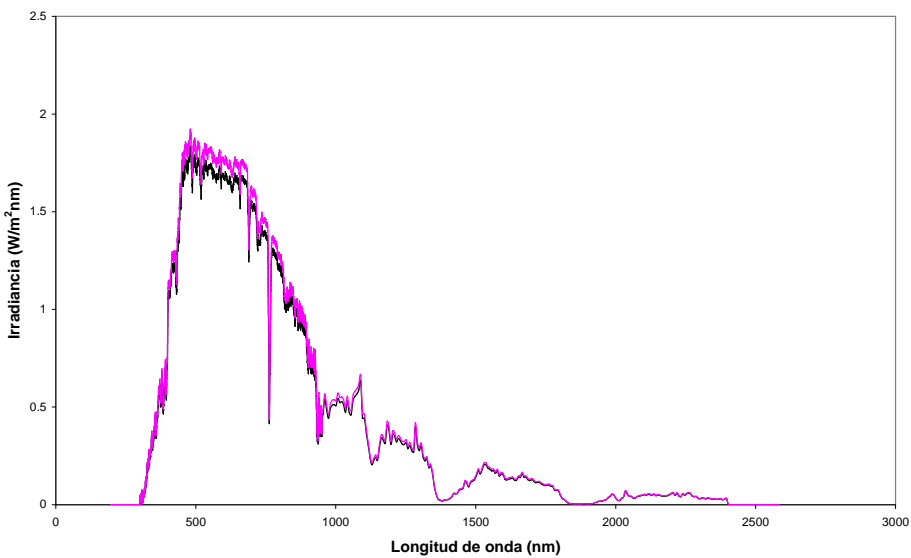


Figura 3.13. Espectro de la radiación global (20/10/08).

Conocido el espectro global normalizado en el plano del concentrador, se mide el espectro existente después de la lente.

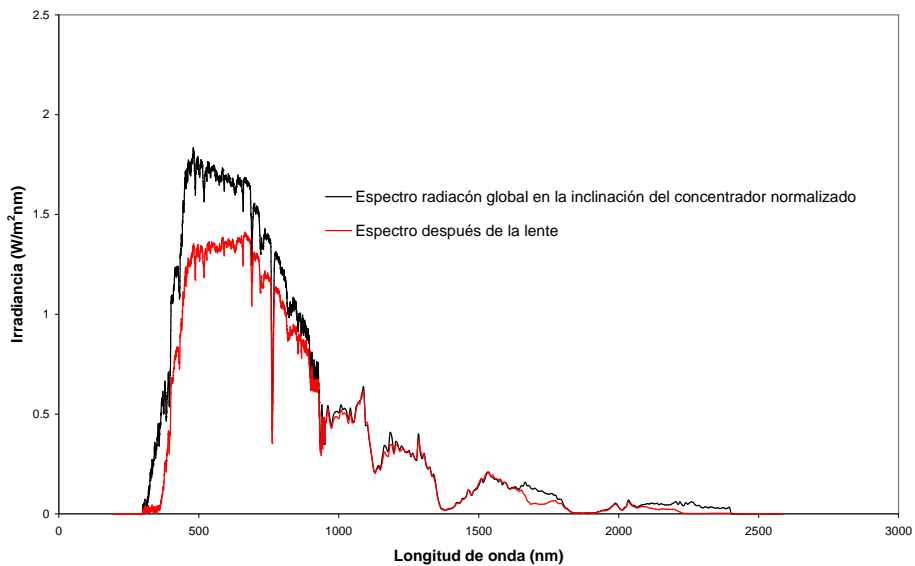


Figura 3.14. Espectros antes y después de la lente.

### 3.4.2. MEDICIÓN DE POTENCIA Y CARACTERÍSTICAS DE LA MANCHA FOCAL

Para la medida de la potencia concentrada por la lente, se ha aplicado una máscara que sólo permite el paso de la radiación por una franja de 1 cm de amplitud por los 10 cm de anchura de la lente (ver figura 3.15.). De esta forma toda la radiación que concentra la lente es captada por la cavidad del calorímetro.



Figura 3.15. Medición de potencia.



El valor de la potencia medida por el calorímetro es de 0,811 W con una precisión de  $\pm 3\%$ .

Si este valor se referencia al tamaño de la franja de la lente ( $0,1 \times 0,01 \text{ m}^2$ ), el resultado es el siguiente:

$$\text{Flujo que transmite la lente} = \frac{0,811}{1 \cdot 10^{-3}} = 811 \text{ W/m}^2 \cdot$$

Conociéndose el valor de la radiación directa proporcionado por el pirheliómetro,  $914 \text{ W/m}^2$ , se realiza el cociente entre este valor y el valor del flujo que atraviesa la lente para cuantificar el valor de la transmitancia en la franja descubierta de la lente. Al tratarse de una lente de simetría lineal, se puede generalizar en que el valor obtenido de transmitancia en la franja se puede extender al valor medio de la lente.

$$\text{Transmitancia, } \tau_{\text{experimental}} = \frac{811}{914} = 0,887$$

Las pérdidas ópticas de la lente son entonces de un 11,3 %.

Si se referencia la potencia a las dimensiones de la mancha focal se obtiene la concentración de la lente. Como se ha mencionado anteriormente, se conoce el tamaño utilizando un sistema de referencia de dimensiones conocidas. En el caso del haz concentrado se toman las dimensiones del difusor ( $50 \times 50 \text{ mm}^2$ ).

Mediante tratamiento gráfico de imágenes (ver figura 3.16), se ha medido la anchura visible del foco sobre el difusor, calculándose un valor medio de 5,14 mm.

Conociéndose a su vez que la franja de lente descubierta para la medición de la potencia tenía una anchura de 1 cm:

$$\text{Flujo concentrado} = \frac{0,811}{5,1 \cdot 10^{-5}} = 15901,96 \text{ W/m}^2 \cdot$$

$$C_{\text{experimental}} = \frac{15901,96}{914} = 17,40 \text{ soles.}$$

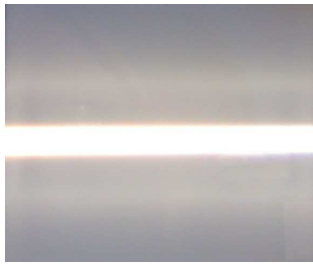


Figura 3.16. Mancha focal sobre el difusor.

La distancia focal experimental de la lente es de 14,1 cm.

Otra situación que se ha cuantificado es medir la concentración cuando la mancha focal tiene una anchura de 1 cm, es decir cuando la concentración geométrica es de 10X (valor de diseño que se ha utilizado en el estudio teórico).

$$C_{\text{experimental, 10X}} = \frac{8110}{914} = 8,87 \text{ soles.}$$

La distancia del difusor a la lente en este caso es de 13,3 cm.

La última de las caracterizaciones que se realiza es la medida del patrón de iluminación del haz concentrado.

#### 3.4.4. PATRÓN DE ILUMINACIÓN

La caracterización del patrón de iluminación de la lente de Fresnel se realiza mediante el tratamiento de la imagen capturada por la cámara CCD de la mancha focal en el difusor lambertiano.

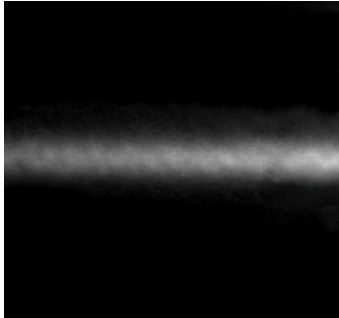


Figura 3.17. Fotografía CCD.

Se ha realizado una batería de 6 fotografías, de las cuales se han desechado las que presentaban un patrón gaussiano mayor y menor.

Del resto de las fotografías se presentan a continuación dos gráficos diferentes, uno que representa la uniformidad del haz concentrado en la dirección de crecimiento de los prismas y otro en el sentido longitudinal de la mancha focal.

En la tabla siguiente (figura 3.18) se muestran los patrones de iluminación obtenidos. Para cada fotografía se muestran dos representaciones diferentes. La primera de ellas es el patrón en el sentido longitudinal de la mancha focal. En esta dirección la variabilidad máxima en nivel de iluminación de los píxeles es de 9 puntos, que referenciada a la altura media de la gaussiana (64 puntos) representa un 14,1%.

En el sentido transversal de la lente, es decir donde se produce el perfil gaussiano, la altura media respecto al nivel base de iluminación del difusor (16 puntos) es de 64 puntos.

Independiente a lo comentado el objetivo principal de la caracterización del patrón es conocer cualitativamente la forma del mismo en la mancha focal.

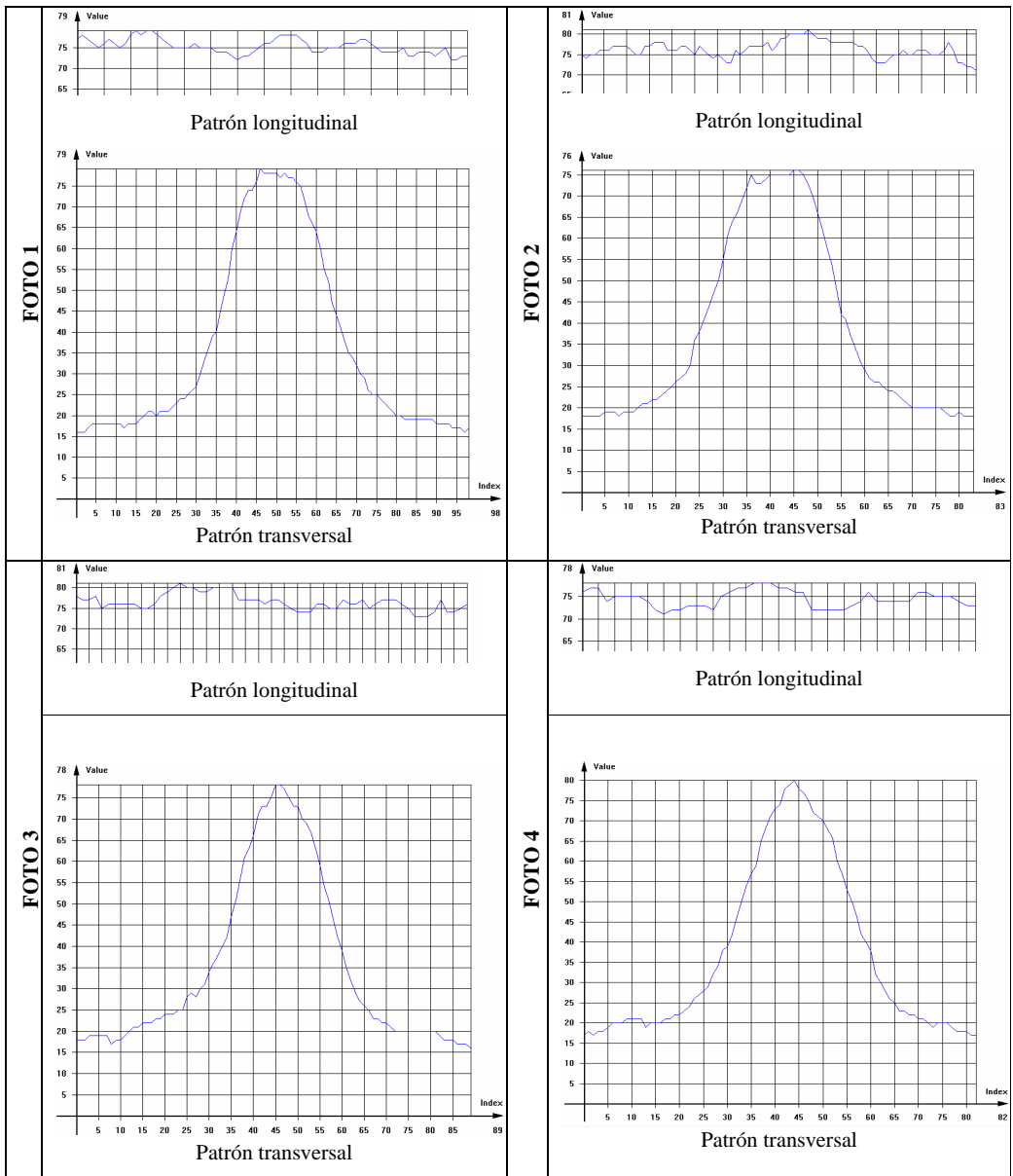


Figura 3.18. Patrones de iluminación.

# Capítulo 4

## Fase experimental térmica

---

En los tres capítulos siguientes se describe el funcionamiento térmico del sistema experimentalmente, numéricamente y analíticamente. Los estudios numérico y experimental se han realizado de forma paralela, dado que están altamente vinculados. El orden de estos dos capítulos se ha decidido siguiendo el proceso que se ha considerado más lógico.

En este capítulo se analiza experimentalmente el sistema como colector térmico en condiciones desde el inicio del calentamiento en régimen transitorio y hasta alcanzarse el estado estacionario, para esto se detallará el material utilizado, la metodología del experimento y los resultados de la recolección de datos.

### 4.1.-MATERIAL UTILIZADO

- **Bomba:** se utiliza una bomba peristáltica PERCOM® N-M para dirigir el caudal adecuado desde un depósito de acumulación hasta el tubo del colector. La bomba cuenta con un cabezal multiadaptador para tubos de 4 a 12 mm de diámetro, lo que le permite conseguir un caudal regulable desde 1,08 hasta 73,8 l/h. Se requiere un depósito de acumulación, dado que la bomba no se puede conectar directamente a la red, que tiene una capacidad de 50 litros aproximadamente, y el agua se renueva de forma continua para intentar que la temperatura de entrada de agua al colector sea lo más constante posible.

El caudal de bombeo se varía de forma que se pueda validar el modelo obtenido con la simulación CFD, con las posibles pequeñas variaciones debidas a la precisión de la bomba en sí.

La bomba se alimenta con un voltaje de 230 V, de manera que se conecta directamente a la red eléctrica.

La recta de calibración facilitada por el fabricante, acoplándose en el cabezal el tubo de menor sección que permite (4mm) es:

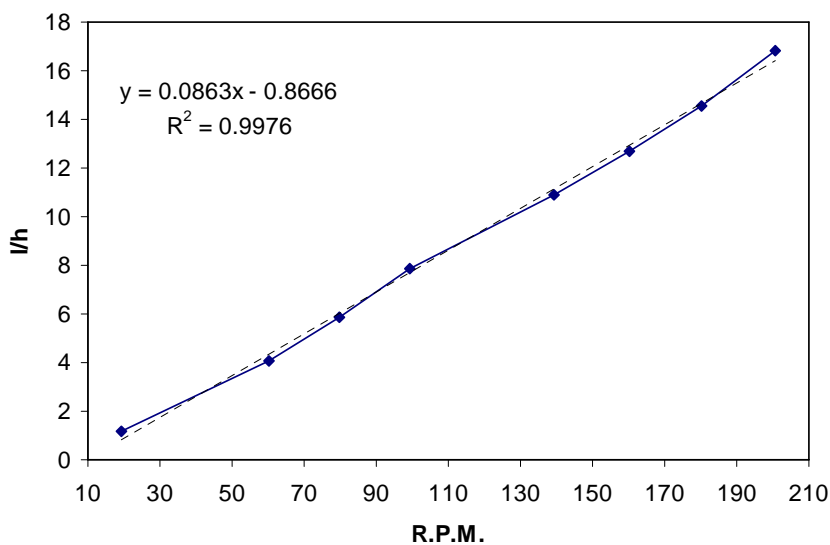


Figura 4.1. Curva de calibración de la bomba (tubo  $\varnothing = 4\text{mm}$ ).



Figura 4.2. Sistema de bombeo.

- **Colector:** (véase descripción en Apéndice A).
- **Dataloguer:** se utiliza un dataloguer de la marca Campbell Scientific Ltd. Modelo CR23X.

El CR23X es un dataloguer totalmente programable y controlable trabajando a pequeña escala. Se comanda desde el software PC208, con el cual se puede realizar una programación de la adquisición de datos, tener un control en tiempo real de los mismos y la posibilidad de grabarlos. Cada dataloguer registra su temperatura (de referencia).

Las conexiones que se realizan son: 9 sensores de temperatura (termopares tipo K) en tipo diferencial.

El dataloguer se alimenta con una batería de 12V



Figura 4.3. Dataloguer

- **Termopares:** los termopares están basados en el *efecto Seebeck*, también conocido como *efecto termoeléctrico*. Concretamente, la unión de dos metales determinados produce un voltaje que es proporcional a la temperatura a que está sometida dicha unión.

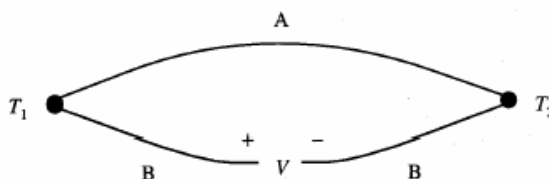


Figura 4.4. Circuito de un termopar.

Por regla general (figura 4), se utilizan dos uniones de ambos metales para conseguir cerrar un circuito eléctrico y realizar la medición del voltaje (diferencia de potencial) entre ambas uniones. Este montaje es lo que se denomina un *termopar*. En la figura 3, se muestran los hilos conductores de dos metales A y B que forman sendas uniones sometidas a diferentes temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ , resultando un voltaje (potencial)  $V$  que puede ser medido. Evidentemente, si ambas uniones están a la misma temperatura, no se produce voltaje (f.e.m.) neto. En cambio, si la temperatura es diferente, sí aparece un voltaje ( $V$ ). El valor de este voltaje, que depende de las propiedades de los metales A y B, y de la diferencia de temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ , es directamente proporcional a dicha diferencia de temperaturas, expresándose:

$$V = \alpha(T_1 - T_2) \quad (4.1)$$

Donde  $\alpha$  se conoce como *coeficiente de Seebeck*. Con todo, la relación entre el voltaje y la temperatura no es exactamente lineal, aunque sobre un pequeño intervalo de temperaturas,  $\alpha$  se puede considerar prácticamente constante. De



hecho, cuando la temperatura de una de las uniones (unión de referencia) se mantiene a 0 °C, se suele aproximar el voltaje obtenido según la expresión,

$$V = aT + bT^2 \tag{4.2}$$

en la que *a* y *b* son las constantes de los metales utilizados.

Por otro lado, habría que tener en cuenta, además, el llamado efecto termoeléctrico secundario (*efecto Peltier*), asociado a la corriente eléctrica que se establece en el circuito, pero que suele ser poco importante en los sistemas de medida cuando se compara con el *efecto Seebeck*.

Los termopares que se utilizan son los de tipo K.

Ref.	Materiales	Rango °C	μV/°C
B	Rodio/platino, platino 30%, rodio 6%	0 a 1800	3
E	Cromel/constantán	-200 a 1000	63
J	Hierro/constantán	-200 a 900	53
K	Cromel/alumel	-200 a 1300	41
N	Nirosil/nisil	-200 a 1300	28
R	Platino/platino con 13% rodio	0 a 1400	6
S	Platino/platino con 10% rodio	0 a 1400	6
T	Cobre/constantán	-200 a 400	43

Tabla 4.1. Tipos termopares.

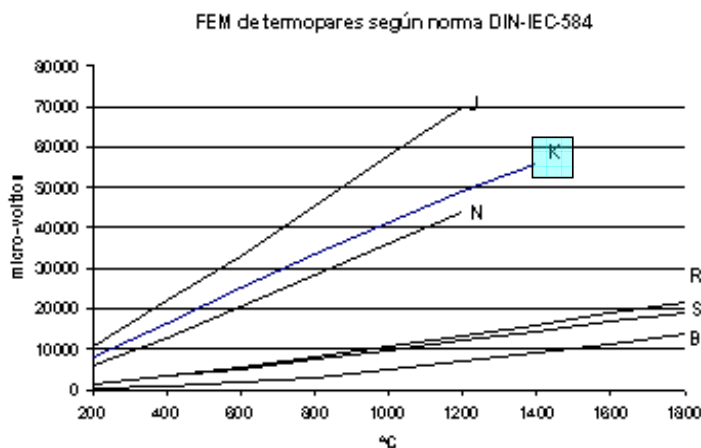


Figura 4.5. Relación V-T.

Type	Material		Accuracy	Temperature Range( °C )
	Positive	Negative		
<b>B</b>	Platinum-30%Rhodium	Platinum-6% Rhodium	±0.5%	600~1700
<b>R</b>	Platinum-13%Rhodium	Platinum	±0.25%	0~1600
<b>S</b>	Platinum-10% Rhodium	Platinum		
<b>K</b>	Chromel	Alumel	±0.4%	0~1000
			±0.75%	0~1200
			±1.5%	-200~0
<b>E</b>	Chromel	Constantan	±0.4%	0~800
			±0.75%	0~800
			±1.5%	-200~0
<b>J</b>	Iron	Constantan	±0.4%	0~750
			±0.75%	0~750
<b>T</b>	Copper	Constantan	±0.4%	0~350
			±0.75%	0~350
			±1.5%	-200~0

Tabla 4.2. Datos termopares.

Las temperaturas que se miden con los termopares son las siguientes:

- ✓ Temperatura fluido en la entrada [TE]
- ✓ Temperatura fluido en la salida [TS]
- ✓ Temperatura fluido en el centro [TC]
- ✓ Temperatura pared lateral en la entrada [T1]
- ✓ Temperatura pared inferior en la entrada [T2]
- ✓ Temperatura pared lateral en el centro [T3]
- ✓ Temperatura pared inferior en el centro [T4]
- ✓ Temperatura pared lateral en la salida [T5]
- ✓ Temperatura pared inferior en la salida [T6]

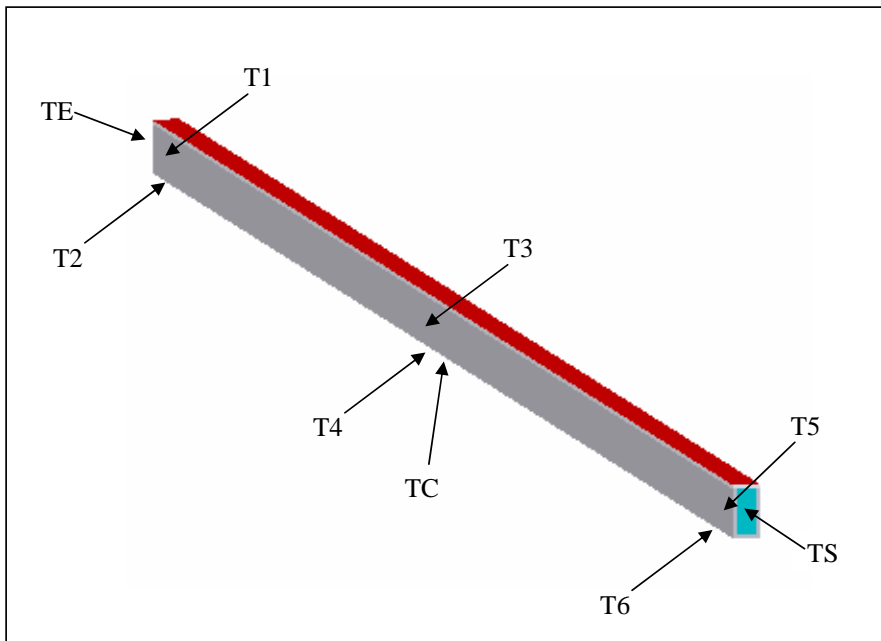


Figura 4.6. Esquema posición termopares.

- **Lámina de cobre:** se utiliza una lámina de cobre de 0,5mm de espesor, y de 1m de longitud (longitud que se desea calentar). En los extremos de la misma se conectan dos electrodos, a través del cortocircuito de los mismos se consigue emular una fuente de flujo de calor constante.
  
- **Pinza amperimétrica:** El funcionamiento de la pinza se basa en la medida indirecta de la corriente circulante por un conductor a partir del campo magnético o de los campos que genera la corriente. Recibe el nombre de pinza porque consta de un sensor, en forma de pinza, que se abre y abraza el cable cuya corriente queremos medir.  
 Este método evita abrir el circuito para efectuar la medida, así como las caídas de tensión que podría producir un instrumento clásico.



Figura 4.7. Pinza amperimétrica.

- **Voltímetro:** se utiliza para conocer la diferencia de potencial que se produce entre el inicio y el fin de la zona sobre la que se desea aplicar un cierta potencia. A partir de la intensidad que circula por el conductor y la caída de tensión que se produce se calcula la potencia que se suministra en el disipador.
- **Fuente de potencia cortocircuitable:** para suministrar la potencia en la lámina de cobre se utiliza un soldador de electrodos, con el cual se puede comandar la intensidad con facilidad.
- **Aislante:** se aísla el sistema disipador en todas sus caras con 3 cm de poliuretano de alta densidad.

## 4.2.-METODOLOGÍA

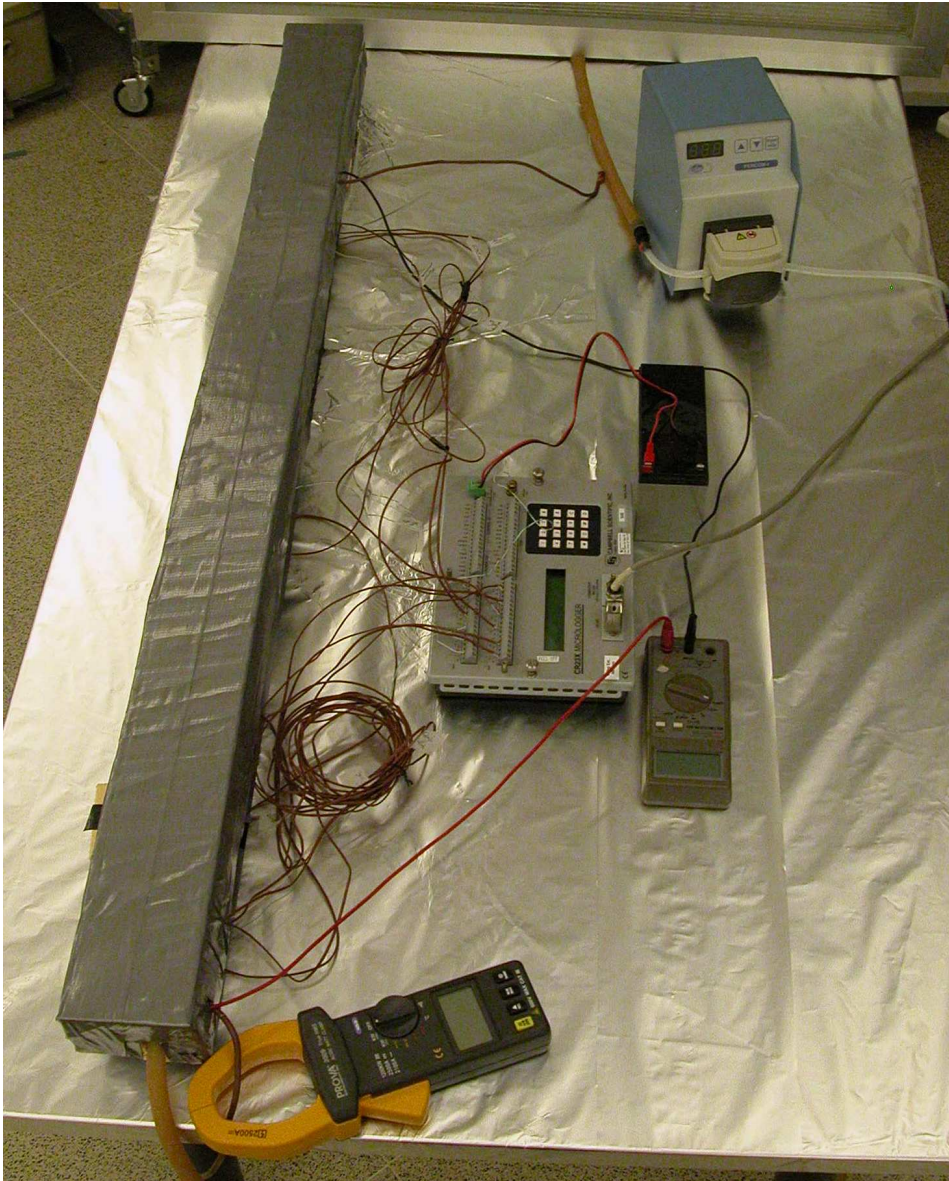


Figura 4.8. Sistema del experimento.

Se colocan todos los aparatos en una superficie plana, asegurando que el disipador no tenga inclinación ninguna.

El primero de los procedimientos que se realiza es comprobar que la lámina de cobre genera un flujo de calor uniforme. Se mide la diferencia de potencial entre uno de los extremos respecto a diferentes puntos que avanzan hasta que el punto final es el extremo opuesto de la lámina.

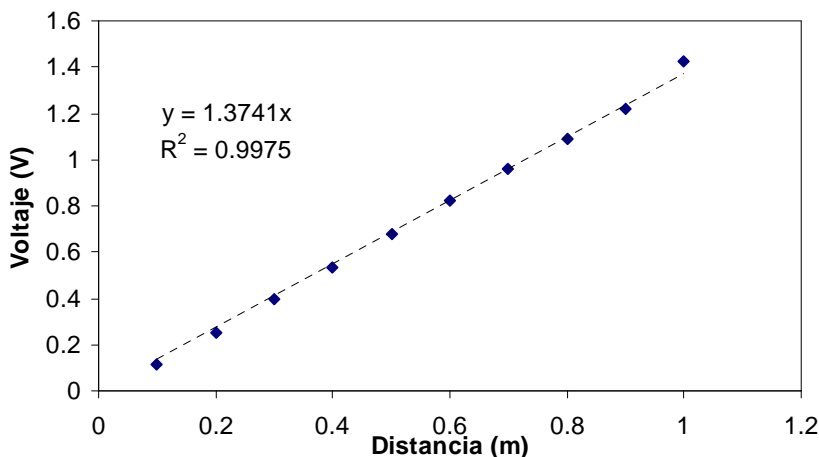


Figura 4.9. Diferencia de potencial sobre la lámina de cobre.

Representando las diferencias de potencial obtenidas entre los distintos puntos se observa una proporcionalidad lineal con alto índice de significación. La recta de regresión construida es la que pasa por el origen de coordenadas (en un mismo punto  $\Delta V=0$ ) y tiene una pendiente de 1,37. Atendiendo a este resultado se puede afirmar que la lámina funciona según lo previsto.

Tras conocerse que la lámina de cobre emula una distribución de calor por unidad de superficie homogénea, el siguiente aspecto es cuantificar éste flujo térmico. Para conocer la potencia que suministra la soldadora al sistema, se le conecta un voltímetro y una pinza amperimétrica, obteniéndose la potencia multiplicando los valores de las dos variables medidas. Paralelamente se halla la tensión con el osciloscopio (Agilent® 3000), observándose que la señal que suministra la soldadora sigue un patrón de onda triangular. Realizando la corrección pertinente para el cálculo

de los valores eficaces para este tipo de ondas, se regula el sistema para que suministre una potencia a disipar de 70 W.

La bomba peristáltica utilizada proporciona un caudal variable en un amplio rango de valores, que para las características de la sección del canal rectangular que se estudia (se detalla en capítulos posteriores), supone el reproducir casos en régimen laminar con número de Reynolds desde 125 hasta 1000.

Se realizan una batería de 5 experimentos:

1.  $Re = 125$ .
2.  $Re = 250$ .
3.  $Re = 500$ .
4.  $Re = 750$ .
5.  $Re = 1000$ .

Inicialmente se pretendía realizar experimentos para todo el régimen laminar, pero las características de las bombas impiden alcanzar una variabilidad de caudales tan amplia como para abarcar todo el régimen laminar. Dadas las características de comportamiento de este régimen, se estudian 5 casos que permiten conocer el funcionamiento del disipador en el régimen laminar, ya que para la otra mitad ( $Re > 1000$  y  $< 2300$ ) se le presupone características análogas a las ensayadas. Además, como uno de los objetivos que debe cumplir el disipador es que entre sus dos extremos haya un salto de temperaturas para conseguir el aprovechamiento térmico, se obtiene que con Reynolds superiores a 750 el incremento de temperaturas ya es insignificante ( $< 2 \frac{^{\circ}C}{m.lineal}$ ) para un colector térmico.

La metodología adoptada en cada uno de los casos es:

- a) Calibración / verificación de la bomba para el caudal que debe suministrar.
- b) Conexión del datalogger al software de comando y recolección de los datos PC208.
- c) Puesta en marcha del sistema hidráulico hasta que se estabilicen e igualen todas las temperaturas de los termopares.
- d) Conexión del suministrador de potencia.
- e) Consecución del régimen estacionario.
- f) Desconexión del suministro de potencia.

- g) Enfriamiento del sistema hasta la nueva estabilización de temperatura.
- h) Recolección y post proceso de los datos.

### Análisis de errores

Se ha estimado que las pérdidas de calor hacia el exterior han sido prácticamente nulas, tomándose un valor de referencia del 2%. Atendiendo a esta consideración, la potencia eléctrica disipada por la lámina calentadora de cobre es la utilizada para los cálculos de flujos térmicos. La buena concordancia entre los valores de la potencia eléctrica incidente y la medida de la variación de entalpía del agua en las diferentes secuencias de toma de datos, verifican la hipótesis de que el sistema es prácticamente adiabático con el exterior.

Los errores sistemáticos asociados a la incertidumbre de las medidas de caudal, potencia eléctrica y temperaturas son respectivamente 4%, 0,5% y de 0,3°C.

## 4.3.-ANÁLISIS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

Una secuencia de medidas se considera válida si el balance energético del sistema es equilibrado, es decir, si la potencia que suministra la fuente de alimentación ( $P_i$ ) es absorbida por el líquido caloportante ( $P_f$ ). Donde:

$$P_f = \dot{m}C_p(T_{S,agua} - T_{E,agua}) \quad (4.3)$$

La condición de validez es:

$$P_f \cong P_i$$

La secuencia de medidas es correcta si, siguiendo el criterio expuesto por Sung y Mudawar, la diferencia entre las dos potencias es inferior al 8% (Sung y Mudawar, 2006).

Los resultados del balance energético se pueden presentar en función de la diferencia de temperaturas del fluido entre la salida y la entrada del disipador ( $T_s - T_e$ ) y del número de Reynolds (figura 4.10).



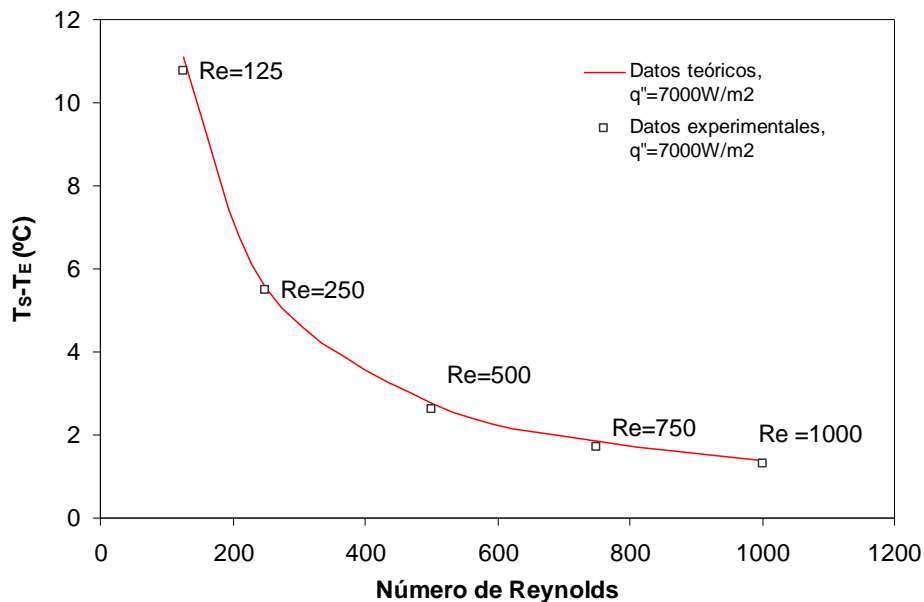


Figura 4.10. Comparación de los datos experimentales y de las predicciones del balance energético en función de la diferencia de temperatura del líquido refrigerante entre la entrada y salida del disipador vs Re.

Al tratarse del balance energético del fluido, se pueden linealizar los resultados aplicando la inversa del incremento de temperaturas del fluido. De esta forma se obtiene una expresión de mayor simplicidad que generaliza los puntos obtenidos.

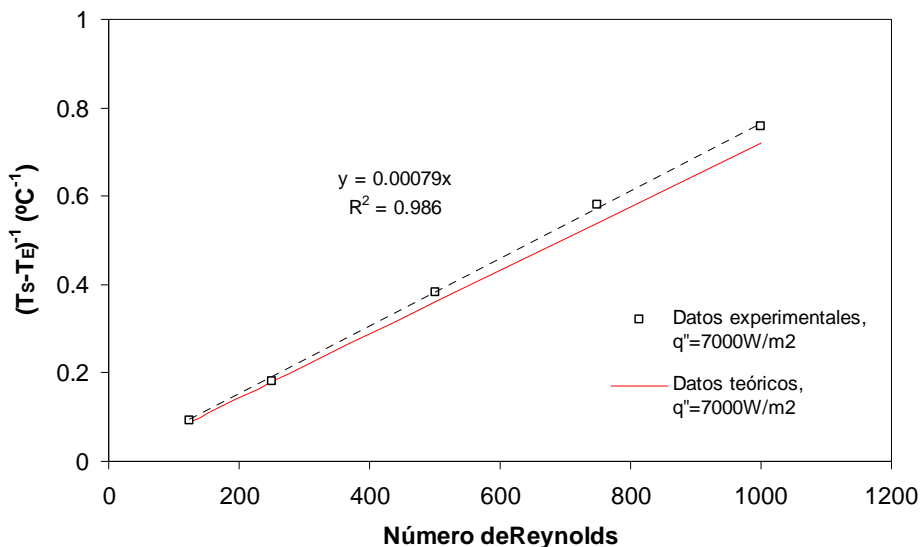


Figura 4.11. Linearización figura 4.10.

Los casos realizados en el montaje experimental presentan una gran concordancia con las curvas del balance energético equilibrado, expresando de esta forma que la potencia eléctrica disipada a través de la lámina de cobre ( $P_i$ ) ha sido evacuada por el líquido refrigerante ( $P_f$ ). Estos resultados validan el montaje experimental y cada una de las secuencias de recogida de datos representadas.

A modo ilustrativo se presenta para uno de los casos la evolución de las temperaturas adquiridas en el experimento, con las tres fases claramente marcadas: calentamiento-régimen estacionario-enfriamiento. ( $Re=1000$ ).

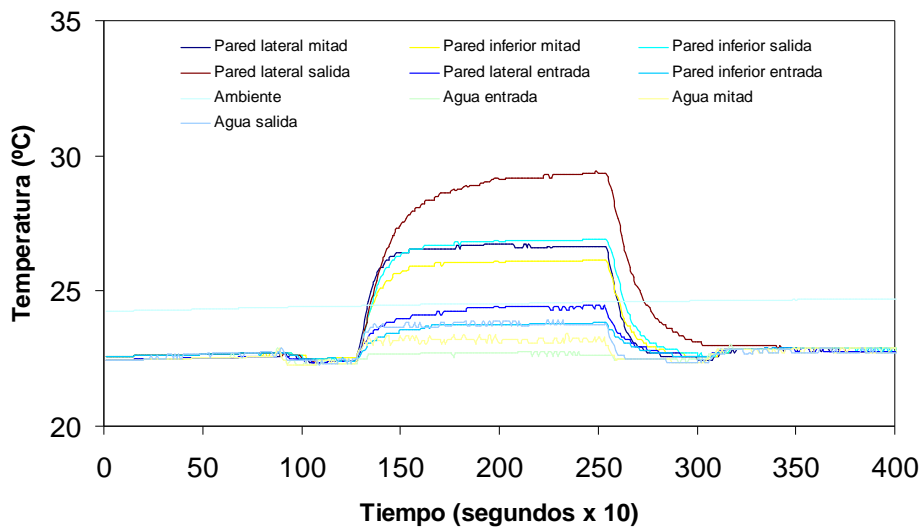


Figura 4.12. Mapa de temperaturas del sistema experimental,  $Re = 1000$ .

En la siguiente tabla se presentan los datos característicos de las 5 secuencias de recogida de datos validadas.

	Símbolo	Ud.	Re=125	Re=250	Re=500	Re=750	Re=1000
Caudal	Q	m <sup>3</sup> /s	1,51E-6	3,01E-6	6,03E-6	9,04E-6	1,20E-5
		l/h	5,43	10,85	21,70	32,56	43,41
Velocidad de entrada	V <sub>e</sub>	m/s	0,0127	0,0253	0,0507	0,0760	1,101
Diferencia de temperaturas del fluido entre la entrada y la salida	$\Delta T_{E-S}$	°C	10,75	5,48	2,61	1,72	1,32
Potencia eléctrica disipada por la lámina de cobre	P <sub>i</sub>	W	70,11	70,19	69,92	69,87	70,08
Potencia absorbida por el agua	P <sub>f</sub>	W	67,82	69,15	65,87	65,11	66,62
Balance energético	B <sub>E</sub> =P <sub>i</sub> -P <sub>f</sub>	W	2,29	1,04	4,05	4,76	3,45
		%	3,27	1,48	5,79	6,81	4,92

Tabla 4.3. Datos característicos de las secuencias de recogida de datos validadas.

# Capítulo 5

## Simulación térmica

---

---

En este capítulo se realizan una serie de simulaciones por medio del sistema de cálculo numérico por volúmenes finitos. El fin de este análisis es determinar el coeficiente de convección / número de Nusselt medio hacia el fluido (agua) de las geometrías de estudio.

### 5.1. DEFINICIÓN DEL SISTEMA

En el sistema de aprovechamiento térmico se fijan dos dimensiones de diseño (ver figura 5.1), que son la longitud del tubo ( $L$ ) y su anchura ( $W_c+2W$ ). Siendo estas respectivamente 1 m y 1cm. La anchura coincide con la de la célula fotovoltaica a utilizar en la fase experimental. Como ya se ha comentado con anterioridad los parámetros de diseño se pueden generalizar a cualquier tamaño de geometría conservando las proporciones. De todas formas, un objetivo implícito es hallar resultados que no dependan de la longitud, diámetro..., o sea, que sean adimensionales.

La dimensión que queda libre es la altura de la sección del tubo rectangular, considerándose tres alturas diferentes.

Relación de aspecto, $\alpha$ ( $H_c/W_c$ )	H (mm)	H <sub>c</sub> (mm)	W (mm)	W <sub>c</sub> (mm)	L (m)
1	15	7	15	7	1
2,43	15	17	15	7	1
3,86	15	27	15	7	1

Tabla 5.1. Características geométricas del disipador.

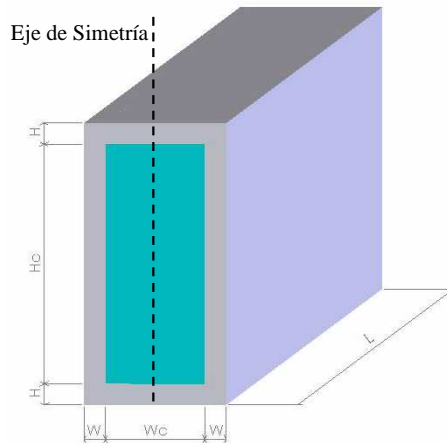


Figura 5.1. Esquema del dissipador.

Dentro de los paquetes de software comerciales existentes, como son Fluent, CFX, CFTurbo, Comsol..., se ha escogido el Fluent, ya que se trata de uno de los software de referencia mundial en el ámbito del CFD.

El programa que se utiliza para realizar el preproceso es el Gambit versión 2 y para el procesado y postprocesado el Fluent versión 6.1, ambos de la empresa norteamericana Fluent Inc.

El preproceso es una de las partes más importantes de la simulación. Sus operaciones principales se pueden enumerar como:

1. Creación de la malla.
2. Aplicación de las condiciones de contorno.
3. Validar y exportar la malla a Fluent.
4. Importación y validación de la malla.
5. Selección del solver (segregado/acoplado, transitorio/estacionario...).
6. Ecuaciones a solucionar (laminar/turbulento, ecuación de la energía...).
7. Especificación de las condiciones de operación (propiedades de los materiales, dirección en la que actúa la gravedad...).
8. Especificación de las condiciones de contorno (predefinidas en Gambit).
9. Especificación de las propiedades numéricas (factores de relajación...).
10. Iniciación de las variables.

Las tres primeras operaciones se realizan en el Gambit, tras exportarse la malla en formato .msh se abre el archivo con Fluent, donde se vuelve a validar y se realizan el resto las operaciones comentadas.

Una vez inicializadas las variables, se resuelve la simulación planteada. Con los resultados obtenidos se empieza el post proceso, donde se pueden generar representaciones de la distribución de presiones, de velocidad, de temperatura, densidad, líneas de corriente, gráficos de las variables, exportar variables, resumir valores de las variables implicadas en la simulación...

## 5.2. CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno se clasifican en cuatro tipos:

### 1. Condición de Dirichlet: Temperatura conocida en la superficie( $T_{conocida}$ ).

Se pueden dar dos casos:

- a) Se conoce la temperatura de la superficie de la malla.
- b) Se conoce la temperatura del medio exterior y se supone que es la misma (resistencia térmica entre ambos medios despreciable)

Este es el caso más simple, pues se puede considerar que, en los nodos extremos:

$$T = T_{conocida}$$

### 2. Condición de Neumann: Flujo de calor incidente conocido ( $\frac{q_{conocido}}{A}$ ).

En este caso, para hallar la temperatura en los nodos extremos se deberá resolver el balance de energía:

$$\rho C_p (T - T_o) = \frac{q_{conocido}}{A} \Delta t \quad (5.1)$$

### 3. Coeficiente de convección conocido ( $h_{conocido}$ ).

Al igual que en el caso anterior, se deberá resolver el balance de energía que en este caso es:

$$\rho C_p (T - T_o) = h_{conocido} \Delta t (T_\infty - T) \quad (5.2)$$

4. Superficie exterior aislante ( $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ ).

Este es un caso particular de la condición de Neumann.

Si  $T_w$  representa la temperatura en la frontera y  $T_{in}$  la temperatura en el nodo interior más próximo a la frontera, al desarrollar dicha ecuación se obtiene:

$$\frac{T_w - T_{in}}{\Delta x} = 0 \quad (5.3)$$

$$T_w = T_{in}$$

Se puede añadir el caso de flujo térmicamente desarrollado, donde  $\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0$ , pero, a efectos prácticos, es como el caso de pared aislada donde la temperatura en el nodo frontera es la misma que la del nodo interior.

Para la corrección de presiones ( $P'$ ), en cada nueva iteración temporal se inicializará a cero. Los valores en los nodos frontera se fijan en cero.

Para la velocidad se pueden tener distintos casos:

- a) Velocidad conocida.
- b) Flujo hidrodinámico localmente desarrollado.
- c) Contacto con una superficie sólida, en este caso la componente de la velocidad normal a la superficie es nula debido al impedimento físico que supone la superficie, del mismo modo la componente tangencial es nula debido a las fuerzas de fricción.

Las condiciones de contorno en el caso de estudio son:

En la pared superior se aplica una condición de contorno (Neumann) de flujo de calor ( $q''$ ) de  $10000 \text{ W/m}^2$  ( $7000 \text{ W/m}^2$ )<sup>1</sup>, que representa el calor por unidad de superficie que transmiten las células por su envés.

---

<sup>1</sup> Flujo de calor que se impone para la validación del modelo numérico con el experimento.

En el resto de paredes se fija la condición de contorno de superficies adiabáticas, suponiéndose que el aislamiento es lo suficientemente adecuado para que el calor que se pierde hacia el exterior sea insignificante.

Finalmente, en las superficies que representan la entrada y salida del fluido, las condiciones de contorno que se aplican es velocidad de entrada impuesta y salida de flujo libre respectivamente. En la condición de velocidad de entrada (Velocity inlet) se impone una temperatura. Se ha tomado la temperatura por defecto del software que es de 300K, y en las situaciones de validación del modelo numérico se ha impuesto la temperatura medida del agua a la entrada del canal en la fase experimental.

Al observar estas características se puede establecer un eje de simetría vertical (ver figura 5.1) en la mitad del tubo. Tomando una de las mitades se modela el sistema (ver figura 5.5).

### 5.3. ECUACIONES DE GOBIERNO

En el caso de circulación de fluidos en tubos con secciones circulares y no circulares, se aplica la teoría clásica que describe el momento y el transporte de energía (Rohsenow, 1998). De este modo la simulación numérica se realiza en el marco de las ecuaciones de Navier-Stokes.

En la simulación se hacen las asunciones siguientes:

1. Régimen estacionario.
2. Medio continuo.
3. Material homogéneo e isotrópico.
4. Fluido incompresible.
5. Flujo laminar.
6. Radiación negligible.
7. Disipación viscosa de la energía despreciable.

Bajo estas condiciones las ecuaciones de gobierno son:

Continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5.4)$$

Navier-Stokes:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \nabla (k_p \nabla \vec{v}) + 2\nabla (\mu \vec{\omega}) + \rho \vec{b} \quad (5.5)$$



Energía:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla(\rho u \mathbf{v}) = -p(\nabla \mathbf{v}) - \nabla \bar{q} \quad (5.6)$$

Ecuación calórica de estado:

$$u = u(\rho, T) \quad (5.7)$$

Ecuación cinética de estado:

$$F(\rho, p, T) = 0 \quad (5.8)$$

Ley constitutiva termomecánica (Ley de viscosidad de Stokes):

$$\bar{\sigma} = -p\bar{\delta} + kTr(\bar{d})\bar{\delta} + 2\mu\bar{d} \quad (5.9)$$

Ley constitutiva de conducción de calor (Ley de Fourier):

$$\bar{q} = -\bar{k}\nabla T \quad (5.10)$$

## 5.4. MALLA

Las mallas a construir se pueden clasificar según la siguiente tipología:

**Mallas estructuradas:** en todo el dominio cada nodo tiene un número constante de nodos vecinos. El sistema de ecuaciones discreto que se obtiene se caracteriza por una estructura matricial condensada y, en consecuencia, se pueden utilizar algoritmos más eficientes y con menores recursos computacionales.

**Ortogonales:** todos los volúmenes de control que forman el dominio tienen la misma forma lo que ofrece una mayor simplicidad de programación. Además, los flujos son normales a las caras de los volúmenes de control de manera que se puede trabajar mejor con ellos y resulta más fácil su interpretación.

En función del dominio de estudio las mallas estructuradas ortogonales pueden ser cartesianas, cilíndricas o esféricas.

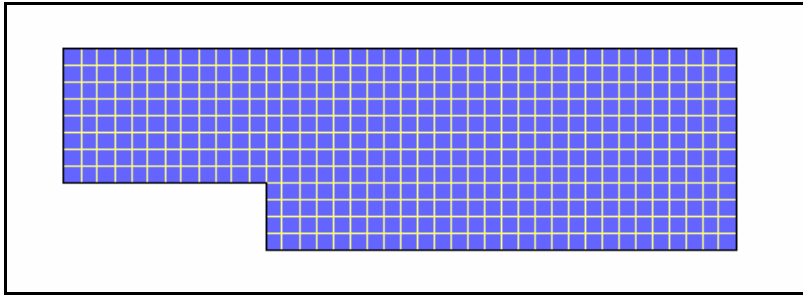


Figura 5.2. Discretización con malla estructurada ortogonal.

Esta discretización resulta de gran utilidad en casos geoméricamente sencillos.

No ortogonales: las mallas se adaptan al contorno de la geometría a estudiar de tal forma que los volúmenes de control tienen caras rectas aunque no tienen porque formar ángulo de  $90^\circ$  entre ellas.

También es posible realizar intensificaciones locales en aquellas zonas en que sea necesario, como por ejemplo resolver casos con flujo en régimen turbulento (figura 5.3).

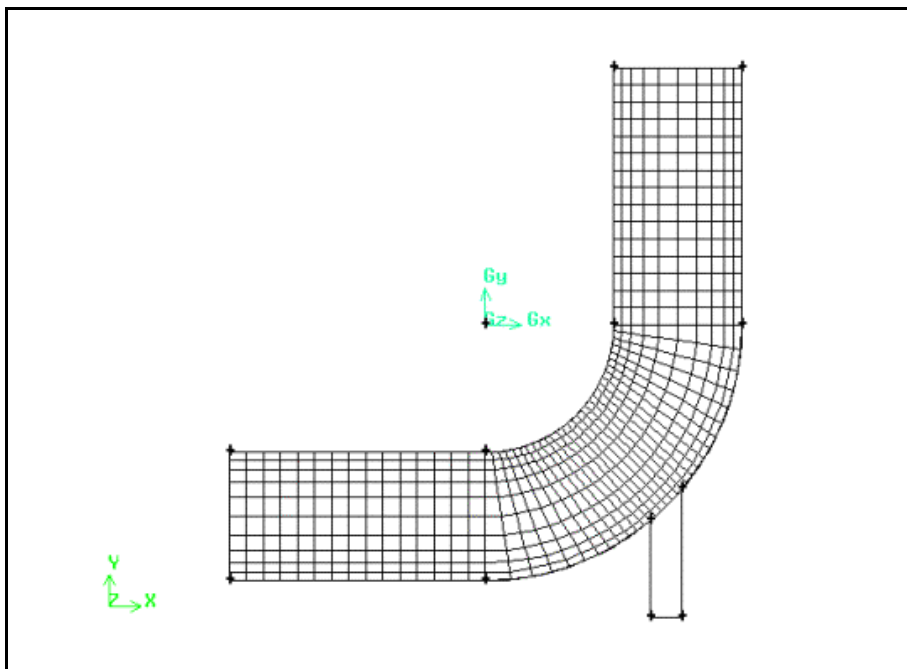


Figura 5.3. Malla estructurada no ortogonal.

**Mallas no estructuradas:** los volúmenes de control en que se divide el dominio no tienen un número constante de nodos vecinos. Este tipo de mallado tiene una mayor flexibilidad en la discretización de dominios complejos y permite realizar intensificaciones locales en esas zonas donde el gradiente de las variables sea mayor. En la figura 5.4 se muestra un dominio discretizado con malla no estructurada.

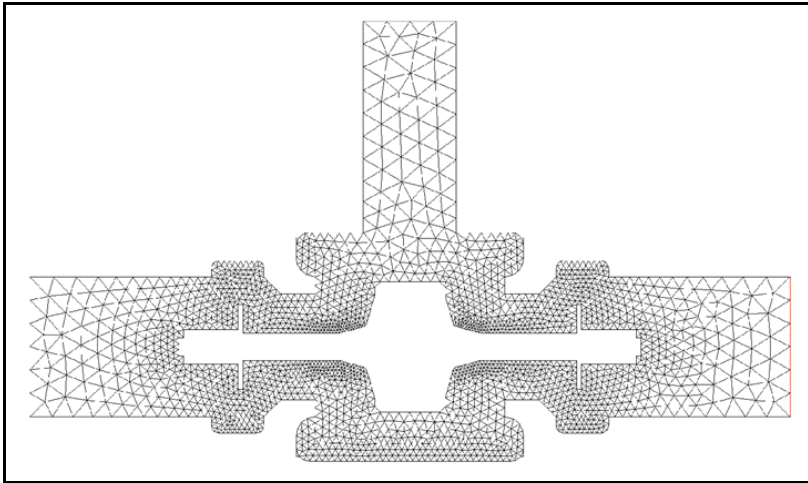


Figura 5.4. Malla no estructurada.

La malla que se utiliza es una malla estructurada ortogonal, cuyas características son:

- 1217115 celdas.
- 1303696 nodos.
- 3738583 caras.

La geometría tiene dos direcciones principales de mallado: en la sección transversal y en la sección longitudinal.

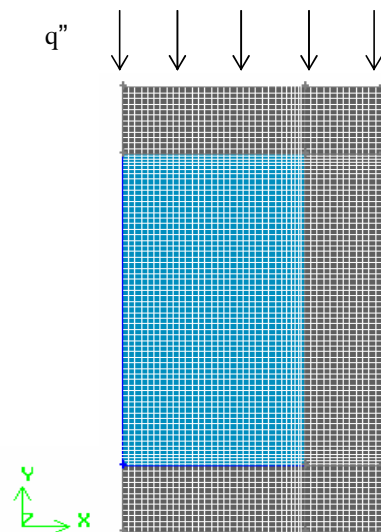


Figura 5.5. Malla sistema

En la sección transversal, tal y como se aprecia en la figura 5.5, los elementos de la malla son de tamaño reducido. En el sólido hay más de 10 elementos para un espesor de 1,5mm. En las zonas de las esquinas del interior del tubo se ha realizado un refinado de la malla.

La sección longitudinal, en comparación con la transversal es más de 20 veces superior (en función de la relación de aspecto). Por lo que los elementos de la malla son también más de 20 veces mayores en esta dirección (en función de  $\alpha$ ).

En la construcción de la malla para todos los casos se ha tenido en cuenta la inclinación angular (*equiangle skew*), que permite evaluar el grado de deformación de los volúmenes finitos creados. Siguiendo las instrucciones del manual de Fluent (2001), se ha mantenido siempre por debajo de 0,6 (al tratarse de una malla perfectamente estructurada este valor es el mínimo).

## 5.5. CONVERGENCIA DEL CASO A SIMULAR

Una vez creada la malla y definidos los materiales, condiciones de contorno...se resuelve el caso.

La condición de error que se ha impuesto para la convergencia es de:

- Error ecuación de la continuidad:  $1.10^{-4}$
- Error ecuación de la velocidad en x:  $1.10^{-4}$
- Error ecuación de la velocidad en y:  $1.10^{-4}$
- Error ecuación de la velocidad en z:  $1.10^{-4}$
- Error ecuación de la energía:  $1.10^{-6}$

## 5.6. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Realizando simulaciones previas y teniéndose en consideración la facilidad de aprovisionamiento...se ha considerado que la relación de aspecto que, por sus dimensiones y prestaciones térmicas, responde de un modo más satisfactorio como disipador de las células fotovoltaicas es 2,43.

Las relaciones de aspecto existentes en tubos comerciales de aluminio con sección rectangular son 1, 2,43, 3,86. Es conocido empíricamente, tal y como se indicará posteriormente, que para mayor relación de aspecto el número de Nussel medio

es mayor (mejor intercambio térmico con el fluido que circule por su interior). Por contra, una relación de aspecto elevada, implica que la altura del tubo cada vez es mayor con respecto a la anchura (por ejemplo en el caso de  $\alpha = 3,86$  la altura exterior del tubo son 3 cm, frente a 1 cm de anchura), dificultando considerablemente aspectos mecánicos como las conexiones hidráulicas, etc. Un hecho que es necesario mencionar es que los principales fabricantes de perfiles de aluminio, además del tubo con sección cuadrada, sólo fabrican tubos con relaciones de altura exterior / anchura de 2. Atendiendo a los argumentos expuestos el tubo de aluminio seleccionado como disipador térmico es el de relación de aspecto 2,43.

Como se ha indicado en el capítulo del desarrollo experimental se han realizado diferentes experimentos sobre el conducto rectangular con  $\alpha = 2,43$  para diferentes números de Reynolds.

La validación se realiza comparando las temperaturas medidas en el experimento con las calculadas en las simulaciones.

Se muestran la comparación de temperaturas para las dos situaciones extremas de entre las simuladas, que son para los regímenes de flujo con  $Re = 125$  y  $Re = 1000$ .

Re = 125

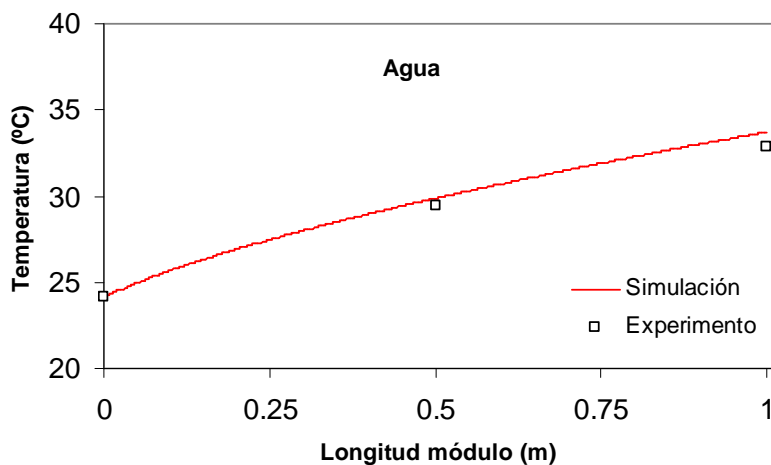


Figura 5.6. Evolución de la temperatura longitudinal del agua,  $Re = 125$ .

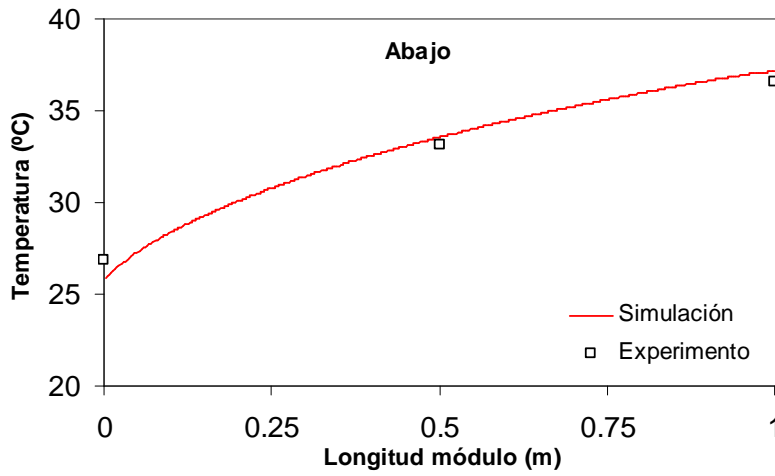


Figura 5.7. Evolución de la temperatura en la pared inferior tubo,  $Re = 125$ .

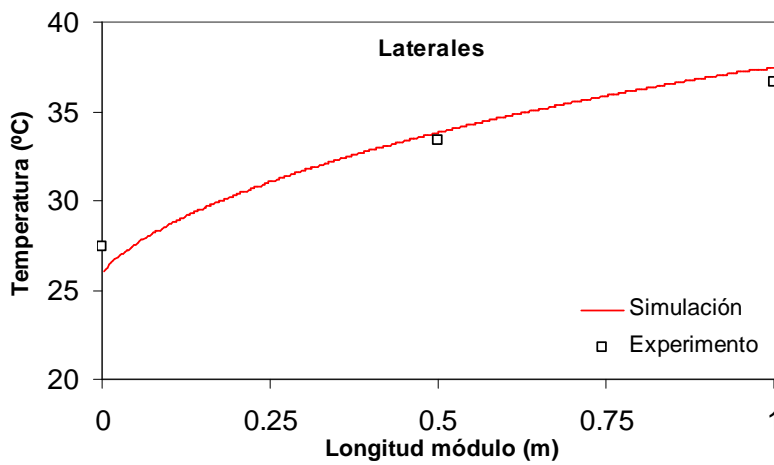


Figura 5.8. Evolución de la temperatura en las paredes laterales tubo,  $Re = 125$ .

Re = 1000

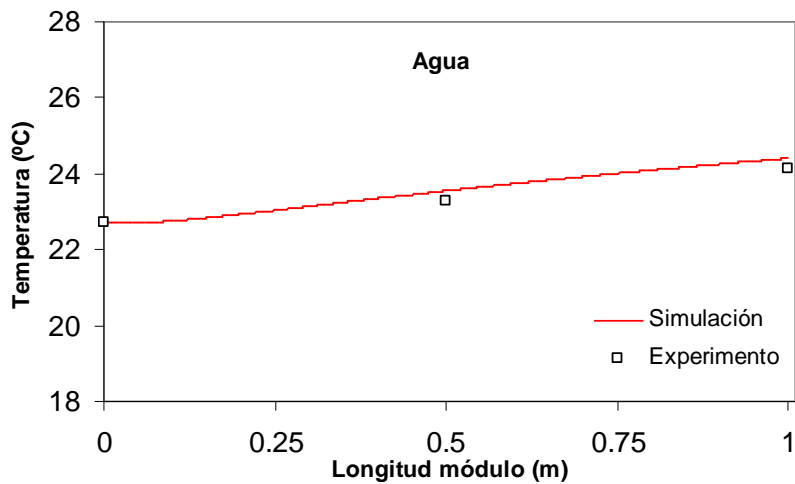


Figura 5.9. Evolución de la temperatura longitudinal del agua, Re = 1000.

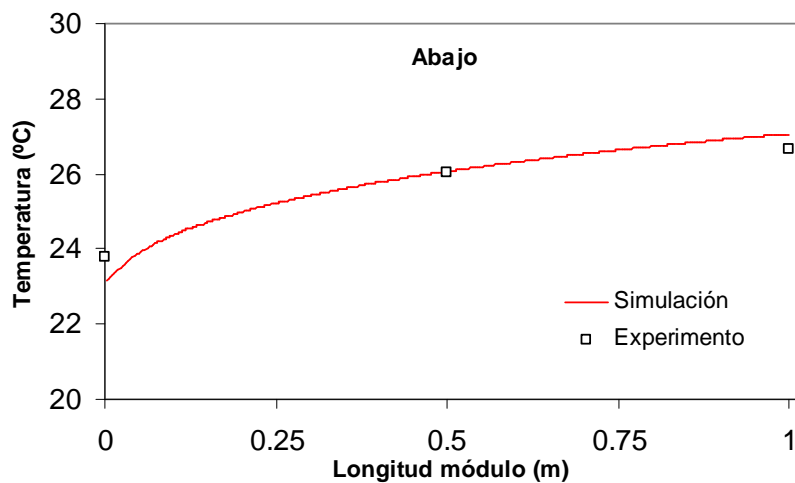


Figura 5.10. Evolución de la temperatura en la pared inferior tubo, Re = 1000.

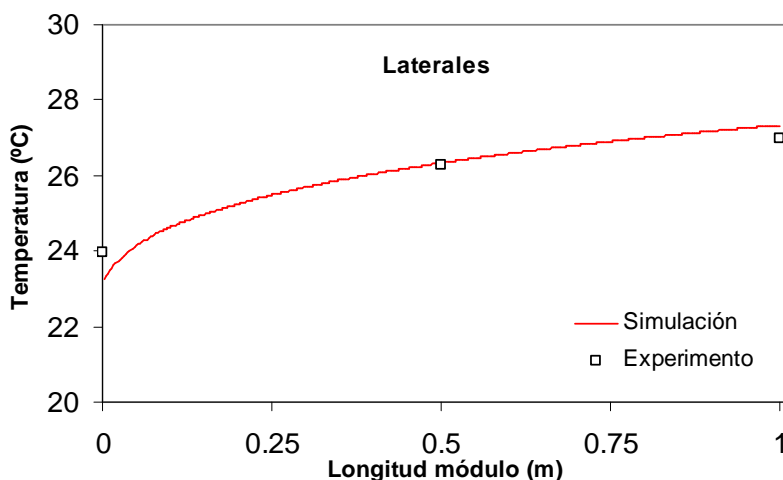


Figura 5.11. Evolución de la temperatura en las paredes laterales tubo,  $Re = 1000$ .

Los resultados numéricos se ajustan globalmente muy bien a los resultados experimentales.

En las temperaturas medidas en las paredes lateral e inferior en la zona de la entrada se observa una pequeña diferencia positiva con respecto a las temperaturas medidas experimentalmente. Esta tendencia se ha reproducido en la totalidad de los experimentos realizados. El motivo de esta tendencia es que la conexión en la entrada del canal del circuito hidráulico está desplazada unos centímetros respecto a la posición de la primera fila de termopares. Lo que sucede es que esta distancia es suficiente como para que el flujo en la zona del termopar para los Reynolds de trabajo esté completamente desarrollado. El intercambio que se produce en la región de la longitud de entrada es el que se capta en las simulaciones realizadas y hace divergir los datos experimentales con respecto a los cálculos numéricos.

Realizando la regresión que correlaciona el ajuste entre los datos experimentales y los resultados numéricos, para la recta que pasa por el origen de coordenadas, resulta la ecuación  $y = 1,0043x$ , siendo la pendiente prácticamente igual a 1. Además el coeficiente de determinación de la línea de tendencia con respecto a los puntos es mayor que 0,98.



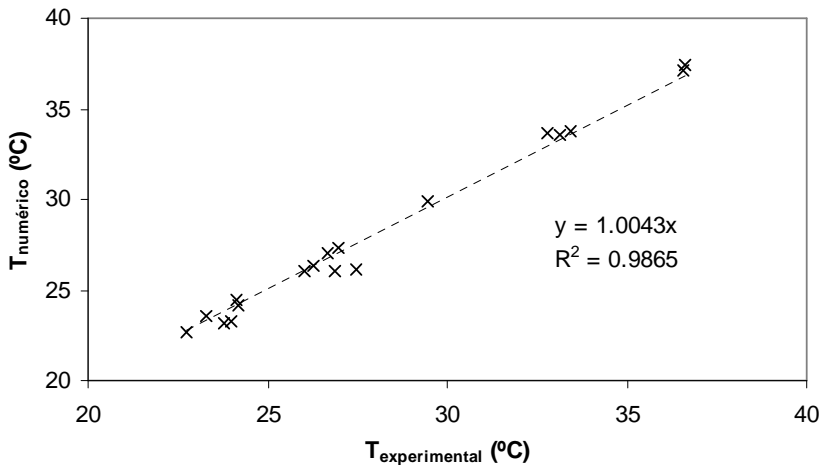


Figura 5.12. Correlación entre los resultados numéricos y experimentales.

Apreciándose que el modelo numérico se ajusta a los datos experimentales con una buena precisión, se considera éste por validado. A partir de aquí se van a mostrar una serie de resultados en función de diferentes parámetros y su variabilidad en el apartado que se denomina estudio de sensibilidad.

## 5.7. ESTUDIO DE SENSIBILIDAD

La validación se ha realizado para un flujo térmico, como se ha indicado en la definición de las condiciones de contorno, de  $7000 \text{ W/m}^2$ . Al tratarse de un caso con régimen laminar y flujo establecido, la validación del modelo se puede extender para otros flujos térmicos de valores que no sean de gran diferencia. Al realizar la fase experimental y conectar la fuente de intensidad a potencias mayores que  $75 \text{ W}$  se producían perturbaciones en el sistema informático que hacían peligrar la correcta colección y adquisición de los datos.

Una vez validado el modelo numérico, los análisis que se llevan a cabo se realizan con la potencia de referencia de  $100\text{W}$ , siendo ésta un valor intuitivamente más sencillo de tratar. Es decir, a la hora de extrapolar, aplicar factores de efectividad óptica, efectividad eléctrica de las células, etc. siempre es más sencillo trabajar con potencias de  $10$ .

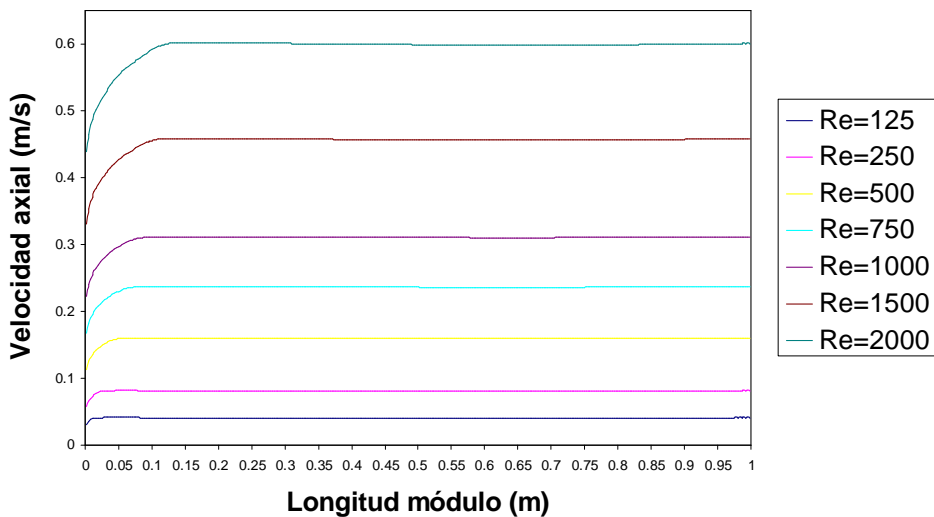
Dentro del apartado se analizan distintas variables determinantes en la caracterización del disipador. La primera de ellas es la velocidad del fluido en el interior del tubo.

### 5.7.1. VELOCIDAD DEL FLUIDO

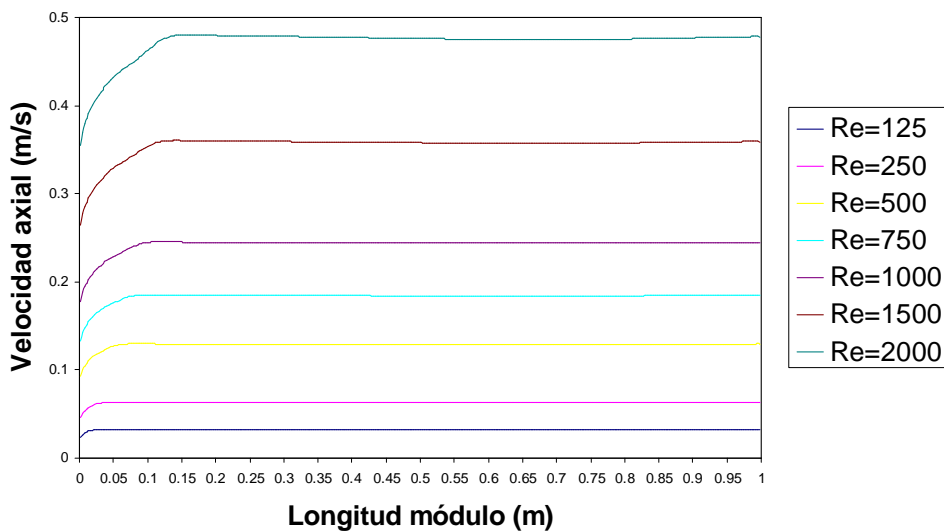
Es importante conocer a que distancia de la entrada del tubo el sistema se encuentra en flujo desarrollado, o sea, con coeficientes de transferencia de calor constantes. Para determinarlo se grafica la evolución de la velocidad axial a lo largo del tubo. La longitud de entrada ( $X_e$ ) se define como el punto a partir del cual el perfil de velocidades no varía.

Analizando los resultados que se obtienen de las simulaciones para las relaciones de aspecto 1, 2,43 y 3,86 (ver figura 5.13), se observa que los tres gráficos tienen un comportamiento prácticamente idéntico en su eje de abscisas (longitud del módulo). En el eje de ordenadas tenemos un factor de escala en la velocidad debido a la influencia de la relación de aspecto (a mayor diámetro, para igual Reynolds, menor velocidad).

a) Relación de aspecto = 1.



b) Relación de aspecto = 2,43



c) Relación de aspecto = 3,86

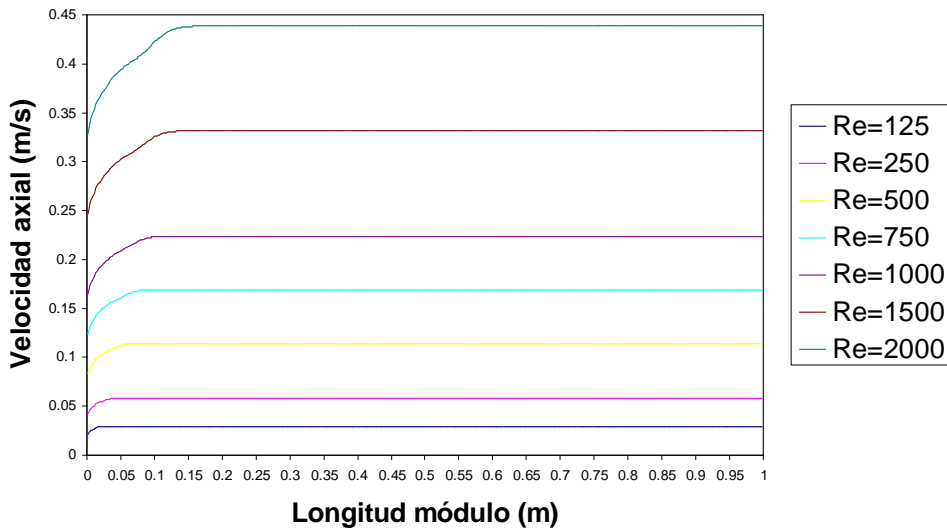


Figura 5.13. Velocidad axial para diferentes relaciones de aspecto.

Representando las diferentes  $X_e$  en función del Reynolds se pueden generalizar obteniéndose unas correlaciones. Se ajustan dos ecuaciones:

- 1) La primera de las ecuaciones relaciona linealmente la longitud de entrada con el número de Reynolds.

$$X_e = 6.10^{-5} \text{ Re} + 0.0267 \quad (5.11)$$

En régimen laminar ( $\text{Re} \leq 2300$ ), y para un tubo con secciones rectangulares de diferentes relaciones de aspecto, la longitud de entrada depende linealmente del  $\text{Re}$  y con un crecimiento positivo de pequeña variación (pendiente con orden de magnitud  $10^{-5}$ ).

La regresión lineal explica la tendencia de los puntos con una precisión del 95,29%, este es un valor que se considera aceptable en la descripción de la variación de las variables.

En este caso se puede remarcar que  $X_e$  crece linealmente con la velocidad y con el diámetro hidráulico, ya que estos dos parámetros aparecen en el numerador de la expresión del número de Reynolds.

- 2) Intentando mejorar el coeficiente de determinación se ajustan los puntos obtenidos a una regresión con función potencial, obteniéndose un  $R^2$  del 99,1%.

$$X_e = 13.10^{-4} \text{ Re}^{0.6067} \quad (5.12)$$

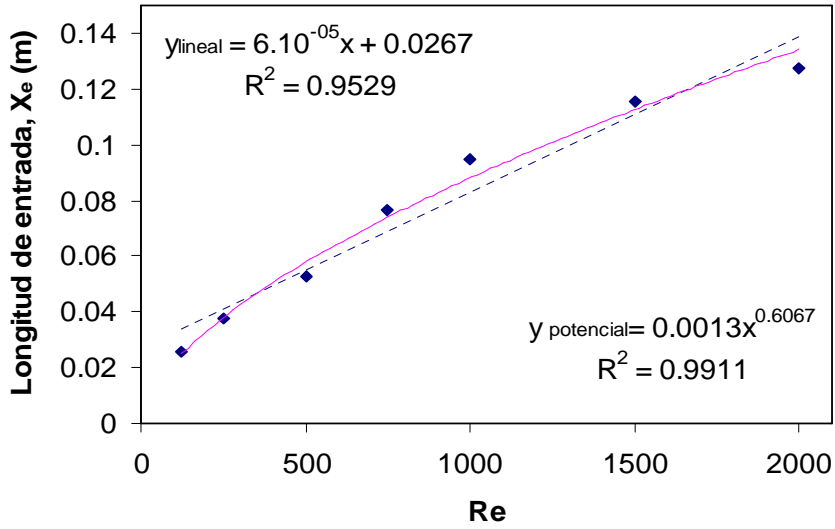


Figura 5.14. Longitud de entrada en función del Reynolds.

A modo de imágenes que describan este comportamiento a la entrada del tubo:

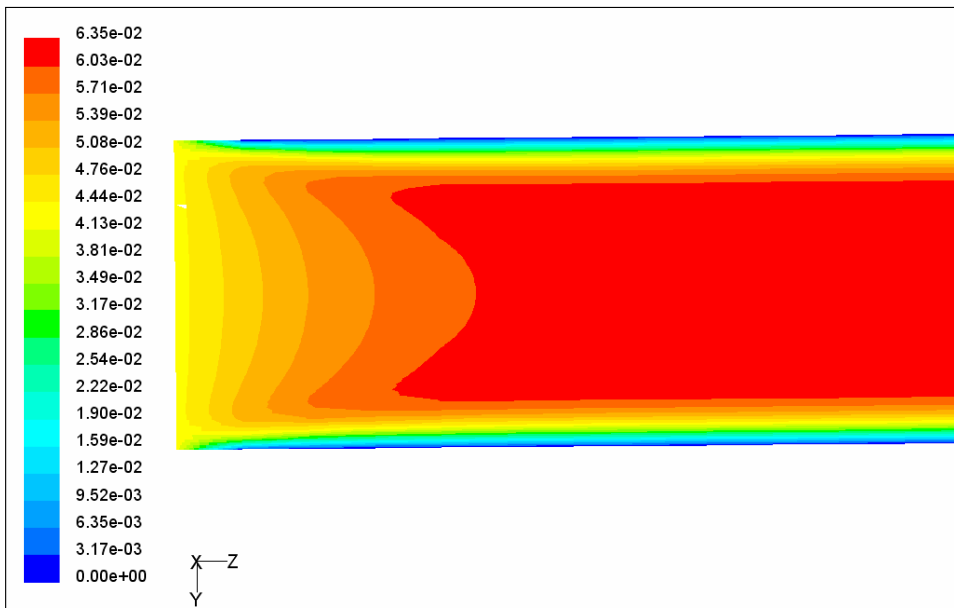


Figura 5.15. Contorno de velocidades en la entrada del tubo.

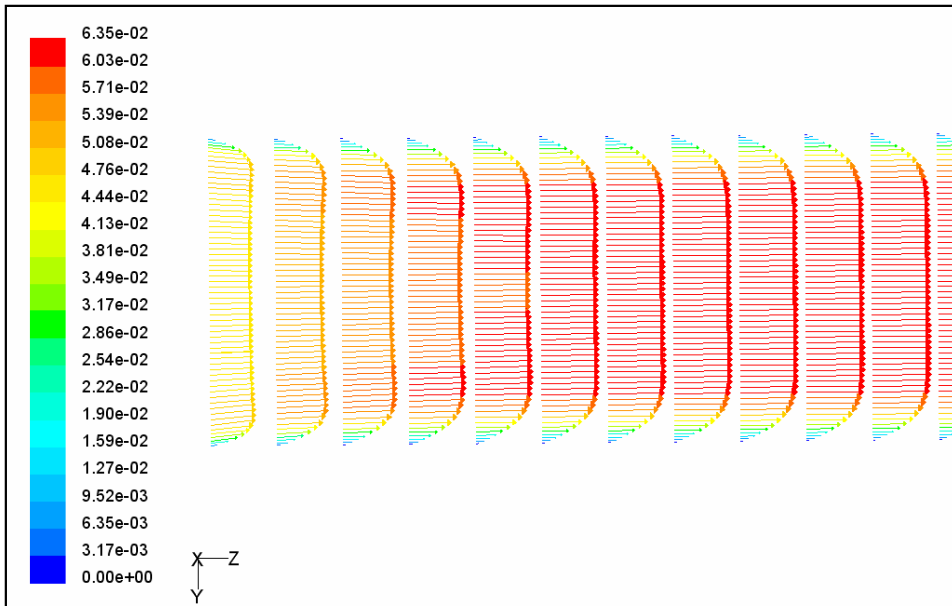


Figura 5.16. Vectores de velocidad en la entrada del tubo.

En las figuras 4.15 y 4.16 se muestra la evolución de la velocidad en la entrada del tubo mediante la representación de contorno y de vectores en la sección longitudinal del tubo. Se aprecia como se va formando la parábola del campo de velocidades, en el cual la velocidad es máxima en la zona central y nula es los extremos (junto a las paredes).

Se clarifica la simetría anteriormente mencionada si vemos en diferentes cortes transversales la misma evolución de la velocidad:

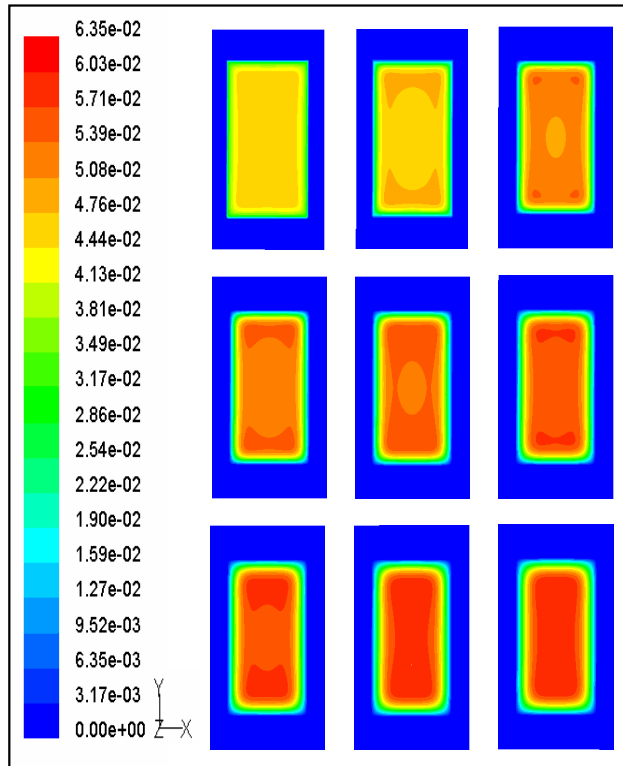


Figura 5.17. Contorno de velocidades (m/s) sección transversal. Z: 0,001, 0,002, 0,004, 0,006, 0,0080, 0,01, 0,012, 0,014, 0,016.

## 5.7.2. TEMPERATURA

La temperatura es un parámetro que en los sistemas híbridos de concentración adquiere una gran importancia. Por un lado es importante el calentamiento del fluido, ya que mediante éste se obtiene la energía térmica, pero, por otro lado, si las células alcanzan una temperatura elevada su rendimiento decrece.

Como ejemplo ilustrativo se muestra una imagen correspondiente a la geometría con relación de aspecto 2,43 y con un  $Re = 250$ . (Se toma este valor de Reynolds ya que el salto térmico se aproxima al requerido para el sistema como colector térmico,  $\Delta T \approx 7^\circ\text{C}$ ).

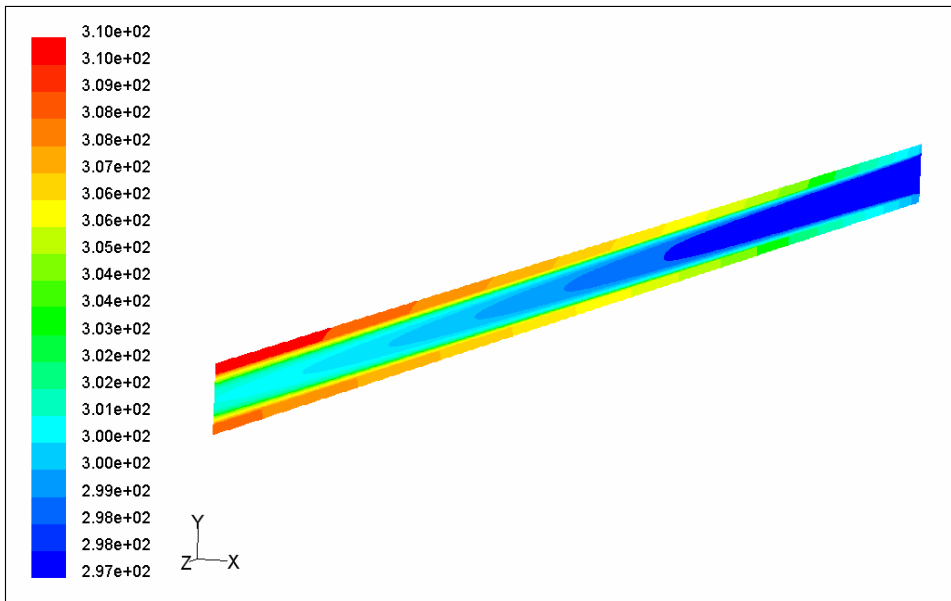


Figura 5.18. Contorno de temperaturas (K) en la sección longitudinal en el centro del módulo.

La temperatura a la que entra el fluido es de 297,01 K, y este se calienta hasta 303,99K, con una temperatura media del agua de 300,99 K (temperaturas obtenidas a través de reportes de Fluent).

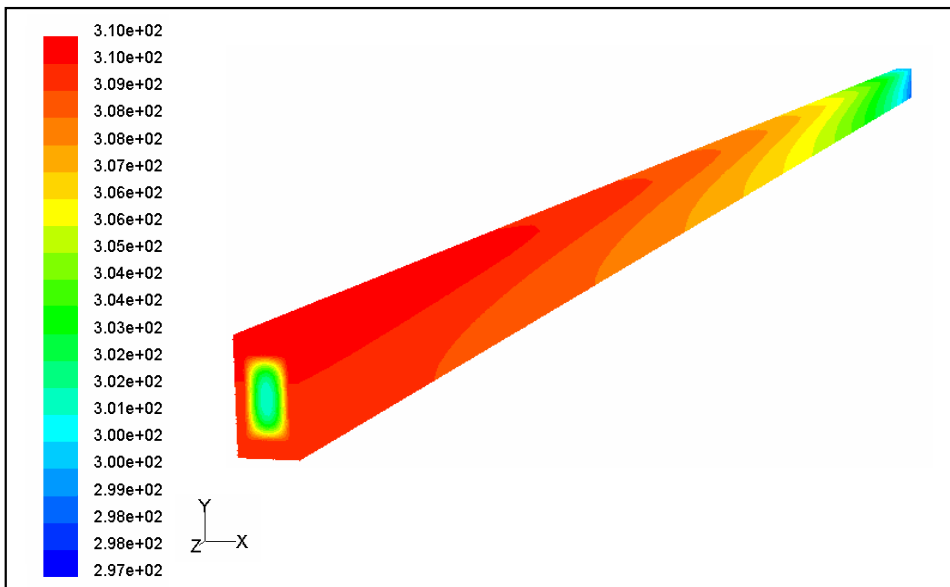


Figura 5.19. Contornos de temperatura (K) del conjunto del sistema.



El sólido, carcasa, se calienta en la misma dirección que el agua, pero con un desfase. Este desfase térmico existe tanto con respecto al fluido como entre las diferentes paredes que constituyen el tubo (ver fig. 5.19).

De igual modo se clarifica las diferentes temperaturas y la forma de calentamiento del sistema tomando tres secciones transversales: al inicio, en el centro y al final.

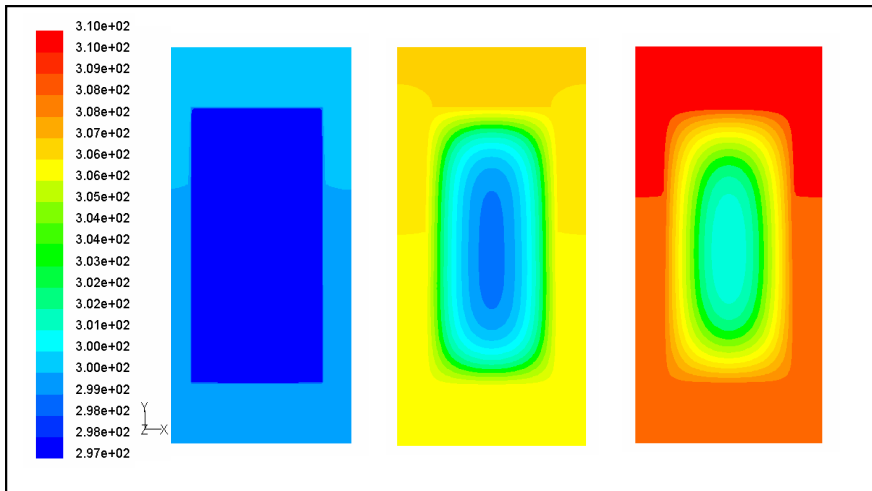


Figura 5.20. Temperatura (K) en la sección transversal para  $Z= 0,001, 0,5, 0,999$ .

En las diferentes paredes del tubo la temperatura cuantitativamente se incrementa con idéntica tendencia. Con una diferencia media de temperatura de  $1,31\text{ }^{\circ}\text{C}$  entre la pared superior e inferior,  $0,86\text{ }^{\circ}\text{C}$  entre la pared superior y las laterales y  $0,45\text{ }^{\circ}\text{C}$  entre los laterales y la pared inferior.

La figura 5.21 muestra las temperaturas medias de las paredes del canal y del fluido, las cuales se definen como:

$$T_{agua,media} = \frac{\int_A uTdA}{\int_A u dA} \quad (5.13)$$

y

$$T_{pared,media} = \frac{\int_{\Gamma} T d\Gamma}{\int_{\Gamma} d\Gamma} \quad (5.14)$$

Se demuestra un incremento lineal en la temperatura media del fluido, el cual es resultado natural del balance de energía bajo un flujo de calor uniforme. La diferencia de temperaturas entre las paredes del canal y el fluido es mínima en la región de entrada del canal, y gradualmente alcanza un valor que tiende a ser constante. Este efecto se produce de acuerdo a la evolución del número de Nusselt.

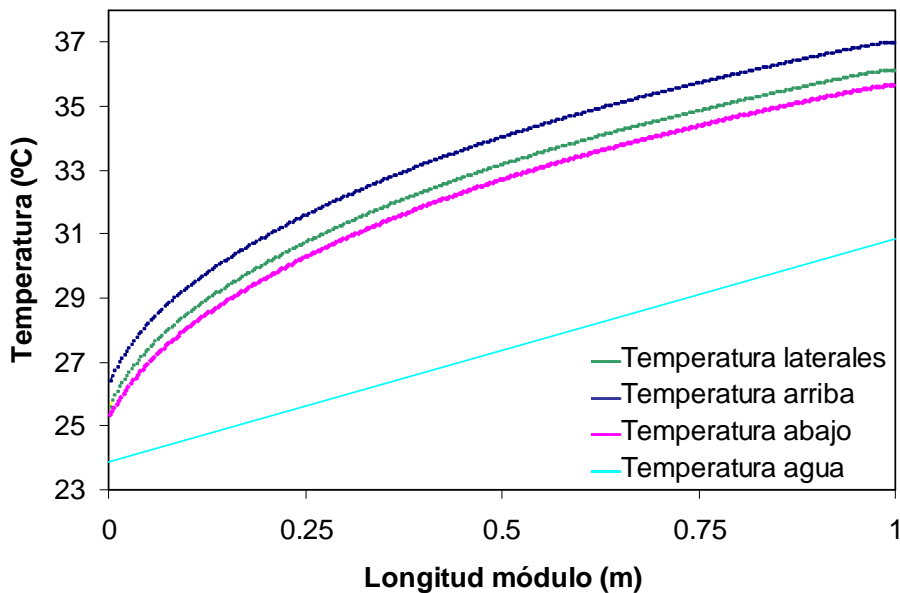


Figura 5.21. Temperaturas medias en el disipador.

A modo de resumen se introducen a continuación una serie de gráficos con los distintos valores medios de temperatura en función del Reynolds. (Entendiéndose que la pared superior está en contacto térmico con las células fotovoltaicas, por lo que se puede hacer la aproximación de que la temperatura de las células es  $\approx$  temperatura de la pared superior<sup>2</sup>).

<sup>2</sup> Realmente entre las células fotovoltaicas y el disipador se encuentra el aislante eléctrico. El material utilizado es kapton (ver capítulo análisis térmico), cuya conductividad térmica es baja. Sin embargo, este elemento tiene una resistencia térmica a la transferencia de calor reducida, dado que su espesor es del

### Temperatura media pared superior

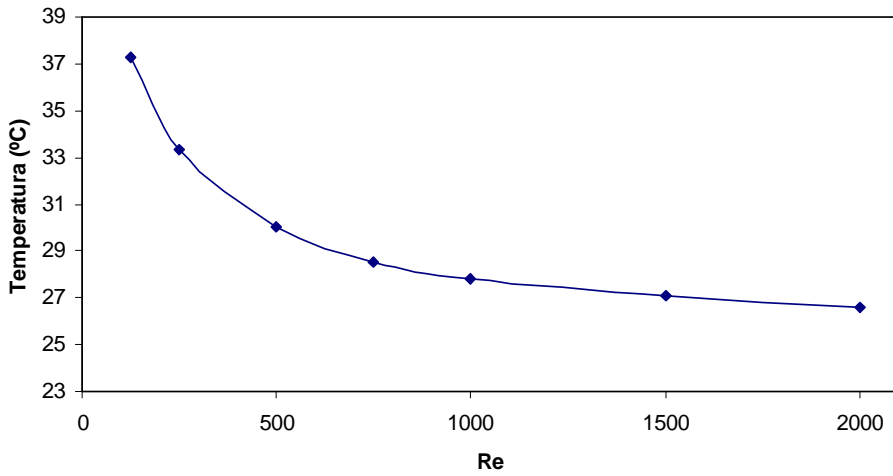


Figura 5.22. Temperaturas medias pared superior vs Re.

Para el resto de paredes del tubo, el comportamiento térmico sigue exactamente el mismo patrón que con la pared superior pero con temperaturas menores.

### Salto térmico del fluido

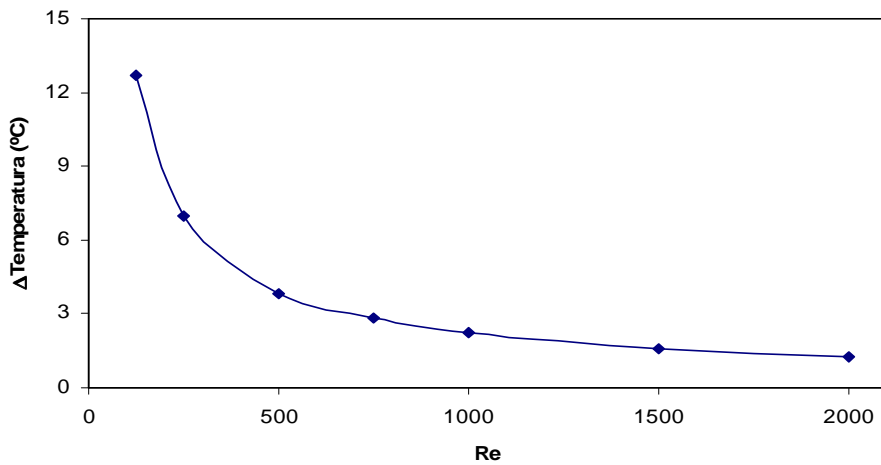


Figura 5.23. Salto térmico del fluido en función del Reynolds.

orden de micras. Al tener esta resistencia térmica un valor muy pequeño, la suposición de que se hace es correcta.

### 5.7.3. PRESIÓN

Desde un punto de vista técnico un parámetro importante es la caída de presión necesaria para mantener el flujo en el interior del conducto. Ya que este parámetro determina los requerimientos de potencia de bombeo. Para determinar la caída de presión, es conveniente trabajar con el factor de fricción de Moody (Incropera y De Witt, 1996), que se define como:

$$f \equiv \frac{-(dp/dx)D}{\rho V_m^2 / 2} \tag{5.15}$$

Transformando la ecuación en discreta se obtiene:

$$\Delta P = - \int_{p_1}^{p_2} dp = f \frac{\rho V_m^2}{2D} \int_{x_1}^{x_2} dx = f \frac{\rho V_m^2}{2D} (x_2 - x_1) \tag{5.16}$$

Empíricamente se conocen los factores de fricción para flujo laminar completamente desarrollado en tubos de diferente sección transversal.

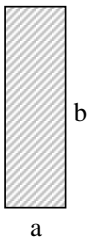
Sección transversal	b/a	$f Re_{D_h}$
	1	57
	1,43	59
	2	62
	3	69
	4	73
	8	82
	$\infty$	96

Tabla 5.2. Factor de fricción y Reynolds en función de la relación de aspecto.

En la definición del factor de fricción se ve que éste disminuye a medida que aumenta la velocidad, esta tendencia se ilustra representando  $f$  en función del Reynolds para tres relaciones de aspecto (los valores de  $f Re_{D_h}$  se han obtenido interpolando a partir de la tabla anterior y se han verificado con la ecuación propuesta por Shah, (Ec. 5.17)(Shah, 1978).

$$f Re = 96 \left( 1 - \frac{1.3553}{\alpha} + \frac{1.9467}{\alpha^2} - \frac{1.7012}{\alpha^3} + \frac{0.9564}{\alpha^4} - \frac{0.2537}{\alpha^5} \right) \quad (5.17)$$

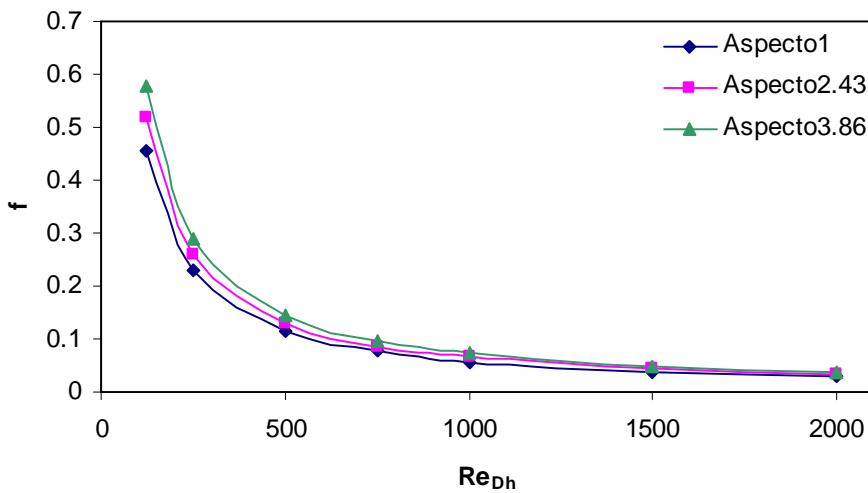


Figura 5.24. Factor de fricción vs Reynolds.

Para igual caudal o igual  $Re$ , en tubos con menor sección la velocidad de circulación del fluido será mayor. Por lo tanto el factor de fricción decrece al disminuir la sección del conducto. Sin embargo, la caída de presión aumenta proporcionalmente con la velocidad. En las simulaciones se obtiene que la presión varía en función de la relación de aspecto y del  $Re$  del siguiente modo:

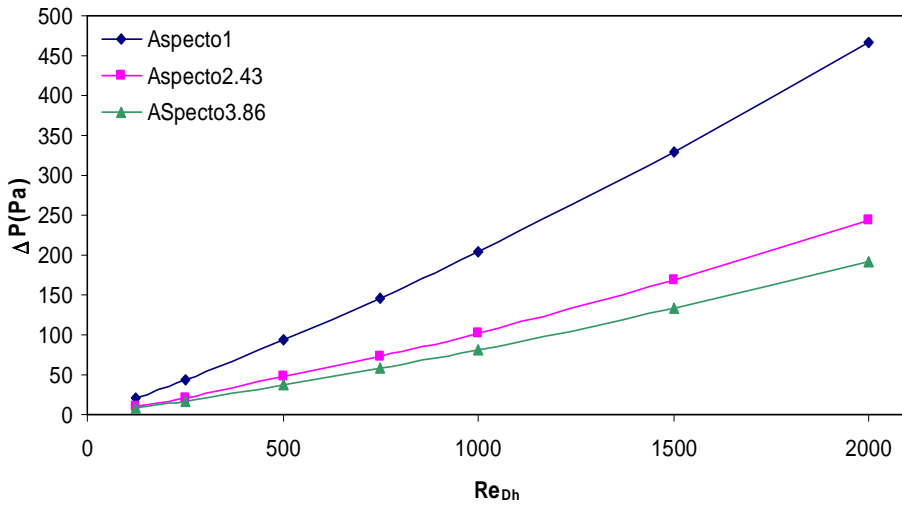


Figura 5.25. Caída de presión en el disipador vs Reynolds.

En el tubo que se experimenta, y para un  $Re = 250$  este efecto de disminución progresivo de la presión debido a las pérdidas de carga se corresponde con la siguiente imagen:

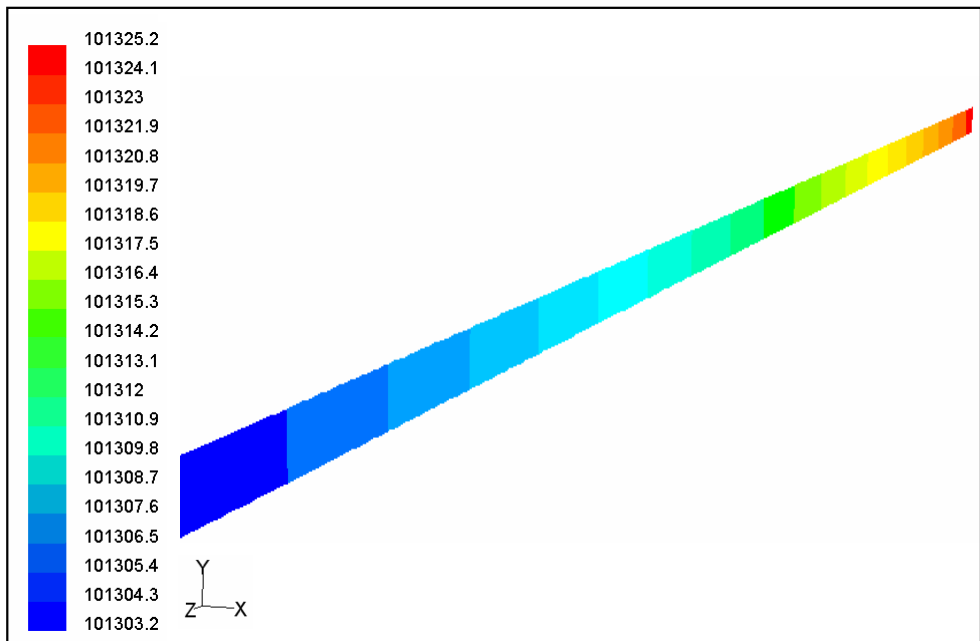


Figura 5.26. Caída de presión (Pa) en situación con  $\alpha = 2,43$  y  $Re = 250$ .

Conocida la caída de presión que se produce se puede determinar la potencia de bombeo:

$$Potencia_{bombeo} = \Delta PCaudal \quad (5.18)$$

Para las caídas de presión anteriores, las potencias de bombeo necesarias son:

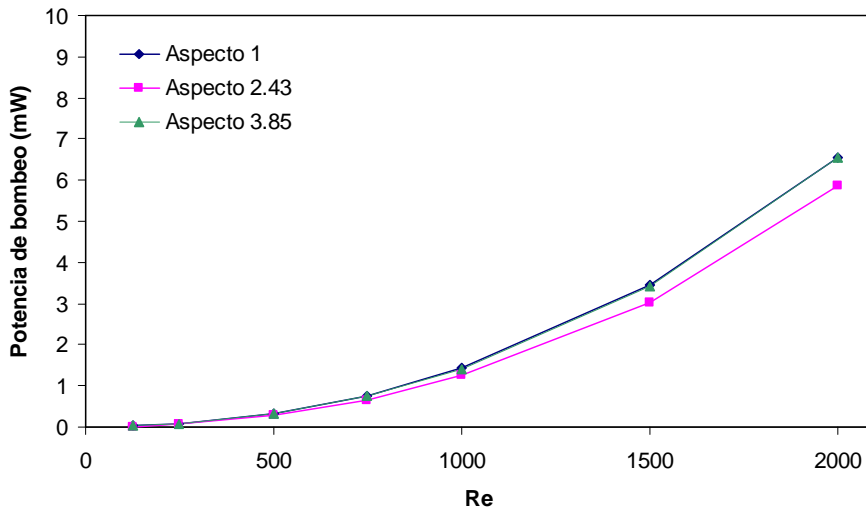


Figura 5.27. Potencia de bombeo en función del número de Reynolds.

Siendo las caídas de presión para las situaciones estudiadas siempre menores a 500 Pa y los caudales que circulan por el tubo del orden de  $10^{-7}$  a  $10^{-5}$ , las potencias de bombeo requeridas son mínimas (ver figura 5.27).

No considerando el efecto de la temperatura sobre la eficiencia de las células, la efectividad en la conversión eléctrica de las que se prevén utilizar es del 20% (ver apéndice A). Por lo tanto, para la superficie de células que se estudia ( $0,01\text{m}^2$ ) y con una irradiancia de  $15000\text{ W/m}^2$ , se obtiene que la potencia eléctrica que producen las células es 30 W.

Teniéndose en cuenta la potencia necesaria de bombeo y la potencia eléctrica de las células, se puede definir un parámetro que engloba ambas:

$$P_{\text{eléctrica neta}} = P_{\text{eléc,PV}} - P_{\text{eléc, bombeo}} \quad (5.19)$$

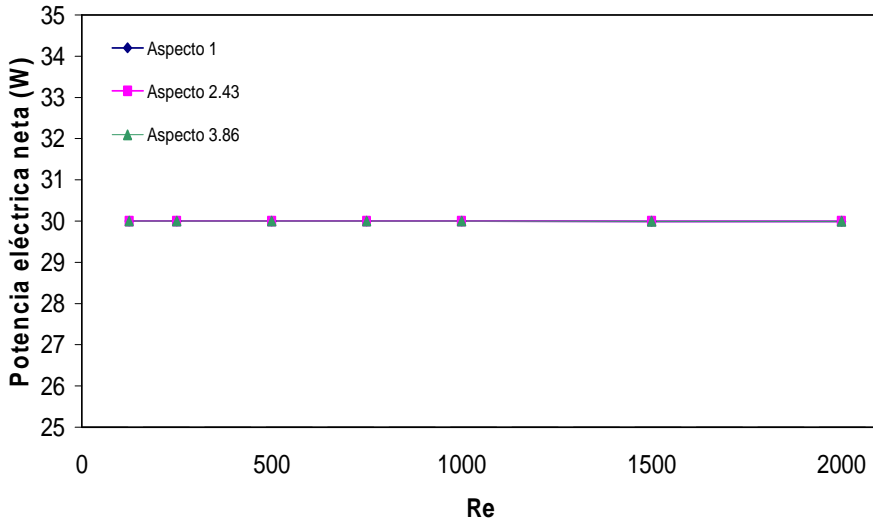


Figura 5.28. Potencia eléctrica neta en función del número de Reynolds.

Como se podía prever con los valores de potencia de bombeo necesaria y los de producción eléctrica de las células fotovoltaicas, la curva de potencia eléctrica neta es prácticamente, para todas las 3 relaciones de aspecto, una recta en  $y = 30$ . Esta recta presenta una muy ligera pendiente negativa para valores crecientes del número de Reynolds.

#### 5.7.4. COEFICIENTES DE INTERCAMBIO TÉRMICO

Como se ha comentado al inicio del capítulo, el objetivo final del mismo es la determinación del coeficiente de convección medio o el número de Nusselt medio (ver definiciones capítulo siguiente).

$$Nu_{Dh} = h_c D_h / k_{\text{fluido}} \quad (5.20)$$



Conociéndose los flujos de calor hacia el fluido, la temperatura de las paredes interiores del conducto que están en contacto con el fluido, y la temperatura de éste se puede hallar el número de Nusselt local como:

$$Nu_{Dh,local} = \frac{q'' D_h}{(T_{pared} - T_{fluido}) k_{fluido}} \quad (5.21)$$

El cálculo del Nusselt medio en la periferia del conducto se realiza siguiendo la expresión de Liu y Garimella (2003):

$$Nu_{z,medio} = \frac{1}{L_c} \int_0^{L_c} Nu_z dl \quad (5.22)$$

donde  $L_c$  es la anchura de cada pared y

$$Nu_{z,periferia} = \frac{(w_c Nu_{medio,abajo} + w_c Nu_{medio,arriba} + 2H_c Nu_{medio,laterales})}{2(w_c + H_c)} \quad (5.23)$$

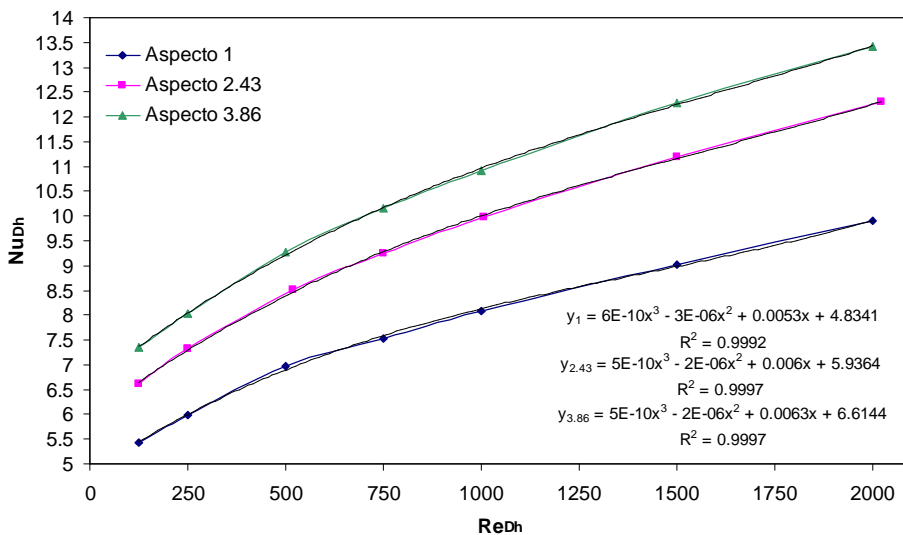


Figura 5.29. Correlación número de Nusselt en función del Reynolds.

Es importante tener en cuenta que en ocasiones la ecuación resultante de la correlación se presenta en un formato que enmascara los resultados verdaderos, ya que los decimales pueden ser determinantes. A continuación se muestran las correlaciones obtenidas anteriormente con una mayor precisión decimal y expresando las ecuaciones en función de los parámetros que intervienen:

$$Nu_{\alpha=1} = 5.99 \times 10^{-10} Re^3 - 2.56 \times 10^{-6} Re^2 + 5.26 \times 10^{-3} Re + 4.83 \quad (5.24)$$

$$Nu_{\alpha=2.43} = 5.15 \times 10^{-10} Re^3 - 2.46 \times 10^{-6} Re^2 + 6.01 \times 10^{-3} Re + 5.93 \quad (5.25)$$

$$Nu_{\alpha=3.86} = 5.05 \times 10^{-10} Re^3 - 2.46 \times 10^{-6} Re^2 + 6.30 \times 10^{-3} Re + 6.61 \quad (5.26)$$

Se conoce el comportamiento térmico del sistema para cada relación de aspecto y en función del Re. Además de este resultado es interesante obtener unos resultados generalizables para tubos de cualquier longitud, diámetro, etc. (sometidos a un flujo térmico uniforme y constante por su pared superior).

Para generalizar este resultado, se define un parámetro adimensional que es la distancia equivalente del flujo desarrollado desde la entrada del tubo ( $L^+$ , longitud adimensional), este parámetro es de definición similar a  $X^+$  (Rohsenow, 1998), pero dependiente de la longitud total del tubo. A este parámetro se le conoce como variable de Graetz:

$$L^+ = \frac{L/D_h}{Re} \quad (5.27)$$

La nueva correlación, en función del parámetro  $L^+$ , queda descrita por la siguiente función potencial:

$$Nu_{D_h} = 5,811(L^+)^{-0.237} \quad (5.28)$$

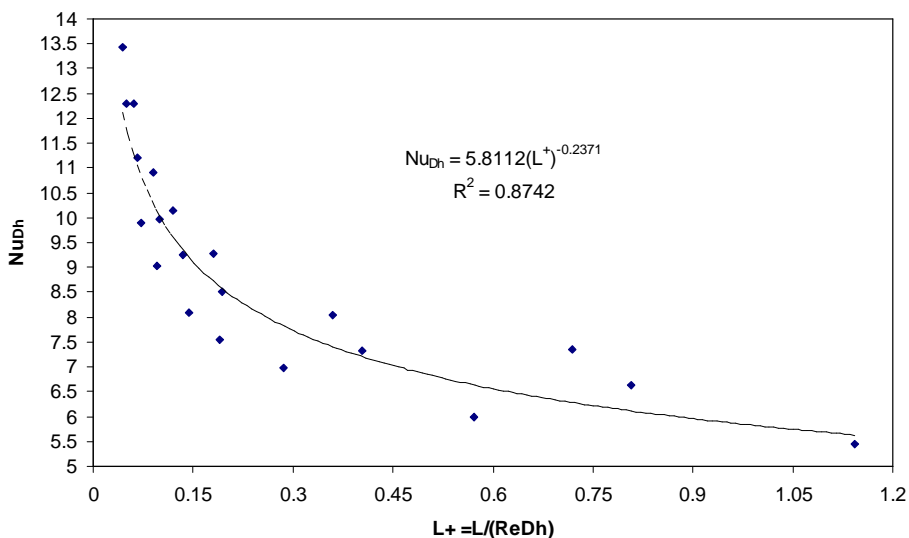


Figura 5.30. Correlación del Nusselt en función de la longitud adimensional.

Las correlaciones obtenidas mediante la simulación CFD se representan a continuación junto con correlaciones obtenidas por otros autores para canales y microcanales en régimen laminar y en condiciones similares a las que se analizan.

En otros sistemas de concentración lineal y con refrigeración activa (Chenlo y Cid, 1986; Coventry, 2005), no se han encontrado expresiones que correlacionen el intercambio térmico en función del régimen de circulación del fluido, etc. Posteriormente se compararán dichos sistemas en función a su resistencia térmica.

El sistema propuesto tiene una analogía de funcionamiento con respecto a los microcanales, con dos diferencias principalmente: el orden de magnitud es de milímetros y la densidad de microcanales puede variar desde la unidad hasta un número reducido de ellos. La característica principal de los microcanales es conseguir una transferencia de calor máxima entre la zona a refrigerar y el fluido, por esto los microcanales tienen relaciones de aspecto mayores a 1, para conseguir que el número de Nusselt medio sea elevado. Esto es justamente lo que se consigue en el sistema disipador propuesto.

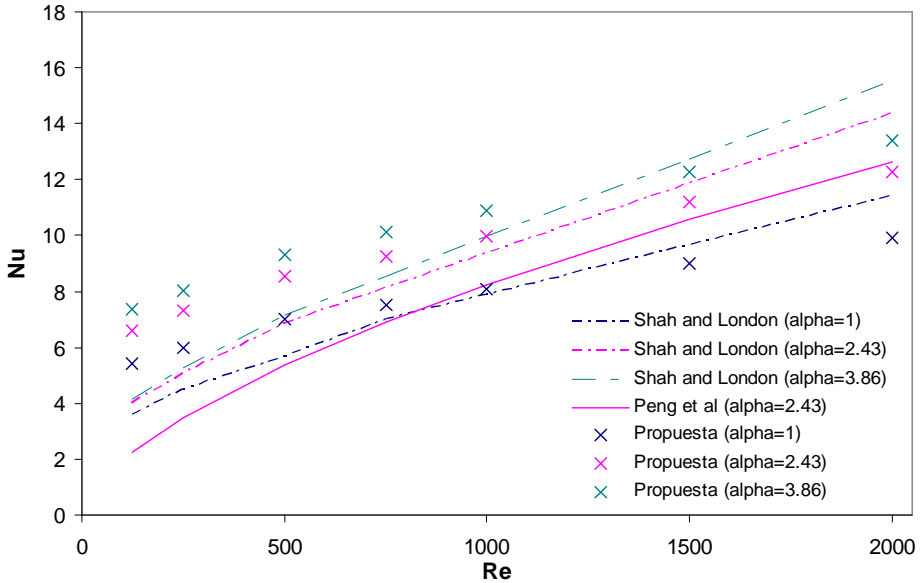


Figura 5.31. Comparación con correlaciones de otros autores.

Las expresiones de las correlaciones comparadas con las que se proponen son las siguientes:

Shah and London (1978)

$$Nu = \begin{cases} 1.953 \left( Re Pr \frac{D}{L} \right)^{\frac{1}{3}} & si \rightarrow Re Pr \frac{D}{L} \geq 33.3 \\ 4.364 + 0.0722 Re Pr \frac{D}{L} & si \rightarrow Re Pr \frac{D}{L} < 33.3 \end{cases} \quad (5.29)$$

Las ecuaciones explican situaciones para canales en régimen laminar y con geometría circular. Hay que tener en cuenta que la comparación se realiza tomando un diámetro hidráulico correspondiente a una sección rectangular.

Peng et al. (1994)

$$Nu = 0.1165 \left( \frac{D_h}{w_c'} \right) \left( \frac{H_c}{w_c} \right)^{-0.79} Re^{0.62} Pr^{0.33} \quad (5.30)$$

La expresión se corresponde a un sistema con microcanales con relaciones de aspecto en torno a 2. El parámetro  $w'_c$  hace referencia a la distancia entre centros de microcanales sucesivos.

Se aprecia en la figura 5.32 que el rango de valores resultantes para las distintas correlaciones se encuentra en la misma zona. Los valores del número de Nusselt hallados con las ecuaciones propuestas, corresponden a un flujo en que la velocidad axial del fluido en el interior del conducto es constante.

Finalmente se halla la resistencia térmica hacia el fluido en función de la velocidad y del número de Reynolds. La resistencia térmica se calcula a partir de la expresión siguiente:

$$R_t = \frac{T_{\text{pared superior}} - T_{\text{agua, entrada}}}{q''} \quad (5.31)$$

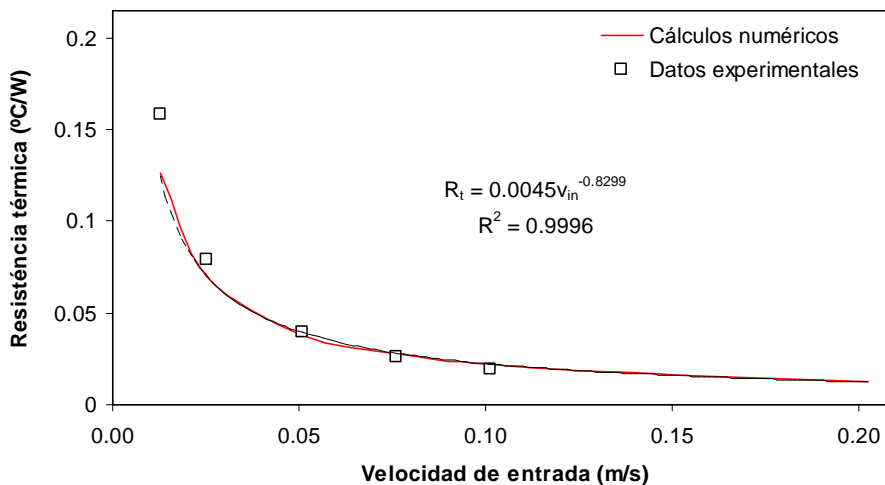


Figura 5.32. Resistencia térmica vs velocidad de entrada del fluido.

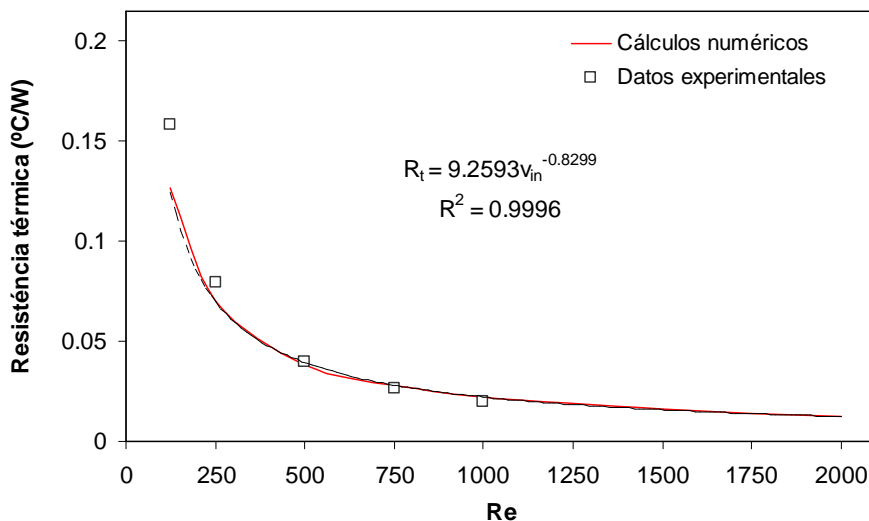


Figura 5.33. Resistencia térmica vs Re.

Los valores que aparecen en las distintas fuentes (Royne *et al*, 2005) que hacen referencia a la resistencia térmica en casos con concentración lineal son:

Autores	$1/h_c$ ( $m^2K/W$ )
Chenlo y Cid (1986)	$8,7 \times 10^{-4}$ (Re = 5000)
Coventry (2005)	$1,3 \times 10^{-3}$ (Flujo másico = $0,348 \text{ kg/m}^2\text{s}$ )

Tabla 5. 3. Resistencias térmicas de otros sistemas concentradores lineales con PVT.

Para comparar con estos valores debemos calcular la resistencia térmica por unidad de superficie, obteniéndose los siguientes valores:

Re	Flujo másico ( $kg/m^2s$ )	$1/h_c$ ( $m^2K/W$ )
125	0,16	$1,71 \times 10^{-3}$
250	0,31	$9,44 \times 10^{-4}$
500	0,62	$5,14 \times 10^{-4}$
750	0,91	$3,81 \times 10^{-4}$
1000	1,22	$3,01 \times 10^{-4}$

---

1500	1,81	$2,16 \times 10^{-4}$
2000	2,41	$1,69 \times 10^{-4}$

---

Tabla 5. 4. Resistencia térmica por unidad de superficie.

Los valores de resistencia térmica para el disipador propuesto son inferiores en comparación con los presentados por Chenlo y Cid (1986) y Coventry (2005). Hay que mencionar que los valores que se pueden comparar en mayor grado (Coventry), han sido adquiridos con el prototipo funcionando en condiciones reales. Los valores que se muestran del disipador diseñado están realizados a nivel de laboratorio, por lo que a la hora de comparar cabe ser crítico cuantificando diferencias.

# Capítulo 6

## Análisis térmico del sistema

---

En este apartado el objetivo es calcular los flujos de calor, por los tres modos de transferencia, que se producen en el colector, la temperatura que alcanzan las células y la eficiencia térmica.

El análisis térmico del sistema se realizará en el régimen estacionario, por lo que los flujos de calor se considerarán constantes. La transferencia de energía en forma calorífica se produce por conducción, convección y radiación.

El procedimiento utilizado consiste en hallar las resistencias térmicas de conducción, convección y radiación (aproximación de 1er orden) para, posteriormente, con la temperatura ambiente, la temperatura interior del fluido térmico y la irradiancia que reciben las células, resolver los flujos térmicos.

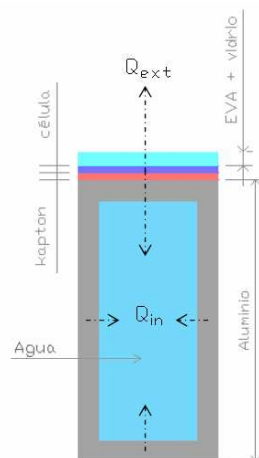


Figura 6.1. Esquema de la transferencia de calor en el sistema.



## 6.1. PRELIMINARES

### 6.1.1. CONDUCCIÓN

Si entre dos puntos de un sólido existe una diferencia de temperaturas, se produce una transferencia de energía interna en forma de calor que va desde el punto de mayor temperatura al de menor. La cuantificación de esta transferencia viene dada por la ley de Fourier:

$$q_{\text{cond}} = -kA(dT/dx) \quad (6.1)$$

- ✓  $q_{\text{cond}}$  [W]: calor que atraviesa por conducción una sección transversal a la dirección de transmisión.
- ✓  $A$  [m<sup>2</sup>]: área de la sección transversal.
- ✓  $dt/dx$  [°C/m]: gradiente de temperaturas en la dirección  $x$ .
- ✓  $k$  [W/m°C]: conductividad térmica de cada material.

La conducción se producirá entre el vidrio-EVA-células-kapton-aluminio, cuyas conductividades térmicas son las siguientes:

<b>Conductividades [W/m°C]</b>	
Aluminio	202,4
Células	148
EVA	0,35
Kapton	0,37
Vidrio	0,8

Tabla 6.1. Conductividades térmicas.

La expresión que se utilizará es la analogía eléctrica de la 2º Ley de Fourier

$$q_{\text{cond}} = \Delta T_{\text{total}}/R_{\text{total}} \text{ (analogía con la ley de Ohm)} \quad (6.2)$$

$$q_{\text{cond}} = UA\Delta T_{\text{total}} \text{ (forma análoga a la ley de Newton)} \quad (6.3)$$

donde:

$$R_{\text{total}} = \sum R_i \quad (6.4)$$

$$R_i = E_i / (k_i A) \quad (6.5)$$

$$U = 1 / (A R_{\text{total}}) \quad (6.6)$$

- ✓  $R_{\text{cond}}$  [°C/W]: resistencia de contacto.
- ✓  $E$  [m]: espesor del material, en la dirección del flujo de calor.
- ✓  $k$  [W/m°C]: conductividad térmica de cada material.
- ✓  $A$  [m<sup>2</sup>]: área de la sección transversal.
- ✓  $U$  [W/m<sup>2</sup>°C]: coeficiente global de transmisión de calor.

La longitud de colector que se analiza es de un metro, que se corresponde a la longitud del colector con el cual se realiza el ensayo experimental.

<b>Materiales</b>	<b><math>E_i</math> [m]</b>	<b><math>A</math> [m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>R_i</math> [°C/W]</b>
Aluminio (a)	0,0015	0,01	$7,411 \times 10^{-4}$
Aluminio (b)	0,005	0,0015	0,0165
Aluminio (c)		0,0015	
- $\alpha^1 = 1$	0,007+0,0015	0,0015	0,0280
- $\alpha = 2,43$	0,017+0,0015	0,0015	0,0609
- $\alpha = 3,85$	0,027+0,0015	0,0015	0,0939
Aluminio (d)	0,0035	0,0015	0,0115
Células (mitad)	$150 \times 10^{-6}$	0,01	$1,0135 \times 10^{-4}$
EVA	$500 \times 10^{-6}$	0,01	0,1429
Kapton	$127 \times 10^{-6}$	0,01	0,0343
Vidrio	0,003	0,01	0,375

Tabla 6.2. Características de los materiales del sistema.

<sup>1</sup>  $\alpha$ : relación de aspecto. Es el ratio que relaciona la altura con la anchura de una sección rectangular. Los tres valores que se muestran se corresponden a las tres secciones estudiadas en el capítulo anterior.

Se asume que el aislante que envuelve el módulo por sus paredes laterales e inferior, por sus propiedades térmicas, opone una resistencia a la transferencia de calor lo suficientemente elevada como para considerar que las paredes exteriores del tubo de aluminio son adiabáticas. Por esto la totalidad del calor que se transmite por conducción desde las células fotovoltaicas es portada por el fluido térmico o se pierde hacia el exterior a través del vidrio.

La conducción se da entre los siguientes elementos: vidrio-EVA-células-kapton-aluminio. En los 4 primeros elementos el flujo de calor tiene un único sentido principal de transferencia, pero en el aluminio del tubo el calor se distribuye por éste con trayectorias en horizontal y en vertical, con simultaneidad a su evacuación a través del fluido (convección).

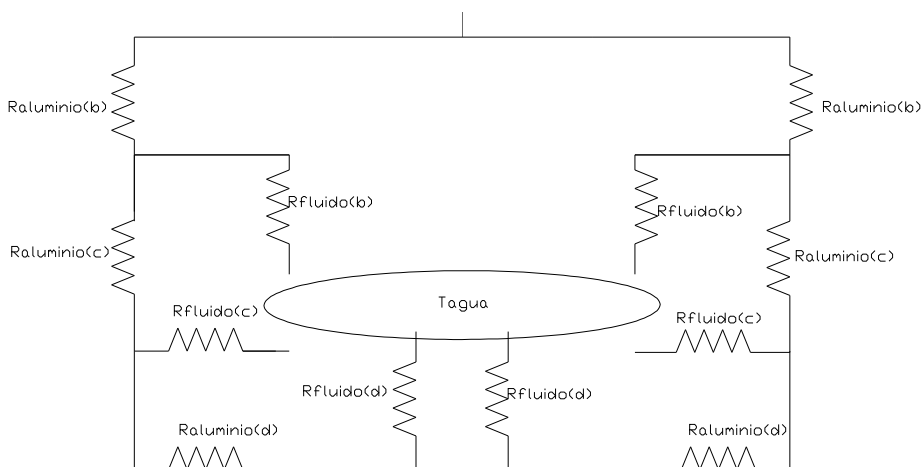


Figura 6.2. Esquema de resistencias zona disipador.

Este comportamiento es el que se plasma en este fragmento del esquema de resistencias. Se aprecia, tomando el esquema por su parte superior, que el calor que recibe el aluminio se distribuye paralelamente hacia el fluido y hacia los laterales del tubo. Desde los laterales (aluminio(c)) a su vez se transmite hacia la pared inferior y el fluido.

En la imagen se ve representada una clara simetría en el comportamiento de las paredes de los laterales y las dos mitades de la parte inferior.

A continuación se muestra el dibujo completo de las diferentes resistencias térmicas que componen el sistema en su conjunto.

### 6.1.1.1. Esquema de resistencias

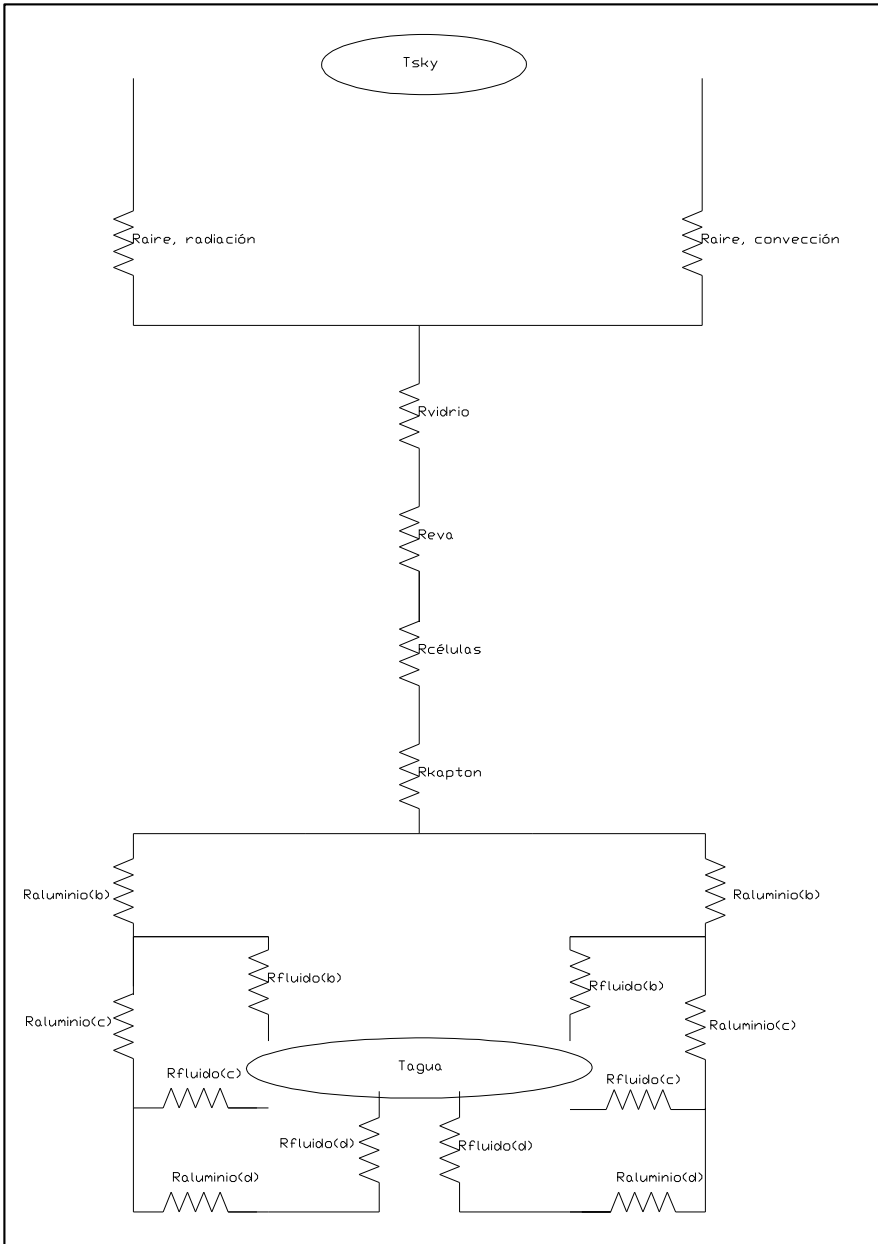


Figura 6.3. Esquema de resistencias térmicas.

### 6.1.2. CONVECCIÓN

La transmisión de calor por convección aparece cuando un fluido entra en contacto con la superficie de un sólido a temperatura diferente o entre diferentes partes de un fluido a diferente temperatura. La cuantificación del proceso viene dada por la ley de enfriamiento de Newton:

$$q_{\text{conv}} = \dot{h}_c A (T_s - T_\infty) \quad (6.7)$$

- ✓  $q_{\text{conv}}$  [W]: calor que se transmite por convección.
- ✓  $A$  [m<sup>2</sup>]: área de la superficie de contacto sólido-fluido.
- ✓  $T_s$  [°C]: temperatura de la superficie del sólido.
- ✓  $T_\infty$  [°C]: temperatura del fluido en puntos alejados de la superficie.
- ✓  $\dot{h}_c$  [W/m<sup>2</sup>°C]: coeficiente medio de convección o de película.

Al igual que en el caso de transferencia de calor por conducción se puede escribir una forma análoga a esta introduciendo el parámetro de resistencia de convección (analogía con la ley de Ohm):

$$q_{\text{conv}} = (T_s - T_\infty) / R_{\text{conv}} \quad (6.8)$$

$$R_{\text{conv}} = 1 / \dot{h}_c A \quad (6.9)$$

- ✓  $R_{\text{conv}}$  [°C/W]: resistencia de convección.
- ✓  $T_s$  [°C]: temperatura de la superficie del sólido.
- ✓  $T_\infty$  [°C]: temperatura del fluido en puntos alejados de la superficie.
- ✓  $\dot{h}_c$  [W/m<sup>2</sup>°C]: coeficiente medio de convección o de película.
- ✓  $A$  [m<sup>2</sup>]: área de la superficie de contacto sólido-fluido.

Para el análisis de la convección los flujos de calor por convección se producen entre la superficie del vidrio y el ambiente y entre la superficie del interior del disipador de aluminio y el fluido térmico.

Para calcular los coeficientes de convección del aire y del fluido térmico se recurre a dos procedimientos diferentes.

### 6.1.2.1. Convección hacia el aire

La determinación del coeficiente  $h_c$  (o el número de Nusselt) hacia el aire tiene un grado de dificultad elevado, ya que su expresión depende tanto de la velocidad y dirección del viento incidente, como del efecto de la convección natural debido a la diferencia de temperatura con el exterior.

En la literatura se han realizado múltiples estudios para determinar la expresión de este coeficiente de transferencia de calor, sobre todo para colectores solares planos.

En el colector que se estudia, el efecto que producen las células fotovoltaicas al calentarse por la radiación solar es equivalente a un flujo térmico, o en términos de condición de contorno a un isoflujo con origen en las células.

Para las condiciones de flujo constante sobre una superficie expuesta al viento y con régimen laminar se pueden nombrar dos correlaciones principales que tratan este efecto:

#### 1.- Incropera y DeWitt (1996)

Incropera y DeWitt determinan

$$Nu \cong 0.680 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad Pr \geq 0,6 \quad (6.10)$$

El resultado que se obtiene con esta correlación sobre el Nusselt medio es un 2% superior al que se obtendría utilizando la correlación análoga para temperatura constante de la superficie sobre la que circula el viento.

Esta ecuación, y el resto que se plantearán a continuación, son correctas desde un punto de vista de ingeniería. Pero si las condiciones varían de acuerdo con la turbulencia de flujo libre o la aspereza de la superficie, se pueden incurrir en errores de hasta alrededor de un 25%.

#### 2.- Churchill y Ozoe (1973)

Estos autores recomiendan el uso de una única correlación aplicable a fluidos con un número de Prandtl cualquiera. Para flujo laminar sobre una placa,

$$Nu \cong \frac{0.695 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.0252/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \quad Pe \geq 100 \quad (6.11)$$

Donde:

- ✓  $Pe$ : Número adimensional de Peclet. Este parámetro cuantifica la transición de flujo convectivo al de difusión molecular. Cuando éste es mayor de uno indica que el flujo predominante es por convección y si es menor es por difusión molecular.

$$Pe \equiv Re Pr \quad (6.12)$$

En la bibliografía relacionada con el estudio de la convección hacia el aire en colectores solares, la totalidad o prácticamente la totalidad de autores tratan el problema como un caso de una superficie a temperatura constante. Teniendo esto en cuenta, las correlaciones habituales para calcular el coeficiente de convección o el Nusselt en sistemas captadores solares consideran que la superficie expuesta al ambiente tiene una temperatura constante.

El número de expresiones para esta situación de estudio es mucho mayor. A continuación se especifican algunas de ellas:

Incropera y De Witt definieron las correlaciones teóricas para placas planas sometidas a un flujo forzado paralelo a la superficie:

$$Nu \cong 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad Pr \geq 0,6 \quad (6.13)$$

Churchill y Ozoe, al igual que en el caso de flujo de calor uniforme propusieron una expresión generalizada para cualquier valor de  $Pr$ , con temperatura superficial constante:

$$Nu \cong \frac{0.677 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.0252/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \quad Pe \geq 100 \quad (6.14)$$

En estudios focalizados en la temática solar algunas de las correlaciones para temperatura constante que se han ido obteniendo son:

En 1954, **McAdams**, realizó una descripción de los estudios experimentales de Juges, quien en 1922 calentó una placa vertical de cobre de  $0,5 \text{ m}^2$  y la introdujo en un túnel de viento para someterla a diferentes módulos y direcciones de viento. Los resultados del estudio condujeron a la siguiente correlación:

$$h_c = 3.8v_\infty + 5.7 \quad v_\infty \leq 5 \text{ m/s} \quad (6.15)$$

Esta misma expresión es la que se especifica en la NBE-CT-82.

En 1977, **Watmuff** realizó una modificación de la correlación anterior, teniendo en cuenta que esta incluye el efecto de la convección natural y de la radiación, lo que provoca una sobrevaloración del coeficiente de transferencia de calor:

$$h_c = 3.0v_\infty + 2.8 \quad v_\infty \leq 5 \text{ m/s} \quad (6.16)$$

En 1979, **Sparrow** realizó un extenso estudio experimental con cassettes de naftaleno situados en el interior de un túnel de viento y sometidos a varias velocidades y ángulos de ataque. Del estudio obtuvo la siguiente correlación:

$$Nu \cong 0.86Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad 2.10^4 < Re < 10^6 \quad (6.17)$$

**Pohlhausen** comprobó que se podía utilizar la misma expresión para Reynolds menores a  $2.10^4$ .

En términos de coeficiente de convección, se puede reescribir la expresión como:



$$h_c = 5.1\nu_\infty^{1/2} L_e^{-1/2} \quad (6.18)$$

Donde:

$$L_e = \frac{4Area}{Perímetro} \rightarrow \text{Longitud característica (m)}$$

En 1998, **Sharples** realizó una campaña de medidas del coeficiente de transferencia convectivo sobre un colector solar situado en un tejado. De su estudio se deduce que tanto las ecuaciones lineales de Watmuff como la de Sparrow son válidas para determinar el coeficiente en placas de tamaño pequeño como son los colectores solares. También concluyó que en el caso en que se quiera analizar la influencia de la convección natural para las situaciones en que no haya viento, es preferible utilizar las correlaciones lineales.

A continuación se calculan los coeficientes de convección obtenidos a través de las distintas correlaciones mencionadas (ver tabla 6). La superficie plana sobre la que se calculan es la correspondiente al vidrio que cubre el módulo por su parte superior.

Superficie (m <sup>2</sup> )	0,01
Perímetro (m)	2,02
Longitud característica, L <sub>e</sub> (m)	0,0198

Tabla 6.3. Características geométricas del vidrio necesarias para las correlaciones.

Previamente a la aplicación de las expresiones anteriores, se definen los números adimensionales que aparecen en las distintas correlaciones:

El indicador del régimen con que circula un fluido es el **número de Reynolds (Re)**: es el parámetro que relaciona cuantitativamente la energía cinética de las partículas del fluido con el trabajo de rozamiento efectuado por las fuerzas viscosas, su valor, como se acaba de mencionar, determina la transición entre flujo laminar y flujo turbulento.

En el flujo de fluidos sobre superficies planas se define como:

$$Re = \rho L_e v / \mu \quad (6.19)$$

- ✓  $v_m$  [m/s]: velocidad media del fluido.
- ✓  $L_e$  [m]: longitud característica.
- ✓  $\rho$  [Kg/m<sup>3</sup>]: densidad del fluido.
- ✓  $\mu$  [Kg/ms]: viscosidad dinámica del fluido.

El flujo es laminar hasta que  $Re_d \approx 2300$  y a partir de  $Re_d \geq 6000$  se entra en la zona de turbulencia completa.

Un número adimensional que define las características de los fluidos es el **Número de Prandtl (Pr)**: describe la relación entre las distribuciones de velocidad y temperatura en el seno de un fluido.

$$Pr = \nu / \alpha = \mu C_p / k_{\text{fluido}} \quad (6.20)$$

- ✓  $\mu$  [Kg/ms]: viscosidad dinámica del fluido.
- ✓  $C_p$  [J/Kg°C]: calor específico del fluido.
- ✓  $k_{\text{fluido}}$  [W/m°C]: conductividad térmica del fluido.
- ✓  $\nu$  [m<sup>2</sup>/s]: viscosidad cinemática del fluido.
- ✓  $\alpha$  [m<sup>2</sup>/s]: difusividad térmica del fluido.

**Número de Nusselt**: caracteriza los procesos de transmisión de calor entre la pared y el fluido en contacto con ella. Generalmente es una incógnita en los problemas de convección, ya que en su expresión incluye el coeficiente de transmisión de calor por convección  $h_c$  que es lo que se desea calcular.

$$Nu_L = h_c L_e / k_{\text{fluido}} \quad (6.21)$$

- ✓  $h_c$  [W/m<sup>2</sup>°C]: coeficiente medio de convección o de película.
- ✓  $L_e$  [m]: longitud característica.
- ✓  $k_{\text{fluido}}$  [W/m°C]: conductividad térmica del fluido.

Para la superficie que se analiza, se supone que el aire circula a una velocidad de 0,25m/s. Esta velocidad tiene un valor reducido por dos razones, la primera de ellas es que en condiciones exteriores el sistema captador solar se encuentra protegido del aire por el secundario y por la estructura modular que lo soporta. La segunda razón es que en la planta piloto en la que se realizan los experimentos el viento es prácticamente inexistente. Este valor, pues tenderá a mayorar el valor de las pérdidas hacia el exterior por convección.

Los valores de los números adimensionales y los coeficientes de convección son, teniendo en cuenta las propiedades del aire:

<b>Propiedades del aire</b>	
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1,225
Calor específico, $C_p$ [J/kg°C]	1006,43
$\mu$ [kg/ms]	$1,7894 \cdot 10^{-5}$
$k_{\text{fluido}}$ [W/m°C]	0,0242

Tabla 6.4. Propiedades del aire.

<b>Números adimensionales</b>	
Re	338,87
Pr	0,744
Pe	252,11
<b><u>q'' = cte.</u></b>	
Nu (Incropera y DeWitt)	11,34
Nu (Churchill y Ozoe)	11,31
<b><u>T = cte.</u></b>	
Nu (Incropera y DeWitt)	11,07
Nu (Churchill y Ozoe)	11,01

Nu (Pohlhausen)	14,35
-----------------	-------

Tabla 6.5. Números adimensionales.

<b>Coefficientes de convección (W/m<sup>2</sup>°C)</b>	
<b><u>q'' = cte.</u></b>	
h <sub>c</sub> (Incropera y DeWitt)	13,86
h <sub>c</sub> (Churchill y Ozoe)	13,82
<b><u>T = cte.</u></b>	
h <sub>c</sub> (Incropera y DeWitt)	13,53
h <sub>c</sub> (Churchill y Ozoe)	13,46
h <sub>c</sub> (Pohlhausen)	17,53
h <sub>c</sub> (McAdams)	6,65
h <sub>c</sub> (Watmuff)	3,55

Tabla 6.6. Coeficientes de convección.

- **h<sub>c</sub> aire (q''=cte) = 11,77 W/m<sup>2</sup>°C.** (Se ha tomado el valor medio de los valores obtenidos con las expresiones anteriores). Hay que comentar que en colectores de pequeñas dimensiones Sharples recomienda el uso de las correlaciones lineales (Mc Adams y Watmuff). La situación de los colectores solares es exactamente la misma que se trata en este caso, o sea, con flujo de calor constante. El valor que se toma es superior al que recomienda Sharples, pero se considera adecuado tomar un valor medio en el que se engloben también valores del coeficiente de convección para flujo de calor constante (situación real), y no únicamente temperatura constante.

### 6.1.2.2. Convección hacia el fluido térmico

Se proponen dos fluidos térmicos alternativos: el agua y agua glicolada con un 25% de etilenglicol. A partir de aquí se hará referencia a la mezcla de agua glicolada como etilenglicol.

La condición para los dos fluidos es que en el interior del disipador circulen con un flujo adecuado para que el salto térmico sea de  $\Delta T = 7\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>2</sup>.

Atendiendo a la expresión que relaciona el calor portado por un fluido en flujo desarrollado, en este caso por el etilenglicol o el agua, se obtiene:

$$q = \dot{m} c_p \Delta T \quad (6.22)$$

- ✓  $\dot{m}$  [kg/s]: caudal másico.
- ✓  $\Delta T$  [°C]: (temperatura a la salida del tubo – temperatura a la entrada).
- ✓  $C_p$  [J/kg°C]: calor específico.

Teniendo en cuenta estos parámetros, el flujo de calor que se desee evacuar determina directamente el caudal de fluido que ha de circular por la conducción. Considerándose que la anchura de célula es de 1cm:

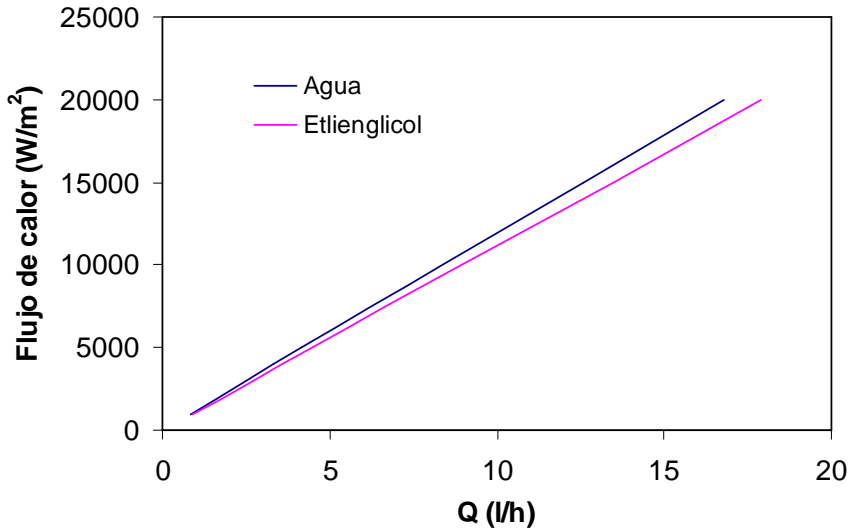


Figura 6.4. Flujo de calor portado por el fluido en función del caudal.

<sup>2</sup> En colectores solares térmicos de placa plana convencionales un salto térmico de 7 °C es un valor usual. Se toma este valor en consideración para equipara el sistema propuesto en prestaciones de un sistema comercial estándar.

Análogamente al caso anterior, para conocer el coeficiente de convección se utilizan con anterioridad una serie de números adimensionales.

El primero que se calcula es el **número de Reynolds**: en el flujo de fluidos a través de tubos cilíndricos, el número de Reynolds se define usando como longitud característica el diámetro interno del tubo:

$$Re_d = \rho \varnothing v_m / \mu \quad (6.23)$$

- ✓  $v_m$  [m/s]: velocidad media del fluido en el tubo.
- ✓  $\varnothing$  [m]: diámetro interior del tubo.
- ✓  $\rho$  [Kg/m<sup>3</sup>]: densidad del fluido que circula por el interior del tubo.
- ✓  $\mu$  [Kg/ms]: viscosidad dinámica del fluido.

El flujo es laminar hasta que  $Re_d \approx 2300$  y a partir de  $Re_d \geq 6000$  se entra en la zona de turbulencia completa.

Cuando la sección del conducto no es circular, como sucede en el presente análisis, se utiliza el diámetro hidráulico  $D_h$ , definido en el caso de una sección recta rectangular de lados  $a$  y  $b$  por:

$$D_h = 2ab / (a+b) \quad (6.24)$$

Para las secciones que se estudian, correspondientes a las tres relaciones de aspecto analizadas anteriormente, los diámetros hidráulicos que se obtienen son:

Relación de aspecto ( $\alpha$ )	$D_h$
1	0,0070
2,43	0,0099
3,85	0,0111

Tabla 6.7. Diámetros hidráulicos de las secciones estudiadas.

Conociendo las características del tubo y del fluido hallaremos el número de Reynolds para el agua y el etilenglicol. Teniendo en cuenta que el salto térmico se fija en 7 °C:

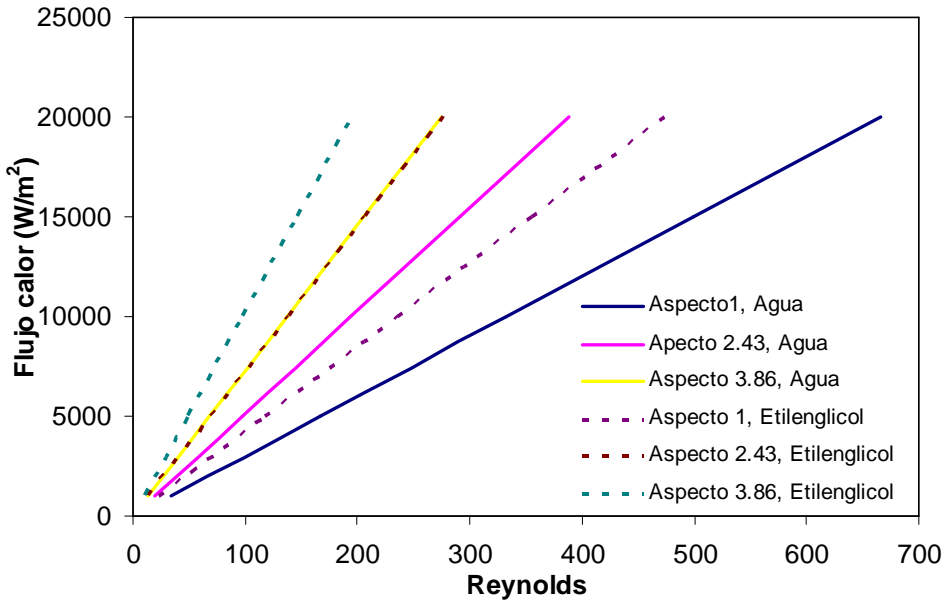


Figura 6.5. Flujo de calor portado por el fluido en función del Reynolds.

Como se puede apreciar en el gráfico (ver figura 6.5) para cada relación de aspecto de la geometría de disipador utilizada, el calor a extraer del sistema es linealmente proporcional al caudal del fluido, a la velocidad de entrada o al Reynolds. Por esto, el análisis se puede discretizar a un valor de flujo, conociéndose que la generalización será lineal.

Se toma como referencia un flujo de calor de  $15000\text{W/m}^2$ , que es un valor de flujo concentrado intermedio dentro del rango de ratios de concentración alcanzables por el sistema óptico. Habiéndose tenido en cuenta las propiedades de cada uno de los fluidos, se obtiene que los Reynolds necesarios para cada tipo de relación de aspecto y fluido son:

Propiedades del agua		Propiedades del etilenglicol (Agua glicolada al 25%)	
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1000	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1030
Calor específico, $C_p$ [J/kg°C]	4180	Calor específico, $C_p$ [J/kg°C]	3800
$\mu$ [kg/ms]	0,001	$\mu$ [kg/ms]	0,0015
$k_{\text{fluido}}$ [W/m°C]	0,6	$k_{\text{fluido}}$ [W/m°C]	0,5

Tabla 6.8. Propiedades del etilenglicol y del agua.

	Agua			Etilenglicol		
Relación de aspecto	1	2,43	3,85	1	2,43	3,85
Reynolds	332,78	194,12	137,03	105,88	236,93	138,21

Tabla 6.9. Reynolds del etilenglicol y del agua.

El **Número de Prandtl (Pr)**, se calcula de igual forma que anteriormente, como:

$$Pr = v/\alpha = \mu C_p/k_{\text{fluido}} \tag{6.25}$$

- **Pr (agua)** = 6,97
- **Pr (etilenglicol)** = 11,4.

A partir de aquí, se realizarán los cálculos tomando como fluido térmico el agua. El siguiente procedimiento se realizaría de forma análoga con el etilenglicol. Se escoge el agua porque en la fase experimental es el fluido que se utiliza para realizar los diferentes análisis.

Tras conocer el número de Reynolds, el siguiente paso es utilizar las correlaciones obtenidas en las simulaciones numéricas para conocer el **número de Nusselt**, ya que a partir del número de Nusselt se halla el coeficiente de convección del fluido mediante:

$$Nu_{Dh} = h_c D_h/k_{\text{fluido}} \tag{6.26}$$

- ✓  $D_h$  [m]: diámetro interior del tubo.



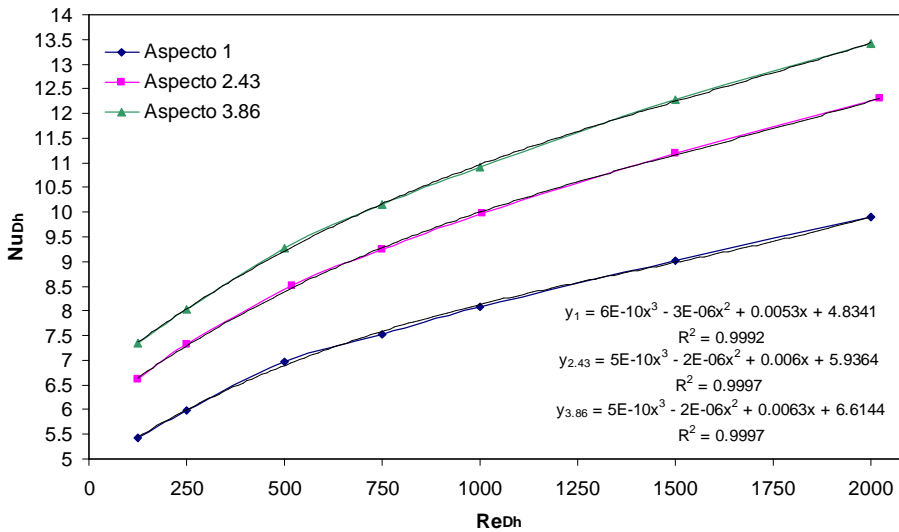


Figura 6.6. Correlación del número de Nusselt en función del Reynolds y para cada relación de aspecto.

De los diferentes tubos de aluminio estudiados se ha seleccionado el de relación de aspecto 2,43, por los argumentos mencionados en capítulos anteriores.

Tomando la correlación para este tubo e introduciendo el número de Reynolds para el cual el salto que se produce en el fluido es de 7 °C, se obtiene que el número de Nusselt medio es:

$$Nu_{\alpha=2.43} = 5.15 \times 10^{-10} Re^3 - 2.46 \times 10^{-6} Re^2 + 6.01 \times 10^{-3} Re + 5.93 \quad (6.27)$$

$$Nu_{\alpha=2.43} = 7. \quad (Re = 194,12)$$

Al obtener el número de Nusselt, con la fórmula anteriormente descrita ( $Nu_{Dh} = \frac{h_c D_h}{k_{\text{fluido}}}$ ) ya se puede obtener el coeficiente de convección medio hacia el agua.

➤  $h_c (\text{agua}) = 423,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$

Conocido el coeficiente de convección medio de todas las paredes interiores que forman el tubo y el coeficiente de convección de la parte superior hacia el aire, se hallan ahora las resistencias de convección, que se recuerda se calculan como:

$$R_{\text{conv}} = 1 / \bar{h}_c A$$

<b>Superficie de convección normal hacia el aire [m<sup>2</sup>]</b>	0,01
<b>Superficie de convección normal hacia el fluido [m<sup>2</sup>]</b>	
- parte superior	0,0035 <sup>3</sup>
- parte inferior	0,0035
<b>Superficie de convección lateral hacia el fluido [m<sup>2</sup>]</b>	
- $\alpha = 2,43$	0,0017

Tabla 6.10. Superficies de convección.

<b>Resistencias de convección [°C/W].</b>	
<b>Resistencia de convección normal del aire</b>	8,50
<b>Resistencia de convección normal hacia el fluido</b>	
- parte superior	0,674
- parte inferior	0,674
<b>Resistencia de convección lateral hacia el fluido</b>	
- $\alpha = 2,43$	0,139

Tabla 6.11. Resistencias de convección.

### 6.1.3. RADIACIÓN

La radiación es el modo por el cual la energía se transmite en el vacío y en los cuerpos transparentes en forma de ondas electromagnéticas. Desde cualquier punto de

<sup>3</sup> Al resolverse por simetría, las superficies de intercambio inferior y superior son la mitad.

vista, el hecho es que cualquier cuerpo por estar a una temperatura por encima del cero absoluto emite energía en forma de radiación.

Cuando la radiación térmica incide sobre la superficie de un cuerpo, parte de ella es reflejada, parte absorbida, y en el caso de ser un cuerpo transparente o translúcido, parte transmitida a través del cuerpo.

Se denomina:

- $E_T$  a la energía total que recibe el cuerpo por radiación.
- $E_r$  a la energía que en forma de radiación es reflejada por el cuerpo.
- $E_t$  a la energía en forma de radiación que es transmitida a través del cuerpo.
- $E_a$  a la energía que es absorbida por el cuerpo.

A partir de aquí:

$$E_T = E_r + E_t + E_a \quad (6.28)$$

$$1 = E_r / E_T + E_t / E_T + E_a / E_T = \rho(v, r) + \tau(v, r) + \alpha(v, r) \quad (6.29)$$

donde :

- ✓  $v$  es la frecuencia de la radiación recibida.
- ✓  $r$  es la dirección de la radiación recibida.
- ✓  $\rho(v, r)$  reflectividad, es la fracción de la energía recibida que es reflejada por la superficie del cuerpo. En general depende de la frecuencia y dirección de la radiación incidente.
- ✓  $\tau(v, r)$  transmitividad, es la fracción de la energía recibida que es transmitida a través del cuerpo. En general depende de la frecuencia y dirección de la radiación incidente.
- ✓  $\alpha(v, r)$  absorptividad, es la fracción de la energía recibida que es absorbida por el cuerpo. En general depende de la frecuencia y dirección de la radiación incidente.

Esto sería en el caso de un cuerpo negro, que es un cuerpo ideal que absorbe toda la radiación que incide sobre él. En el caso de un cuerpo real hay que introducir un

nuevo parámetro que es la emisividad ( $\epsilon$ ), que define una fracción de la energía que emitiría si fuera un cuerpo negro y estuviera a la misma temperatura que éste.

La ley que se utiliza para definir los fenómenos de transmisión de calor por radiación es la ley de Stefan – Boltzman:

$$q_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A (T^4 - T_{\text{R}\infty}^4) \quad (6.30)$$

- ✓  $q_{\text{rad}}$  [W]: calor que se transmite por radiación.
- ✓  $\epsilon$ : emisividad del cuerpo.
- ✓  $\sigma$  [W / K<sup>4</sup>m<sup>2</sup>]: constante de Stefan – Boltzman. En el sistema internacional la constante  $\sigma$  vale:  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  W / K<sup>4</sup>m<sup>2</sup>.
- ✓  $A$  [m<sup>2</sup>]: área del cuerpo.
- ✓  $T$  [K]: temperatura absoluta, en Kelvin, de la superficie.
- ✓  $T_{\text{R}\infty}$  [K]: temperatura absoluta del entorno.

Como en los caso de transmisión de calor por conducción y convección podemos establecer una resistencia a la transmisión de calor por radiación, en analogía con la ley de Ohm:

$$R_{\text{rad}} = 1 / \hbar_r A \quad (6.31)$$

- ✓  $A$  [m<sup>2</sup>]: área del cuerpo.
- ✓  $\hbar_r$  [W/m<sup>2</sup>°C]: coeficiente de radiación.

El coeficiente de radiación se define como (Duffie y Beckman, 1991, pp.253 – 257):

$$\hbar_r = \sigma \epsilon (T_c + T_{\text{R}\infty}) (T_c^2 + T_{\text{R}\infty}^2) \quad (6.32)$$

- ✓  $T_c$  [K]: temperatura absoluta, en Kelvin, de las células.
- ✓  $T_{\text{R}\infty}$  [K]: temperatura absoluta del cielo.

Teniendo en cuenta estos parámetros la ecuación que nos describe la transmisión de calor por radiación nos queda de la siguiente forma:

$$q_{\text{rad}} = (T_c^4 - T_{R\infty}^4) / R_{\text{rad}} \quad (6.33)$$

$\sigma$ [W / K <sup>4</sup> m <sup>2</sup> ]	5,67.10 <sup>-8</sup>
Área radiante [m <sup>2</sup> ]	0,01
$\epsilon_c$	0,7
$T_c$	325,96
$T_a = T_{R\infty}$ [K]	293
$h_r$ [W/m <sup>2</sup> k]	4,72
$R_{\text{rad}}$ [K / W]	21,18

Tabla 6.12. Resultados de la transferencia de calor por radiación.

Una vez calculadas las resistencias por conducción, convección y radiación se procede a calcular los flujos de calor hacia el exterior y hacia el interior.

El receptor recibe la radiación concentrada de los elementos ópticos. En la resolución del sistema de ecuaciones se utiliza un ratio de concentración de 15 soles (G), que tras las diferentes pérdidas que posteriormente se comentan, se convierte en un flujo térmico de 10000W/m<sup>2</sup>. En el análisis se supone que estos 15 soles son la irradiancia que recibe el módulo térmico/fotovoltaico (15000W/m<sup>2</sup>).

En primer lugar se expresan los flujos de calor hacia el exterior y hacia el interior (fig. 1): ( $T_c$  = temperatura células,  $T_a$  = temperatura ambiente,  $T_f$  = temperatura del agua)

$$q_{\text{ext}} = (T_c - T_a) / R_{\text{ext}} \quad (6.34)$$

$$q_{\text{int}} = (T_c - T_f) / R_{\text{int}} \quad (6.35)$$

En el cálculo del calor hacia el exterior se obtiene que finalmente éste se pierde del colector por radiación y por convección. En la cuantificación de estas dos formas de

transferencia de calor hay que considerar dos temperaturas de referencia diferentes. En el caso del flujo radiativo se toma la temperatura del cielo, sin embargo el flujo convectivo se referencia a la temperatura ambiente:

$$q_{ext} = q_{conv} + q_{rad} = \frac{T_{vi} - T_a}{R_{conv}} + \frac{T_c - T_{R\infty}}{R_{rad}} \quad (6.36)$$

Para calcular  $T_{R\infty}$  (temperatura del cielo), se puede considerar al colector como un cuerpo negro a una temperatura  $T_s$  (Duffie y Beckman, 1991):

$$T_{R\infty} = Ta \left[ 0.711 + 0.0057T_{dp} + 0.000073T_{dp}^2 + 0.013 \cos(15t) \right]^{1/4} \quad (6.37)$$

donde:

- ✓  $T_{dp}$  [°C]: temperatura del punto de rocío.
- ✓  $t$ (horas): hora del día desde la medianoche.

La fase experimental del sistema térmico se realiza en una planta piloto, por lo que para la validación del modelo se considera en la ecuación de radiación que la  $T_{R\infty}$  es igual a la temperatura ambiente ( $T_a$ ).

El modelo es, a su vez, extensible a condiciones externas, teniendo en cuenta que para este análisis la temperatura del cielo se calcula para un momento dado del día y con una temperatura de rocío concreta<sup>4</sup>(ver ecuación 6.37). Para el mismo instante del día se introduce también en el modelo la temperatura ambiente para el cálculo del calor convectivo hacia el ambiente (pérdidas convectivas).

## 6.2. RESULTADOS

A lo largo del capítulo se han ido calculando una serie de resistencias térmicas. Estas resistencias se agrupan a continuación para constituir la resistencia hacia el exterior y la resistencia interior.

---

<sup>4</sup> Además de la fórmula que se especifica para el cálculo de  $T_{R\infty}$  de Duffie y Beckman, hay otras expresiones de otros autores, que tienen en cuenta otros parámetros para su cálculo, como son la humedad relativa del ambiente.

### 6.2.1. RESISTENCIA HACIA EL EXTERIOR

Es la que cuantifica la oposición al paso de calor desde las células hacia el aire. Esta compuesta por las siguientes resistencias:

Empezando desde el exterior, en primer lugar se obtiene la resistencia equivalente de convección y radiación.

$$R_{eq(conv-rad)} = \frac{R_{rad} R_{conv}}{R_{rad} + R_{conv}} \quad (6.38)$$

$$\blacktriangleright R_{eq(conv-rad)} = 6,06 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}.$$

Tras conocer ésta, se procede a sumar el resto de resistencias conductivas en serie:

$$R_{ext} = R_{eq(conv-rad)} + R_{vidrio} + R_{EVA} + R_{\frac{1}{2}células} \quad (6.39)$$

$$\blacktriangleright R_{ext} = 6,58 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}.$$

### 6.2.1. RESISTENCIA HACIA EL INTERIOR

Considera los elementos que intervienen entre la mitad de las células fotovoltaicas y el agua.

Se forma por la suma de la resistencia de las células, resistencia del kaptom, resistencia del aluminio y resistencia de convección hacia el fluido térmico (agua).

$$R_{int} = R_{aluminio-agua} + R_{kaptom} + R_{\frac{1}{2}células} \quad (6.40)$$

Las resistencias del aluminio y del agua tienen en cuenta la transmisión en las superficies normales a la dirección del flujo térmico y en los laterales de la sección. Su valor se encuentra mediante la siguiente expresión (ver fig. 6.3):

$$R_d = R_{fluido(d)} + R_{aluminio(d)} \tag{6.41}$$

$$R_c = R_{aluminio(c)} + \frac{R_{fluido(c)} R_d}{R_{fluido(c)} + R_d} \tag{6.42}$$

$$R_b = R_{aluminio(b)} + \frac{R_{fluido(b)} R_c}{R_{fluido(b)} + R_c} \tag{6.43}$$

$$R_{aluminio-agua} = \frac{R_b^2}{2R_b} \tag{6.44}$$

➤  $R_{int} = 0,133 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$ .

Una vez calculadas las resistencias térmicas se plantea un sistema de ecuaciones con los flujos de calor:

Los 15 soles (G) a los que se trabaja equivalen a  $15000 \text{ W} / \text{m}^2$ , con lo cual en una superficie de colector de  $0,01 \text{ m}^2$  la radiación que se recibe es de  $150 \text{ W}$ .

A estos  $150 \text{ W}$  totales hay que restarle las pérdidas ópticas y la fracción de energía que se transformará en electricidad y no en calor.

<b><math>\tau</math> (transmitividad)</b>	0,9
<b><math>\alpha</math> (absortividad)</b>	0,97
<b><math>(\tau\alpha)</math> normal</b>	0,87
<b>Corrección por ángulo</b>	0,98
<b><math>(\tau\alpha)</math> real</b>	0,85
<b><math>\eta</math> eléctrico</b>	0,2
<b><math>(\tau\alpha - \tau \eta_{eléctrico})</math></b>	0,67

Tabla 6.13. Coeficientes de pérdidas.

El factor con el que se consiguen cuantificar estas pérdidas es el siguiente (Zondag *et al.*, 2002):

$$(\tau\alpha - \tau \eta_{eléctrico}) \tag{6.45}$$



Multiplicando este factor a los 150 W se obtiene el calor que les llega neto a las células, que son **100 W**.

El sistema planteado es el siguiente:

- $q_{\text{ext}} = (T_c - T_a) / R_{\text{ext}}$
- $q_{\text{int}} = (T_c - T_f) / R_{\text{int}}$
- $q_{\text{int}} + q_{\text{ext}} = 100 \text{ W}$  (6.46)

<b>T<sub>a</sub> (°C): Temperatura ambiente.</b>	20
<b>T<sub>f</sub> (°C): Temperatura media del fluido</b>	40
<b>Resistencia exterior (°C / W)</b>	6,691
<b>Resistencia interior (°C / W)</b>	0,133

Tabla 6.14. Resumen de datos y resultados para cálculos finales.

Resolviendo el sistema se obtienen los siguientes valores:

<b>Flujo de calor hacia el exterior (W)</b>	4,98
<b>Flujo de calor hacia el agua (W)</b>	95,91
<b>Temperatura que alcanzan las células (°C)</b>	52,75

Tabla 6.15. Resultados.

El último parámetro que queda por determinar es la eficiencia térmica, que será:

$$\eta_{\text{térmico}} = q_{\text{int}} / (\text{Área iluminada} \cdot G) \quad (6.47)$$

donde:

- ✓ A: área iluminada = 0,01 m<sup>2</sup>.
- ✓ G: radiación solar concentrada = 15000W/m<sup>2</sup>.

<b><math>\eta_{\text{térmico}}</math></b>	0,639
---	-------

Tabla 6.16. Resultados.

La curva característica del captador es la siguiente:

### Curva característica

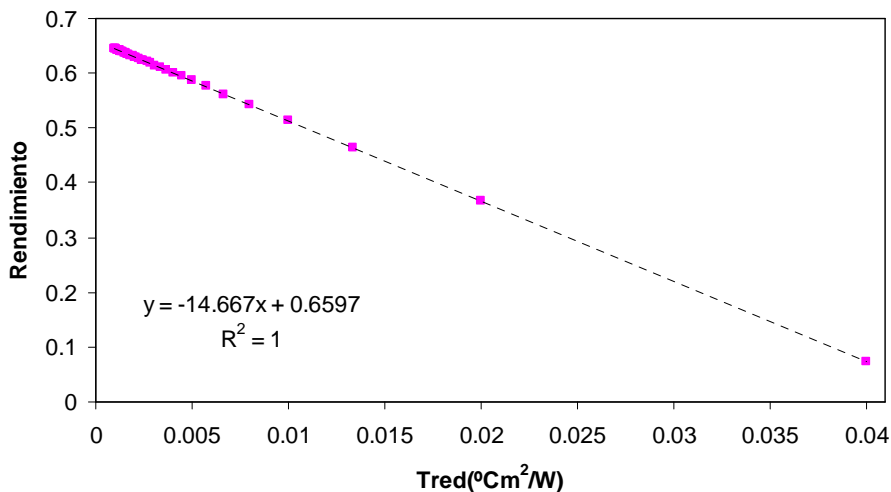


Figura 6.7. Curva característica.

Donde:

$T_{red}$ : temperatura reducida.  $T_{red} = \frac{(T_{mf} - T_a)}{G}$

La expresión de la curva característica se puede representar por una recta del tipo  $y = mx + n$ , donde  $m$  es la pendiente y  $n$  la ordenada en el origen. Desarrollando la expresión propuesta por Rosell y Ibáñez (2006) se obtiene que la ecuación de la curva característica tiene una pendiente y una ordenada en el origen cuyos valores son conocidos y dependen de factores que en el sistema son constantes (si no cambian los materiales, condiciones, dimensiones, etc.):

$$\eta_{t\acute{e}rmico} = \left[ \frac{-1}{(R_{ext} + R_{in})S} \right] T_{red} + \left[ \frac{(\tau\alpha_{real} - \tau\eta_{el\acute{e}ctrico,c\acute{e}lula)R_{ext}}}{R_{ext} + R_{in}} \right] \tag{6.48}$$

Para este caso, en el que la eficiencia de las células permanece constante con un valor del 20%, la pendiente y la ordenada en el origen calculados son:

$$\left[ \frac{-1}{(R_{ext} + R_{in})S} \right] = -14,65 \text{ } ^\circ\text{Cm}^2/\text{W}.$$

$$\left[ \frac{(\tau\alpha_{real} - \tau\eta_{el\u00e9ctrico,c\u00e9lula})R_{ext}}{R_{ext} + R_{in}} \right] = 0,6595.$$

Los par\u00e1metros calculados y la ecuaci\u00f3n obtenida fruto de la regresi\u00f3n son pr\u00e1cticamente iguales, aspecto indicativo de que la curva caracter\u00edstica del colector se ha calculado correctamente.

A continuaci\u00f3n se realiza el mismo procedimiento de c\u00e1lculo con la consideraci\u00f3n de que el rendimiento de las c\u00e9lulas disminuye a medida que la temperatura aumenta. La expresi\u00f3n que describe este fen\u00f3meno es (Marion, 2002):

$$\eta_{c\u00e9lulas}(T_{c\u00e9lulas,media}) = \eta_{c\u00e9lulas}(25^\circ\text{C}) - \alpha(T_{c\u00e9lulas,media} - 25^\circ\text{C}) \quad (6.49)$$

El coeficiente relativo de temperatura,  $\alpha$ , para c\u00e9lulas de silicio monocristalino tiene un valor de  $0,004 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (Lorenzo, 1994).

Como resultado del proceso se muestra la curva caracter\u00edstica del colector para eficiencia variable en la conversi\u00f3n el\u00e9ctrica de las c\u00e9lulas:

### Curva característica

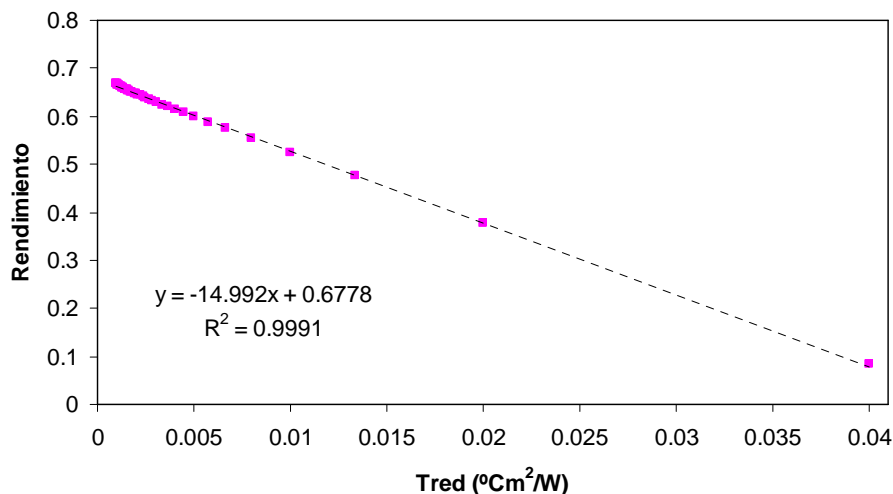


Figura 6.8. Curva característica con rendimiento de célula variable según la temperatura.

Se ve en la ecuación de la curva que el rendimiento térmico máximo aumenta en la situación en que se tiene en cuenta que la eficiencia de las células varía con la temperatura. Este resultado es intuitivo, ya que al disminuir el rendimiento de las células el flujo de calor que recibirá el sistema por la radiación que le incide será mayor. Por otro lado la temperatura de las células para igual caudal tendrá un valor mayor, por lo que las pérdidas hacia el exterior también aumentan. Para ambos casos en los resultados obtenidos de las dos curvas no se aprecian cambios sustanciales.

Para finalizar el capítulo se muestra como varía el rendimiento térmico del sistema en función del espesor del vidrio que lo cierra por su parte superior y del caudal de fluido que circula.

Espesor de vidrio: como cabía esperar al aumentar el espesor del vidrio, el rendimiento térmico de colector mejora, aunque este porcentaje de mejora es del orden de  $10^{-2}$ . El espesor de vidrio no será, pues, un condicionante de relevancia en el diseño del encapsulado del módulo.

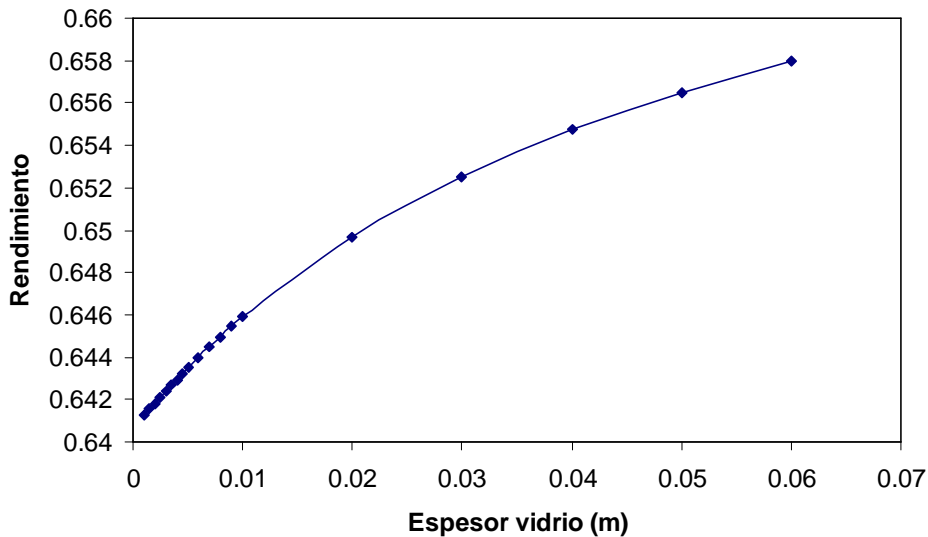


Figura 6.9. Rendimiento vs espesor vidrio.

Caudal de agua: el caudal de fluido que circula por el tubo es una variable crítica para el rendimiento térmico del colector. En la figura 6.10 se ve como los caudales adecuados para este colector son los que se encuentran entre 4 y 6 l/h; por encima de los 8 litros de agua por hora se estaría utilizando el agua ineficientemente. Por debajo de los 4 l/h el rendimiento decae rápidamente.

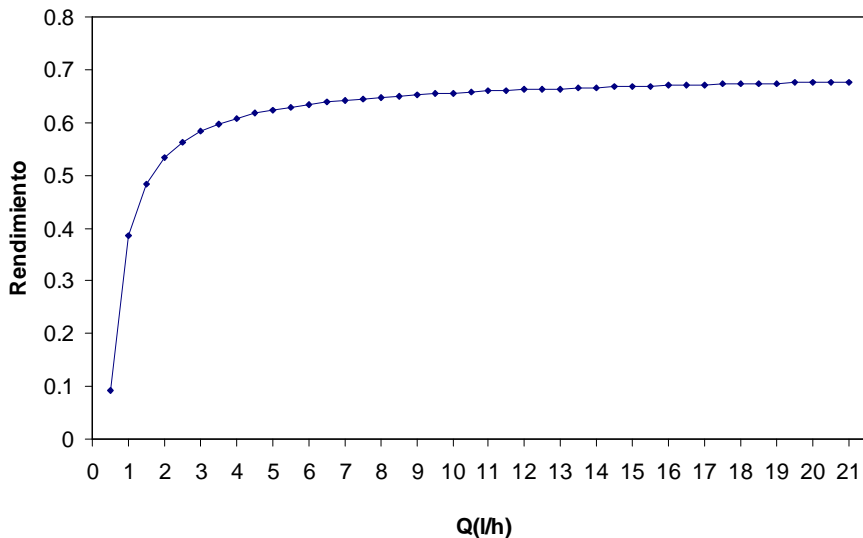


Figura 6.10. Rendimiento vs caudal de agua.

A continuación se representa el gráfico anterior, con la variación de que en este caso en el eje de abscisas el caudal es por  $\text{m}^2$  de colector. De este modo se pueden comparar directamente los resultados con otros colectores, ya que esta medida de caudal es más estándar en este campo.

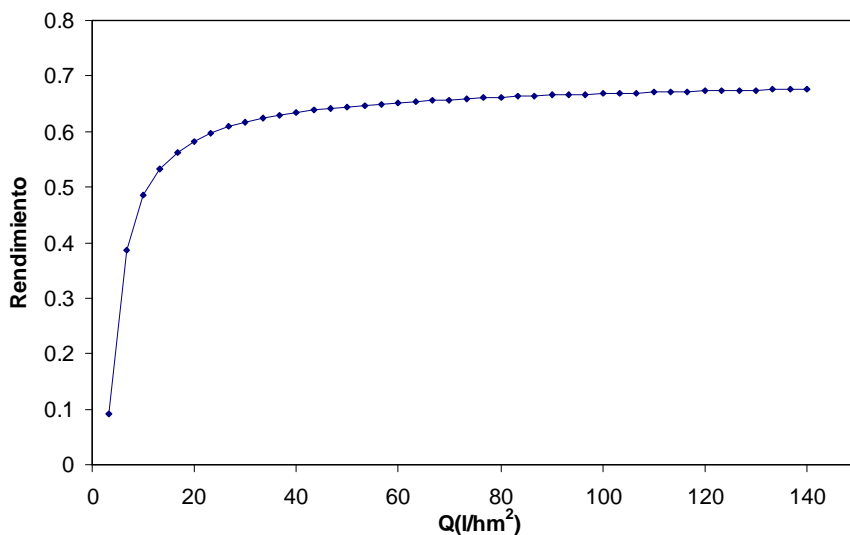


Figura 6.11. Rendimiento vs caudal de agua, por  $\text{m}^2$  de colector.

Derivados del trabajo realizado en el bloque de análisis térmico (capítulo 4,5 y 6) se han presentado las siguientes comunicaciones (ver apéndice D):

Chemisana, D., Vallverdú, X., Rosell, J.I., Ibáñez, M. Thermal performance of an evacuated pv-thermal collector. In conference proceedings: *Eurosun 2006. Solar Energy Society*, Glasgow, 2006.

Vallverdú, X., Chemisana, D., Barrau, J., Ibáñez, M., Rosell J.I. Characterization of a low concentrating photovoltaic/thermal absorber. In Proceedings: *13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies, Solar Paces*, Sevilla, 2006.

Chemisana, D., Cipriano, J., Ibáñez, M., Abdel Mesih, B., Mellor, A. A cooling system for a hybrid pv/thermal linear concentrator. *Eurosun 2006. Solar Energy Society*, Lisboa, 2006.

# Capítulo 7

## Balance energético

---

---

El objetivo de este capítulo es mostrar el comportamiento del sistema diseñado simulando su funcionamiento en condiciones climatológicas representativas de un año meteorológico típico. De esta forma se permiten presentar resultados de la producción de energía eléctrica y térmica contrastables y comparables con otros sistemas de producción térmica y eléctrica existentes.

Para realizar la simulación se utiliza el software comercial TRNSYS<sup>®</sup> 16. El paquete informático incorpora una librería con archivos que contienen los datos climáticos generados por Meteonorm<sup>®</sup>, (programa que incorpora un catálogo de datos meteorológicos y procedimientos de cálculo para aplicaciones solares y diseño de sistemas para un gran número de localidades mundiales), para diferentes localizaciones geográficas de Europa (Type 109-TMY2, donde TMY son las siglas de Typical Meteorological Year o Año Meteorológico Típico).

El Año Meteorológico Típico (AMT) recoge los distintos valores horarios de irradiación global horizontal y temperatura ambiente obtenidos a lo largo de un año hipotético constituido por una sucesión de doce meses pertenecientes a un conjunto de años reales. Estos doce meses se escogen de modo que el AMT represente con fiabilidad las características meteorológicas del lugar en cuestión. Los datos proporcionados por este año “artificial” permiten modelar el comportamiento de los sistemas solares de forma más precisa que usando los valores de un determinado año o valores medios mensuales.

El AMT sólo se encuentra disponible para pocas localidades, incluso es difícil conseguir los valores horarios de radiación horizontal y temperatura ambiente para la



mayoría de los lugares. Normalmente los únicos datos disponibles para todas las localizaciones son los doce valores medios mensuales de irradiación global diaria horizontal junto con los doce valores medios mensuales de la temperatura ambiente diaria máxima y los correspondientes doce valores de la temperatura mínima. (Aguilar, 2004).

## 7.1. PARÁMETROS CLIMÁTICOS DEL EMPLAZAMIENTO

El perfil de temperatura ambiente del año meteorológico típico en Almería (Latitud =  $36^{\circ}50'31''$ , Longitud =  $2^{\circ}27'9''$ ) es el siguiente:

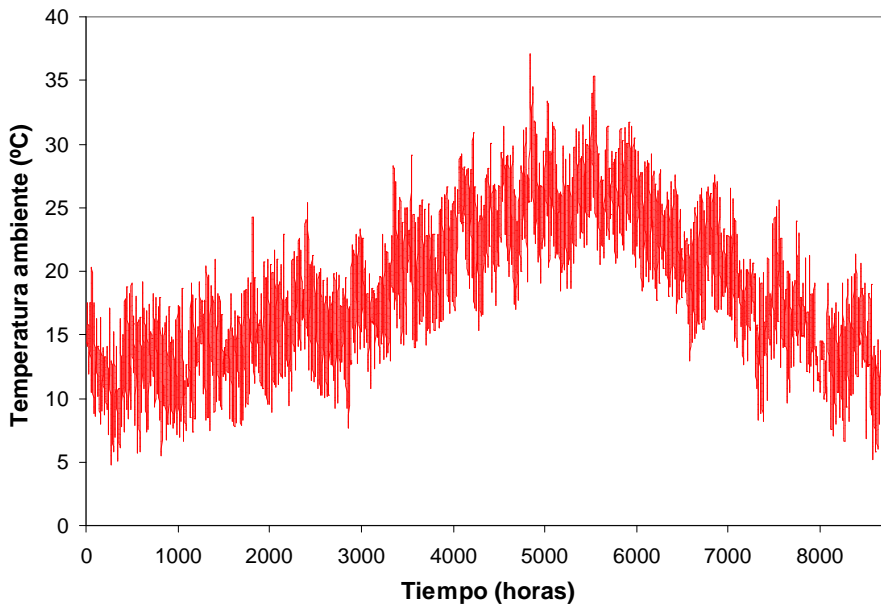


Figura 7.1. Perfil de temperaturas ambiente (AMT) de Almería.

Se aprecia en el gráfico que en Almería en el transcurso de todo el año en ningún momento la temperatura es negativa. Éste es un aspecto de gran importancia en colectores que utilizan fluidos térmicos, ya que éstos no requieren la incorporación de anticongelante o glicolados que disminuyen las propiedades térmicas del agua. En situaciones con temperaturas inferiores a  $0^{\circ}\text{C}$  habría que tenerse en cuenta que el fluido refrigerante no podría ser agua pura, debiéndose recurrir al uso de fluidos cuyo punto de congelación sea inferior a las temperaturas mínimas del lugar. Lo más habitual es

preparar una mezcla de agua con un determinado porcentaje de etilén glicol que variará en función del rango de temperaturas negativas.

Las temperaturas máxima y mínima son 37,15 °C y 4,82 °C respectivamente con una temperatura promedio anual de 18,5 °C.

Las condiciones radiativas en el área de Almería son las siguientes:

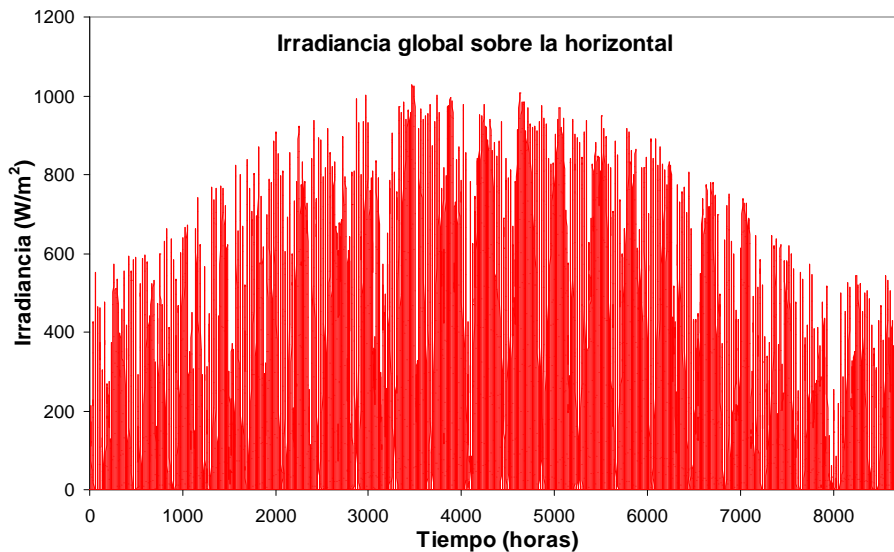


Figura 7.2. Irradiancia global sobre el plano horizontal.

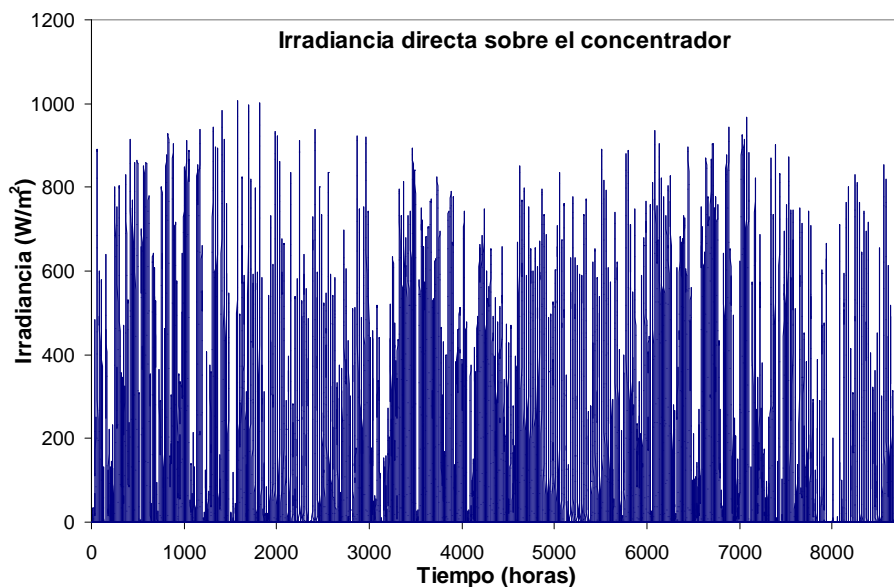


Figura 7.3. Irradiancia directa sobre el plano del concentrador.

Los valores de flujo de radiación directa que se reciben sobre la superficie del concentrador tienen sus picos máximos prácticamente todo el año por encima de  $800 \text{ W/m}^2$ , alcanzando en determinados momentos valores superiores a los  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Los valores de irradiación global sobre superficie horizontal y de irradiación directa sobre el concentrador (inclinación igual a la declinación,  $36^{\circ}50'31''$ ) anuales son  $1732,57 \text{ kWh/m}^2$  y  $1218,82 \text{ kWh/m}^2$ , lo que supone unos valores medios diarios de  $4,74 \text{ kWh/m}^2$  y  $3,34 \text{ kWh/m}^2$ .

Para tener referencias comparativas y encuadrar estos valores dentro del marco europeo, se muestra a continuación el mapa de la irradiación global sobre superficie horizontal en Europa realizado por Meteonorm<sup>®</sup>. Según el JRC (Join Research Centre) de la Comisión Europea la radiación media global anual en Europa sobre una superficie horizontal es de  $1096 \text{ kWh/m}^2$ .

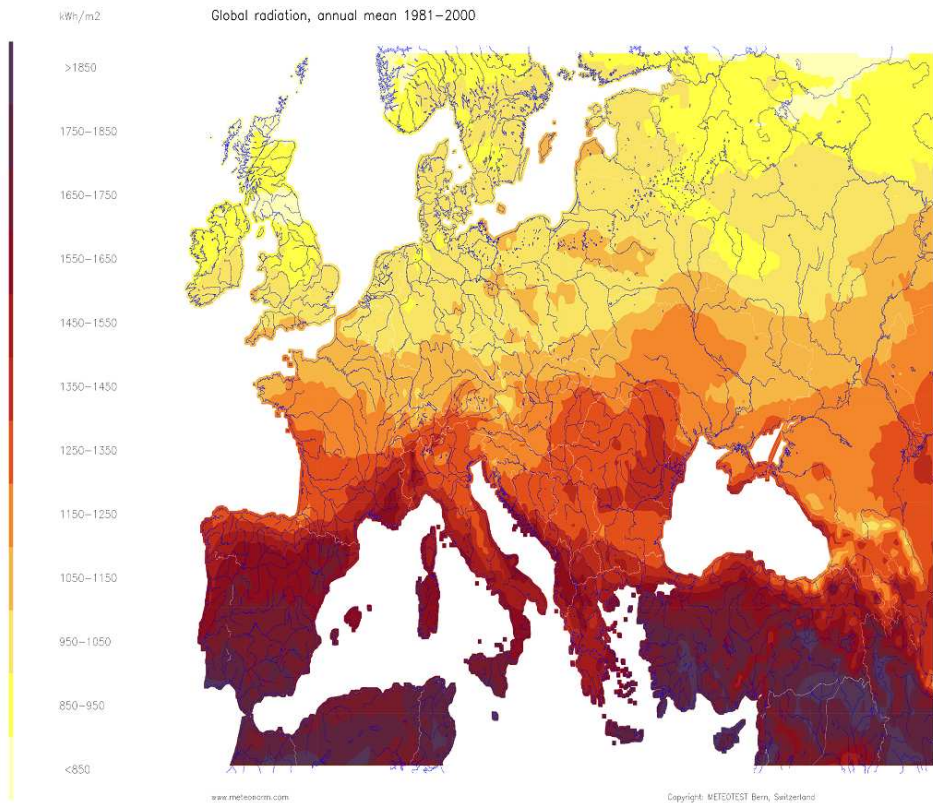


Figura 7.4. Mapa de radiación anual europeo.

Una vez conocidas las principales variables del emplazamiento que influyen en el cálculo del balance energético, se procede al cálculo de las producciones anuales de energía térmica y eléctrica. Para ello se han implementado las diferentes ecuaciones halladas y descritas en los capítulos anteriores que describen el comportamiento óptico, térmico y eléctrico del sistema híbrido térmico/fotovoltaico.

Las principales ecuaciones que intervienen en los diferentes aspectos de cálculo son: (2.29), (5.25), (6.34), (6.35), (6.36), (6.46) y (6.49). El proceso de cálculo sigue la siguiente estructura:

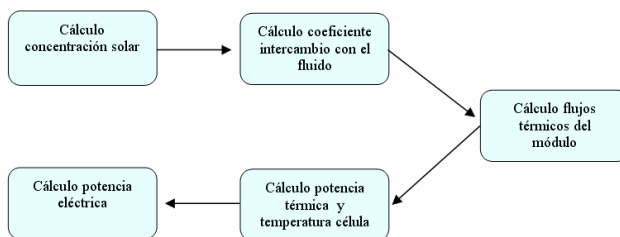


Figura 7.5. Esquema proceso de cálculo

Calculándose la potencia eléctrica a partir de la siguiente expresión

$$\text{Potencia}_{\text{eléc}} = \tau_{\text{vidrio}} G_{\text{concentrada}} \eta_{\text{células}} A_{\text{células}} \tag{7.1}$$

## 7.2. RESULTADOS

Tras las simulaciones realizadas, en este apartado se describen las variables que caracterizan el sistema híbrido desde el punto de vista del balance energético.

En primer lugar se van a graficar los parámetros referentes a la producción eléctrica y térmica. Es importante en este tipo de representaciones especificar la dimensión de referencia, es decir, si la producción energética es del módulo, es por m<sup>2</sup> de células fotovoltaicas o es por m<sup>2</sup> de superficie del concentrador.

La unidad temporal que se ha considerado explica con mayor claridad el comportamiento del módulo PVT y que no enmascara los datos instantáneos es la semana. Aunque posteriormente se mostrarán agregados mensuales, ya que es el formato más usual presentado por los diferentes sistemas solares, y a partir del cual se realizarán las comparaciones.

## 7.2.1. PRODUCCIÓN ENERGÉTICA

### 7.2.1.1. Energía producida por módulo (0,01 m<sup>2</sup>)

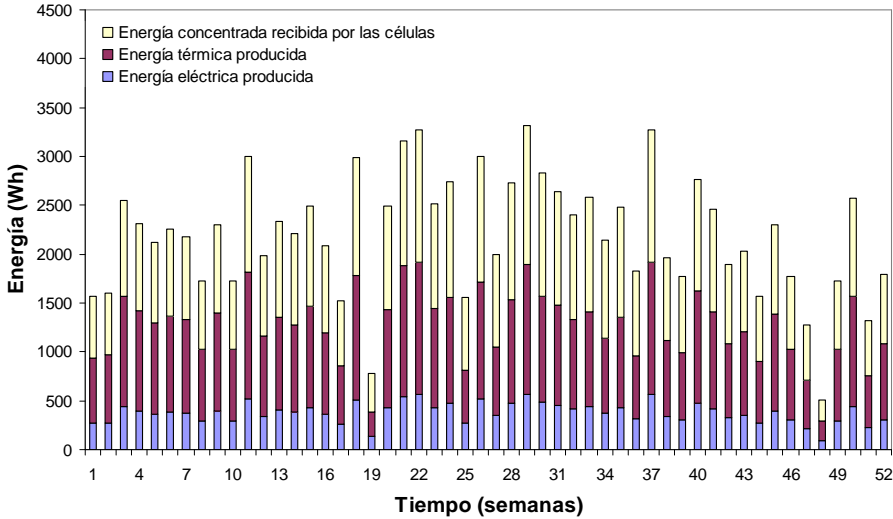


Figura 7.6. Producción energética del módulo PVT.

Cada columna muestra 3 valores diferentes: la energía eléctrica producida, la energía térmica producida y la energía directa concentrada que reciben las células. De esta forma se permite identificar que la proporción de la energía que les llega a las células se transforma en calor y en electricidad. La altura de cada una de las tres partes de la columna significa el valor de la variable que representan.

Las semanas 17, 19 y 48 presentan unos datos de producción muy bajos que se corresponden a unos datos de radiación solar muy bajos, tal y como se aprecia en las figuras 7.2 y 7.3.

La producción anual por módulo de energía térmica es de 68,10 kWh y la producción anual eléctrica es de 21,50 kWh. El valor de la energía total producida en un año es entonces de 89,60 kWh.

### 7.2.1.1. Energía producida por m<sup>2</sup> de superficie de células

En este subapartado se redefine el gráfico anterior de forma que se han transformado los valores de producción energética, a la energía que se produciría en 1 m<sup>2</sup> de módulo PVT. De forma análoga a la elaboración de estos resultados, se podría mostrar la energía producida por m<sup>2</sup> de concentrador. Se ha considerado información redundante el realizar un nuevo gráfico que recoja los datos de energía producida por m<sup>2</sup> de concentrador, ya que sería exactamente igual aplicándose un factor 10 de reducción en la escala del eje de ordenadas (el concentrador es 10 veces mayor que la superficie de células).

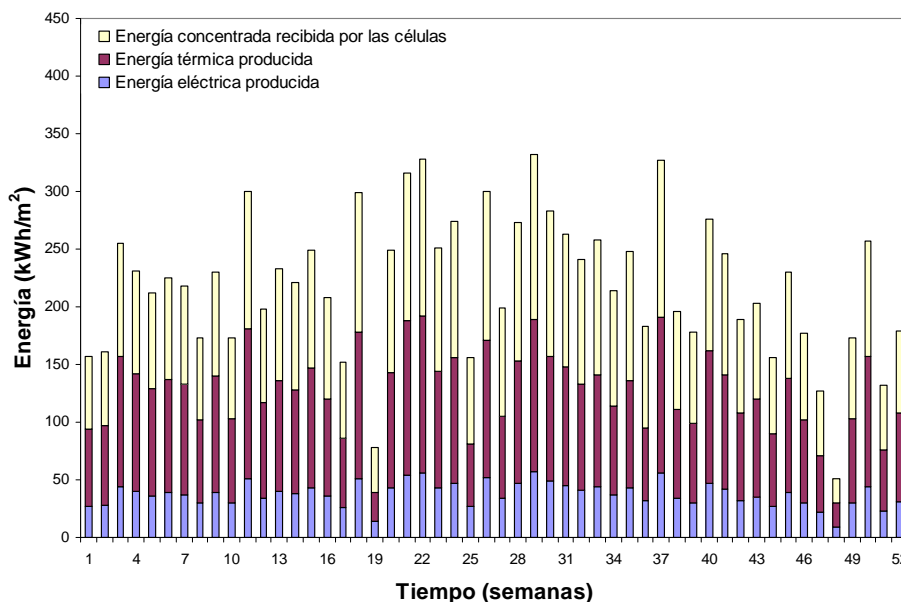


Figura 7.7. Producción energética por m<sup>2</sup> de módulo PVT.

La generación anual de energía térmica y eléctrica es de 6810 kWh/m<sup>2</sup> y de 2150 kWh/m<sup>2</sup> respectivamente, resultando un sumatorio de 8960 kWh/m<sup>2</sup>. Para la situación de referencia respecto del concentrador los valores se calculan reduciendo un orden de magnitud, es decir la energía total producida en un año por m<sup>2</sup> de concentrador es 896 kWh/m<sup>2</sup><sub>concentrador</sub>.

### 7.2.1. POTENCIA Y EFICIENCIA

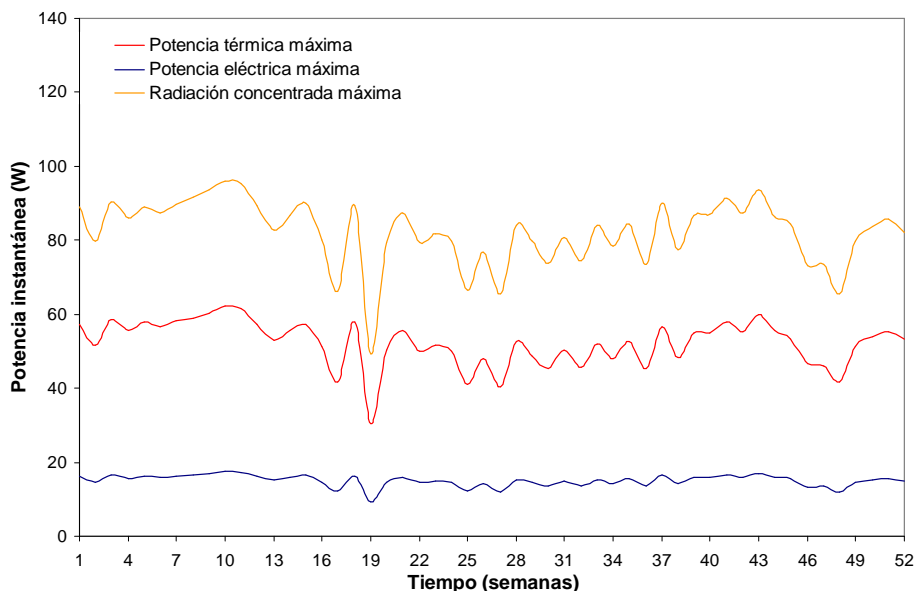


Figura 7.8. Potencias instantáneas máximas por semana del módulo PVT.

En este gráfico se muestra la evolución de los valores máximos semanales de la potencia eléctrica, la potencia térmica y la radiación solar directa concentrada que reciben las células fotovoltaicas.

En los perfiles se aprecia, que al igual que se ha comentado anteriormente, los valores máximos en las semanas 17, 19 y 48 son menores que la tendencia que presentan anualmente, debido a un déficit radiativo.

Los picos máximos instantáneos anuales son 62,20 W de potencia térmica y 17,43 W de potencia eléctrica.

La eficiencia global del sistema alcanza unos valores máximos semanales de en torno al 82%, que es algo superior al rendimiento máximo de los colectores térmicos de alta calidad actuales.

El rendimiento promedio semanal varía entre valores algo superiores al 40% y en torno al 75 %, con un valor promedio anual del 61,75 %.

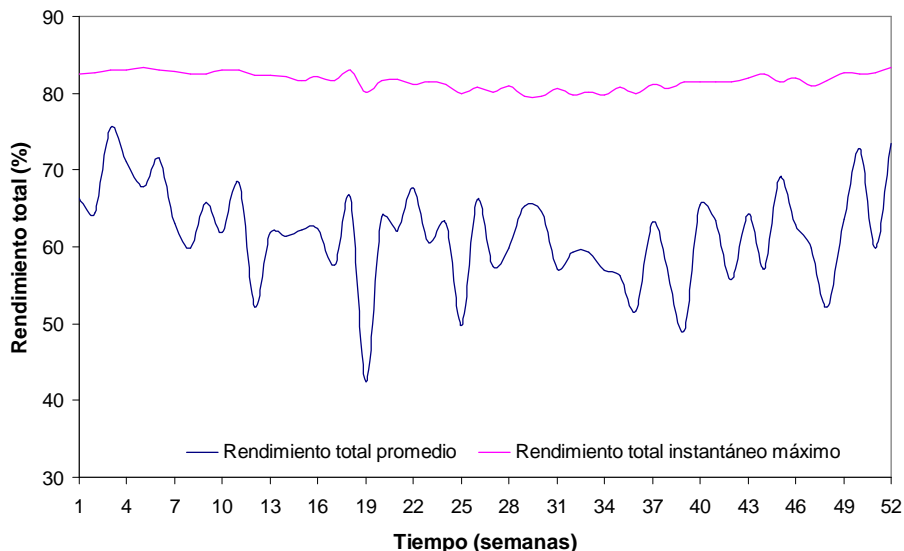


Figura 7.9. Rendimiento total promedio y rendimiento instantáneo máximo semanal.

## 7.2.1. COMPARACIÓN CON SISTEMAS SOLARES ESTÁNDAR DE PRODUCCIÓN TÉRMICA Y FOTOVOLTAICA

### 7.2.1.1. Comparación con un sistema fotovoltaico plano

Tal y como se ha mencionado con anterioridad los datos de producción con mayor concreción que se presentan en descripciones técnicas de sistemas fotovoltaicos son los agregados mensuales por kilovatio pico. La potencia pico es la producción máxima del módulo fotovoltaico, medida en condiciones estándar. Las condiciones estándar de medida (CEM) son a una temperatura de célula de 25 °C, AM 1,5 e irradiancia global de 1000 W/m<sup>2</sup>. En el caso de los módulos fotovoltaicos planos el protocolo de medida y definición de la potencia pico está perfectamente acotado, pero no sucede así con los módulos fotovoltaicos de concentración (no hay definido hasta el momento ningún estándar de medida de potencia en módulos fotovoltaicos de concentración). Los módulos que trabajan en condiciones de concentración solar no aprovechan toda la radiación que reciben, por esto la definición de potencia pico como la producida a una irradiancia global de 1000 W/m<sup>2</sup>, en el caso de tratarse de módulos de concentración debería matizarse. Se realiza una transformación de la potencia pico considerando que la radiación que aprovechan los sistemas de concentración en unos



términos generales es de un 75% de la radiación global, por lo que el factor de conversión aplicado es de  $0,75^{-1}$ .

$$Potencia_p [kW_p]_{concentrada} = \frac{Potencia_p [kW_p]_{estandar}}{0.75} \quad (7.2)$$

Para realizar la comparación se ha utilizado la herramienta PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) facilitada a través de internet por el JRC (Joint Research Centre) de la Comisión Europea. La aplicación informática dispone de varias entradas a especificar por el usuario:

- Emplazamiento: Almería.
- Orientación del módulo óptima:  $33^\circ$  (calculada por el programa).
- Pérdidas de sistema estimadas (inversor...): 0% (para comparar módulo a módulo).
- Potencia pico fotovoltaica: 1kWp.
- Mostrar resultados en el caso de sistema estacionario y con seguimiento en dos ejes.

El programa utiliza dos tipos de pérdidas definidas en función del emplazamiento:

- Pérdidas estimadas debido a la temperatura: 9,7% (utilizando los datos locales de la temperatura ambiente).
- Pérdidas estimadas debido a efectos angulares de reflectancia: 2,7%,

En el caso del módulo PVT estas pérdidas se cuantifican según la ecuación de dependencia del rendimiento con respecto a la temperatura de célula (Marion, 2002) y de la función de cálculo de la concentración (concentración efectiva considerando las diferentes pérdidas).

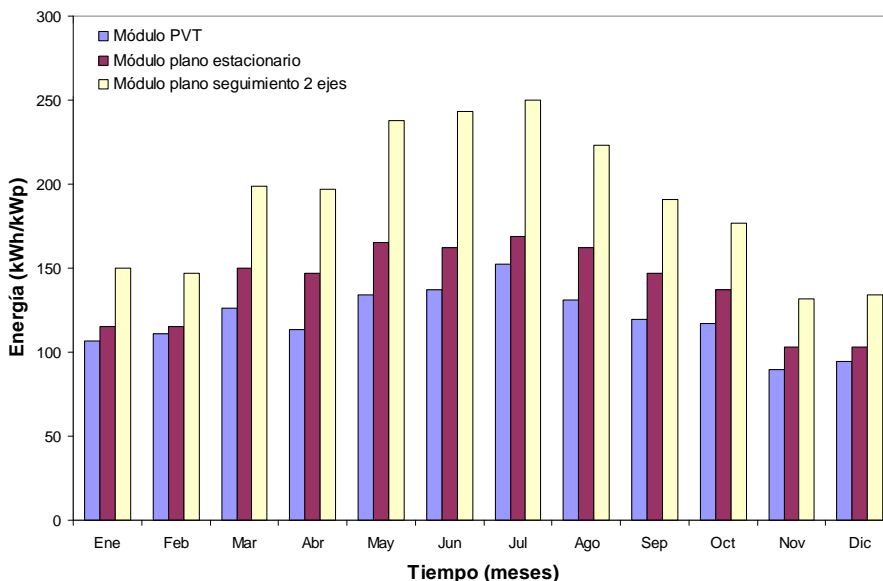


Figura 7.10. Comparación de energía eléctrica producida por el módulo PVT vs módulo plano estándar.

Por la configuración del sistema en la que el concentrador primario permanece estático, la comparación para poder estimar o posicionar el sistema PVT dentro de los sistemas fotovoltaicos más usuales es con la tipología estacional. La energía que reciben la superficie del concentrador y la superficie del módulo plano fotovoltaico es la misma, no sucediendo así en el caso de un sistema con seguimiento en dos ejes (diferencia que se aprecia claramente en la gráfica).

La energía producida por el sistema PVT, 1433,27 kWh/kW<sub>p</sub>/año, no difiere en gran medida de la que produce un sistema fotovoltaico plano estacionario, 1675 kWh/kW<sub>p</sub>/año. Esta diferencia negativa hacia el sistema PVT (14,43%) se debe a efectos inevitables en un sistema híbrido de concentración, el primero de ellos es que la temperatura de las células es superior a la de un sistema plano, debido a las elevadas densidades de flujo y a que para poderse obtener un aprovechamiento térmico se requiere un salto térmico y una temperatura media mayor a la de trabajo de las células en sistemas convencionales. Otra de las razones es que en el sistema PVT que se ha presentado se utilizan dos elementos ópticos (primario y secundario), por lo que las pérdidas debidas a los mismos son ostensiblemente superiores que las pérdidas ópticas

que sufre un sistema plano estándar (cuantificadas en el PVGIS por un 2,7 %) cuando el sistema no se encuentra en eje con el Sol.

### 7.2.1.2. Comparación con un sistema térmico plano

Para comparar los resultados desde el aspecto térmico el procedimiento que se ha utilizado es realizar una simulación con TRNSYS seleccionando un colector térmico plano teórico, type 73 (ver apéndice C), tomándose la base de datos climáticos de Almería.

De los parámetros que el colector tiene definidos como iniciales, se han modificado la inclinación (inclinación con un ángulo igual a la latitud) y la superficie de captador ( $1 \text{ m}^2$ ).

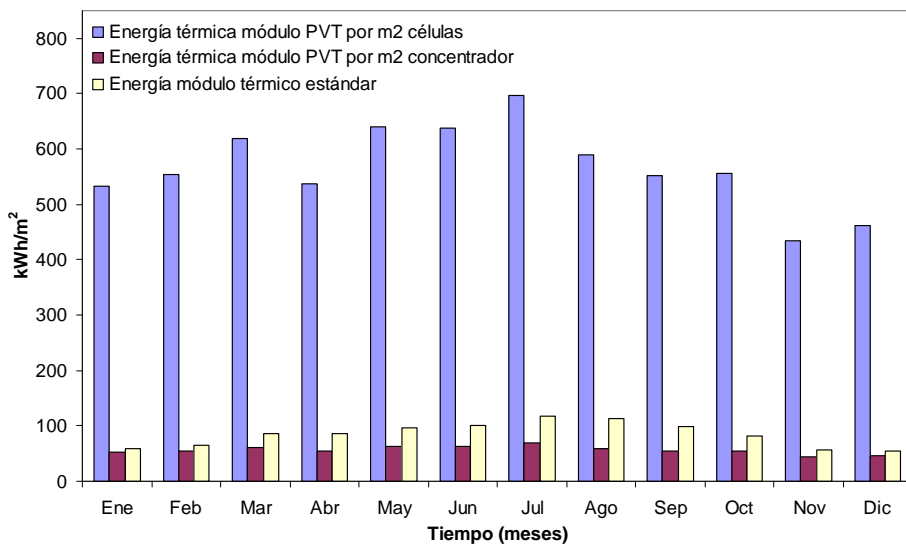


Figura 7.11. Detalle comparación de producciones por  $\text{m}^2$  de concentrador.

De los resultados obtenidos, la producción térmica por  $\text{m}^2$  de células es altamente superior debido a la concentración solar. Sin embargo, la energía térmica producida por el sistema híbrido en referencia al  $\text{m}^2$  de concentrador es menor que la producida por el colector teórico.

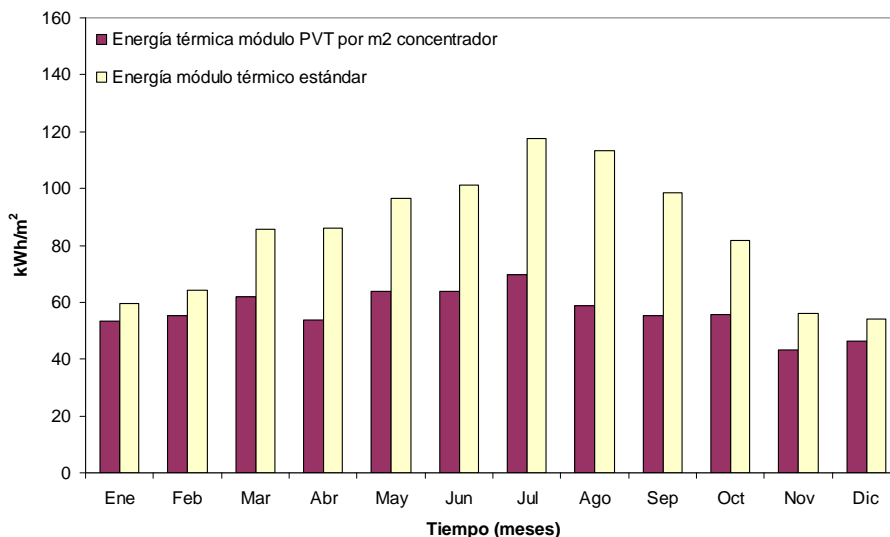


Figura 7.12. Comparación de producciones por m<sup>2</sup> de concentrador.

La producción térmica anual del colector PVT es de 680,99 kWh/m<sup>2</sup> de concentrador, mientras que la del colector plano teórico es de 1014,61 kWh/m<sup>2</sup>. Esto supone una diferencia de un 32,88%, explicada por los argumentos que se exponen a continuación.

Para la misma inclinación y orientación en el mismo emplazamiento (ambos sistemas simulados en TRNSYS) el sistema de panel plano térmico recibe sobre su superficie la misma cantidad de radiación solar que recibe la lente de Fresnel. Teniendo en cuenta la porción de cielo que ve el sistema concentrador secundario (ángulo de media aceptación del CPC de 30° en el sentido de crecimiento de los prismas) con respecto al panel plano; la proporción de radiación que reciben las células fotovoltaicas en relación a la que recibe el absorbedor térmico estándar es menor. Al contar el sistema PVT con dos elementos concentradores las pérdidas ópticas resultantes son mayores.

Además de este aspecto es importante señalar que el módulo térmico teórico, tal y como sucede en la gran mayoría de sistemas térmicos, tiene su absorbedor preparado para conseguir una alta absorción (recubrimiento selectivo). Sin embargo, en el caso del sistema PVT el absorbedor son las células fotovoltaicas, con menor absorptividad que, por ejemplo, el óxido de titanio.

La última de las apreciaciones que explican esta diferencia de producción de energía térmica es que en el caso del sistema híbrido las células fotovoltaicas capturan

un porcentaje de radiación incidente igual a su rendimiento de conversión, por lo que la radiación que se convierte en calor queda reducida es este porcentaje.

En definitiva, el sistema PVT analizado independientemente en relación a la energía térmica y eléctrica producida, obtiene unos resultados que no superan a los sistemas convencionales. No obstante, alcanzan unos valores que no son altamente diferentes.

Si se analiza el sistema en su eficiencia global, los valores obtenidos son similares o superiores a los de los colectores térmicos de los sistemas estándar, aspecto que junto a la facilidad y adaptabilidad para la integración arquitectónica, le confiere una ventaja competitiva dentro de los sistemas de generación solares.

La energía utilizable o exergía (parámetro que informa sobre la calidad de la energía transmitida y las irreversibilidades asociadas a dicha transmisión) de un sistema en un cierto estado inicial es el máximo trabajo útil que puede obtenerse del sistema hasta que alcance el equilibrio con el medio ambiente; en la energía mecánica y eléctrica todo es exergía, pero en la energía térmica ello no es así, ya que hay una parte de energía que siempre se pierde. Por lo tanto globalmente, desde un punto de vista exegético el sistema PVT supera a los sistemas solares convencionales de mayor rendimiento (térmicos).

# Capítulo 8

## Conclusiones

---

En la actualidad, un concepto que está adquiriendo una gran relevancia es la integrabilidad arquitectónica. Los sistemas PVT, en su gran mayoría tienen una baja respuesta a este aspecto, ya que por sus dimensiones prácticamente sólo pueden ser emplazados en azoteas. Una posibilidad directa de solucionar este problema es reducir las dimensiones del concentrador y, para mantener la concentración, el absorbedor. Las dimensiones del sistema se pueden variar según la disponibilidad de espacio y/o los requerimientos solicitados, siempre y cuando el receptor se sitúe a una distancia de 1,5 veces el diámetro de la lente cuando éste se encuentre en eje con el Sol. La constitución del prototipo permite la fácil integración del mismo tanto en fachadas, tejados o cubiertas.

De las diferentes configuraciones ópticas estudiadas, el sistema propuesto opta por una lente de Fresnel arqueada y con simetría lineal estacionaria y de un secundario con seguimiento constituido por un CPC. La concentración que alcanza el sistema puede variar en un rango de entre 10 y 26,67X, dependiendo fundamentalmente de la aceptación que se le de al secundario y de la tolerancia que se pretenda conseguir con el sistema de seguimiento. En el caso analizado, para una concentración geométrica de 10X, se alcanzan unos valores máximos en concentración simulada con el OptiCad de 9,9 cuando el sistema está en eje con el Sol y de 7,7 para la situación más negativa.

La lente de Fresnel se ha optimizado para refractar la radiación solar hacia el secundario de forma que las pérdidas en situaciones fuera de eje sean mínimas (5,45% de pérdidas relativas máximas).

También se han estudiado diferentes configuraciones para el secundario, determinándose que el CPC es la mejor opción fundamentalmente por la aceptación del sistema y por la buena uniformidad del haz sobre el receptor que se produce. (Error cuadrático medio (ECM) inferior a  $0,002 \text{ W/cm}^2$ ).

En el final del capítulo 2 se ha optimizado para el mejor aprovechamiento energético la trayectoria del secundario en el seguimiento solar, obteniéndose un polinomio en función de los ángulos de incidencia solar respecto la dirección longitudinal ( $\psi$ ) y respecto a la longitud transversal ( $\theta$ ). Asimismo se han representado los mapas de concentración efectiva según los ángulos de incidencia en este dispositivo.

El sistema refrigerador que se presenta está constituido por un tubo de aluminio comercial de sección rectangular con relación de aspecto 2.43. De esta forma se facilita la disminución de costes y aprovisionamiento de materiales, además de obtenerse un número de Nusselt mayor que para el caso de tubos de sección circular. Para un Reynolds de 194.12 el número de Nusselt es de 7. Se conoce empíricamente que secciones rectangulares tienen Nusselts mayores que las secciones circulares o cuadradas. (Considerándose la relación de aspecto ( $\alpha$ ) de la sección como el cociente entre la longitud mayor y la menor del rectángulo, cuanto más grande sea  $\alpha$  mayor será el intercambio que se produce con el fluido).

En el apartado térmico se ha simulado por el método de volúmenes finitos, en el software CFD Fluent, el intercambio térmico en el interior del absorbedor analizando la evolución de las temperaturas del interior del tubo para unos valores de flujo térmico.

Con los valores de los coeficientes de intercambio térmico hallados en la simulación se ha podido evaluar la curva característica del módulo como captador térmico resultando un valor de la pendiente de  $14,667 \text{ W/m}^2\text{K}$  y con una ordenada en el origen igual a 0,65. El procedimiento de evaluación se ha desarrollado construyendo una malla de resistencias térmicas que caracterizan el colector.

En el capítulo de balance energético se ha realizado la comparativa de producción del sistema respecto un sistema fotovoltaico estacionario en una ubicación y un año determinados, para poder apreciar las diferencias que presentan. Los resultados muestran que la producción eléctrica anual en las circunstancias estudiadas es de un 14,43% inferior. Esta diferencia se debe a efectos inevitables en un sistema híbrido de concentración, el primero de ellos es que la temperatura de las células es superior a la de un sistema plano, debido a las elevadas densidades de flujo y a que para poderse obtener un aprovechamiento térmico se requiere un salto térmico y una temperatura media mayor a la de trabajo de las células en sistemas convencionales. Otra de las razones es que en el sistema PVT que se ha presentado se utilizan dos elementos ópticos (primario y secundario), por lo que las pérdidas debidas a los mismos son ostensiblemente superiores a las pérdidas ópticas que sufre un sistema plano estándar (cuantificadas en el PVGIS por un 2,7 %) cuando el sistema no se encuentra en eje con el Sol.

Se ha realizado también, y en iguales condiciones, la comparación de producciones térmicas respecto a un sistema de colector plano teórico definido por Trnsys. En esta ocasión la diferencia entre producciones anuales es de un 32,88%, explicada por los argumentos que se exponen a continuación.

Para la misma inclinación y orientación en el mismo emplazamiento (ambos sistemas simulados en TRNSYS) el sistema de panel plano térmico recibe sobre su superficie la misma cantidad de radiación solar que recibe la lente de Fresnel. Teniendo en cuenta la porción de cielo que ve el sistema concentrador secundario (ángulo de media aceptación del CPC de  $30^\circ$  en el sentido de crecimiento de los prismas) con respecto al panel plano; la proporción de radiación que reciben las células fotovoltaicas en relación a la que recibe el absorbedor térmico estándar es menor. Al contar el sistema PVT con dos elementos concentradores las pérdidas ópticas resultantes son mayores.



Además de este aspecto es importante señalar que el módulo térmico teórico, tal y como sucede en la gran mayoría de sistemas térmicos, tiene su absorbedor preparado para conseguir una alta absorción (recubrimiento selectivo). Sin embargo, en el caso del sistema PVT el absorbedor son las células fotovoltaicas, con menor absorción que, por ejemplo, el óxido de titanio.

La última de las apreciaciones que explican esta diferencia de producción de energía térmica es que en el caso del sistema híbrido las células fotovoltaicas capturan un porcentaje de radiación incidente igual a su rendimiento de conversión, por lo que la radiación que se convierte en calor queda reducida en este porcentaje.

Si se analiza el sistema en su eficiencia global, los valores obtenidos son similares o superiores a los de los colectores térmicos de los sistemas estándar, aspecto que junto a la facilidad y adaptabilidad para la integración arquitectónica, le confiere una ventaja competitiva dentro de los sistemas de generación solares.

## **Ámbitos de aplicación**

El campo de aplicación del sistema desarrollado en la tesis es el de la integración en edificios del sistema híbrido de concentración solar. Dada su versatilidad y modularidad puede ser efectivo para su uso en un entorno industrial, o con las adaptaciones pertinentes constituyendo una central solar.

## **Actuaciones futuras**

La primera y más importante de las acciones futuras a desarrollar, y en la que actualmente el grupo está involucrado en conseguir la financiación necesaria, es la construcción de un primer dispositivo industrial del sistema. En este prototipo se deberían incluir unos sistemas electrónico y mecánico que posibiliten el seguimiento descrito mediante las funciones halladas en la tesis.

Derivado de esta construcción, el paso siguiente sería el de caracterizar y reoptimizar en campo el sistema en funcionamiento.

Estas dos acciones, junto con el desarrollo de los diferentes métodos de caracterización desarrollados en la presente tesis, constituyen material idóneo para la realización de una nueva tesis doctoral.

# Bibliografía

---

---

- [1] Agostini, B., Fabbri, M., Park, J.E., Wojtan, L., Thome, J.R., Michel, B. State of the art of high heat flux cooling technologies. *Heat Transfer Engineering*, 28, 258-281, 2007.
- [2] Aguilar, J.D. Sitio web como herramienta de apoyo a la docencia de sistemas fotovoltaicos. *VI Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica*, Valencia, 2004.
- [3] Akbarzadeh, A., Wadowski, T. Heat pipe-based cooling systems for photovoltaic cells under concentrated solar radiation, *Applied Thermal Engineering*, 16(1), 81-87, 1996.
- [4] Andersen, M., Michel, L., Roecker, C., Scartezzini, J.L. Experimental assessment of bi-directional transmission distribution functions using digital imaging techniques. *Energy and Buildings*, 33 (5), 417-431, 2001.
- [5] Andersen, M., Rubin, M., Scartezzini, J.L. Comparison between ray-tracing simulations and bi-directional transmission measurements on prismatic glazing. *Solar Energy*, 74 (2), 157-173, 2003.
- [6] Araki, K., Uozumi, H., Yamaguchi, M. A simple passive cooling structure and its heat analysis for 500 X concentrator PV module. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1568-1571, 2002.
- [7] Arqueros, F., Jiménez, A., Valverde, A. A novel procedure for the optical characterization of solar concentrators. *Solar Energy*, 75 (2), 135-142, 2003.
- [8] Ballestrín, J., Monterreal, R. Hybrid heat flux measurement system for solar central receiver evaluation. *Energy*, 29 (5-6), 915-924, 2004.
- [9] Boettner, E.A., Barnett, N.E. Design and Construction of Fresnel Optics for Photoelectric Receivers. *Journal of the Optical Society of America*, 41, 849-849, 1951.
- [10] Brinkworth, B.J., Marshall, R.H., Ibarahim, Z. A validated model of naturally ventilated PV cladding. *Solar Energy*, 69, 67-81, 2000.
- [11] Brogren, M. *Low-Concentrating Photovoltaic Systems with Parabolic Reflectors*, Licentiate Thesis, Division of Solid State Physics, Uppsala University, 2001.

- [12] Brogren, M., Nostell, P., Karlsson, B. Optical Efficiency of a PV-Thermal Hybrid CPC Module. *Eurosun 2000 - ISES Europe Solar Conference*, Copenhagen, 2000.
- [13] Brogren, M., Karlsson, B. Low-concentrating water-cooled PV-thermal hybrid systems for high latitudes. *29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, May 19-24 2002*, New Orleans, LA, United States, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1733-1736, 2002.
- [14] Brunotte, M., Goetzberger, A., Blieske, U. Two-stage concentrator permitting concentration factors up to 300X with one-axis tracking. *Solar Energy*, 56, 285-300, 1996.
- [15] Chemisana, D., Barrau, J., Ibáñez, M. Comparison of Fresnel concentrators for building integrated photovoltaics. Accepted in: *Energy Conversion and Management, 2008*.
- [16] Chemisana, D., Barrau, J., Rosell, J.I., Ibáñez, M. Performance of a concentrating pv-thermal system for domestic heating and cooling. *Eurosun 2006 - ISES Europe Solar Conference*, Glasgow, 2006.
- [17] Chemisana, D., Ibáñez, M., Abdel Mesih, B., Rosell, J.I. Effect of a secondary concentrator on the Si solar cell electrical parameters. *In proceedings of the International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen, El Escorial, 2007*.
- [18] Chenlo, F., Cid, M. Linear concentrator photovoltaic module: analysis of non-uniform illumination and temperature effects on efficiency. *Solar Cells*, 38, 27-39, 1986.
- [19] Chong, S.H., Ooi, K. T. Wong, T. N. Optimisation of single and double layer counter flow microchannel heat sinks. *Applied Thermal Engineering*, 22, 1569-1585, 2002.
- [20] Churchill, S.W., Ozoe, H. Correlations for forced convection with uniform heating in flow over a plate and in developing and fully developed flow in a tube. *Journal of Heat Transfer*, 95, 78-84, 1973.
- [21] Colgan, E.G., Furman, B., Gaynes, M., Graham, W.S., LaBianca, N.C., Magerlein, J.H., Polastre, R.J., Rothwell, M.B., Bezama, R.J., Choudhary, R., Marston, K.C., Toy, H., Wakil, H.J., Zitz, J.A., Schmidt, R.R. A practical implementation of silicon microchannel coolers for high power chips. *IEEE*

- Transactions on Components and Packaging Technologies*, 30, 218-225, 2007.
- [22] Colgan, E.G., Furman, B., Gaynes, M.,N. LaBianca, Magerlein, J.H., Polastre, R., Bezama, R., Marston, K., Schmidt, R. High performance and subambient silicon microchannel cooling. *Journal of Heat Transfer*, 129, 1046-1051, 2007.
- [23] Collares-Pereira, M. High temperature solar collector with optimal concentration: Non-focusing Fresnel lens with secondary concentrator. *Solar Energy*, 23, 409-420, 1979.
- [24] Collares-Pereira, M., Rabl, A., Winston, R. Lens-mirror combinations with maximal concentration. *Applied Optics*, 16(10), 2677-2683, 1977.
- [25] Coventry, J.S. Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector. *Solar Energy*, **78**, 211-222, 2005.
- [26] Coventry, J.S., Lovegrove, K. Development of an approach to compare the 'value' of electrical and thermal output from a domestic PV/thermal system. *Solar Energy*, 75, 63-72, 2003.
- [27] Duffie, J.A., Beckman, W. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Ltd., 1991.
- [28] Edenburn, M.W. Active and passive cooling for concentrating photovoltaic arrays. *In Conference Record, 14th IEEE PVSC*, 776-776, 1980.
- [29] Eicker, U. *Solar technologies for buildings*. John Wiley & Sons Ltd., 2003.
- [30] Erismann, F. Design of plastic aspheric Fresnel lens with a spherical shape. *Optical Engineering*, 36(4):988-991, 1997.
- [31] Feldman, K.T., Kenney, D.D., Edenburn, M.W. A passive heat pipe cooled photovoltaic receiver. *Conference record, 15th IEEE PVSC*, 1981.
- [32] Florschuetz, L.W. On heat rejection from terrestrial solar cell arrays with sunlight Concentration. *In Conference Record, 11th IEEE PVSC*, 318-326, 1975.
- [33] FLUENT™ 6.0 User's Guide," FLUENT Inc., 2001.
- [34] Fraidenraich, N. Design Procedure of V-trough Cavities for Photovoltaic Systems. *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, 6, 43-54, 1998.
- [35] Friedman, R.P., Gordon, J.M., Ries, H. Compact high-flux two-stage solar collectors based on tailored edge-ray concentrators. *Solar Energy*, 56, 607-615, 1996.
- [36] Friedman, R.P., Gordon, J.M., Ries, H. New high-flux two-stage optical designs for parabolic solar concentrators. *Solar Energy*, 51, 317-325, 1993.

- [37] Garg, H.P., Adhikari, R.S. Performance analysis of a hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector with integrated CPC troughs. *International Journal of Energy Research*, 23, 1295-1304, 1999.
- [38] Garg, H.P., Agarwal, R.K., Bhargava, A.K. The effect of plane booster reflectors on the performance of a solar air heater with solar cells suitable for a solar dryer. *Energy Conservation and Management*, 32, 543-554, 1991.
- [39] Garg, H.P., Agarwal, R.K., Joshi, J.C. Experimental study on a hybrid photovoltaic thermal solar water heater and its performance predictions. *Energy Conversion & Management*, 35, 621-633, 1994.
- [40] Garimella, S.V., Singhal, V. Single-phase flow and heat transport and pumping considerations in microchannel heat sinks. *Heat Transfer Engineering*, 25, 15-25, 2004.
- [41] Gordon, J.M. Simple string construction method for tailored edge-ray concentrators. *Solar Energy*, 56, 279-284, 1996.
- [42] Gordon, J.M., Ries, H. Tailored edge-ray concentrators as ideal second stages for Fresnel reflectors. *Applied Optics*, 32, 2243-2251, 1993.
- [43] Hamdy, M.A., Luttmann, F., Osborn, D. Model of a Spectrally Selective Decoupled Photovoltaic/Thermal Concentrating System. *Applied Energy*, 30, 209-225, 1998.
- [44] Harms, T.M., Kazmierczak, M. J., Gerner, F. M. Developing convective heat transfer in deep rectangular microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 20, 149-157, 1999.
- [45] Hetsroni, G., Mosyak, A., Segal, Z., Ziskind, G. A uniform temperature heat sink for cooling of electronic devices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 3275-3286, 2002.
- [46] Hong, F.J., Cheng, P., Ge, H., Joo, G.T. Conjugate heat transfer in fractalshaped microchannel network heat sink for integrated microelectronic cooling application. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 4986-4998, 2007.
- [47] Ibañez M, Rosell JI. Modelling power output in photovoltaic modules for outdoor operating conditions. *Energy Conversion and Management*, 47(15-16), 2424-2430, 2006.
- [48] Ibañez, M., Rosell, J.R., Rosell, J.I.. *Tecnología solar*, Ed. Mundi-Prensa, Lleida,

- 2004.
- [49] Imenes, A.G., Mills, D.R. Spectral Beam Splitting for Increased Conversion Efficiency in Solar Concentrating Systems. *ANZSES Solar Energy Conference*, Newcastle, 2002.
- [50] Incropera, F.P., DeWitt, D.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons Ltd., 1996.
- [51] James, L.W., Williams, J.K. Fresnel optics for solar concentration on photovoltaic cells. *13<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 673-679, 1978.
- [52] Jang, S.P., Kim, S. J., Paik, K. W. Experimental investigation of thermal characteristics for a microchannel heat sink subject to an impinging jet, using a microthermal sensor array. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 105, 211-224, 2003.
- [53] Jones, S.A., Gruetzner, J.K., Houser, R.M., Edgar, R.M., Wendelin, T. J. VSHOT Measurement Uncertainty and Experimental Sensitivity Study. *Proceedings of the 32<sup>nd</sup> IECEC, Honolulu, HI.*, 1997.
- [54] Kammel, S. Deflectometry for Quality Control of Specular Surfaces. *Tech. Mess.*, 70, 193–198, 2003.
- [55] Kim, S.J. Methods for thermal optimization of microchannel heat sinks. *Heat Transfer Engineering*, 25, 37-49, 2004.
- [56] Koehler, H.C. Cooling photovoltaic (PV) cells during concentrated solar radiation in specified arrangement in coolant with as low electric conductivity as possible. Germany DE19904717, 2000.
- [57] Kritchman, E.M. Two-stage linear Fresnel lenses. *Solar Energy*, 33(1), 35-39, 1984.
- [58] Kritchman, E.M., Friesem, A.A., Yekutieli, G. Efficient Fresnel Lens for solar concentration. *Solar Energy*, 22, 119-123, 1979.
- [59] Kritchman, E.M., Friesem, A.A., Yekutieli, G. Highly concentrating Fresnel lenses. *Applied Optics*, 18(15): 2688-2695, 1979.
- [60] Lasich, J.B. Apparatus for separating solar radiation into longer and shorter wavelength components. Australian Patent 731,495, 29, 2001.
- [61] Lasich, J.B. Cooling circuit for receiver of solar radiation. United States US 2004/0103680, 2004.
- [62] Launay, S., Sartre, V., Lallemand, M. Experimental study on silicon micro-heat

- pipe arrays. *Applied Thermal Engineering*, 24(2–3), 233–243, 2004.
- [63] Leutz, R., Fu, L. Segmented cone concentrators: optical design. *4<sup>th</sup> International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen*, 161-164, 2007.
- [64] Leutz, R., Ries, H. Tailored Fresnel optics I: Global Shape. *In Proceedings of SPIE*, 5186, (Bellingham, Wa), 2003.
- [65] Leutz, R., Suzuki, A. *Nonimaging Fresnel Lenses. Design and performance of solar concentrators*. Ed. Springer, 2001.
- [66] Leutz, R., Suzuki, A., Akisawa, A., Kashiwagi, T. Design of a nonimaging Fresnel lens for solar concentrators. *Solar Energy*, 65(6): 379-387, 1999.
- [67] Leutz, R., Suzuki, A., Akisawa, A., Kashiwagi, T. Flux uniformity and spectral reproduction in solar concentrators using secondary optics. *ISES Solar World Congress*, 2001.
- [68] Liu, D., Garimella, S.V. Optimization of the thermal performance of microchannel heat sinks. *International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition*, Maui, Hawaii, 2003.
- [69] Lorenzo, E. Chromatic aberration effect on solar energy systems using Fresnel lenses. *Applied Optics*, 20(21): 3729-3732, 1981.
- [70] Lorenzo, E. *Solar Electricity*. Ed. Progenesa, Sevilla, 1994.
- [71] Lorenzo, E., Luque, A. Comparison of Fresnel lens and parabolic mirrors as solar energy concentrators. *Applied Optics*, 21(10), 1851-1853, 1982.
- [72] Lorenzo, E., Luque, A. Fresnel lens analysis for solar energy applications. *Applied Optics*, 20(17), 2941-2945, 1981.
- [73] Luque, A. *Solar Cells and Optics for Photovoltaic Concentration*. Adam Hilger, Bristol, 1989.
- [74] Luque, A., Lorenzo, E. Conditions for achieving ideal and lambertian symmetrical solar concentrators. *Applied Optics*, 21(20): 3736-3738, 1982.
- [75] Maccari, A., Montecchi, M. An optical profilometer for the characterisation of parabolic trough solar concentrators. *Solar Energy*, 81 (2), 185-194, 2007.
- [76] Marion, B. A method for modeling the current-voltage curve of a PV module for outdoor conditions. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications. National Renewable Energy Laboratory*, 10, 205-210, 2002.
- [77] Mathur, R.K., Mehrotra, D. R., Mittal, S., Dhariwal, S. R. Thermal



- nonuniformities in concentrator solar cells. *Solar Cells: Their Science, Technology, Applications and Economics*, 11, 175-188, 1984.
- [78] McAdams, W.H. *Heat Transmission*. McGraw Hill, 1954.
- [79] Meteonorm. [www.meteonorm.com](http://www.meteonorm.com)
- [80] Miller, O.E., McLeod, J.H., Sherwood, W.T. Thin Sheet Plastic Fresnel Lenses of High Aperture. *Journal of the Optical Society of America*, 41(11), 807-814, 1951.
- [81] Mills, D.R., Schramek, P., Dey, C., Buie, D., Imenes, A.G., Haynes, B.S., Morrison, G. Multi Tower Solar Array Project. *ANZSES Solar Energy Conference*, Newcastle, 2002.
- [82] Min, J.Y., Jang, S.P., Kim, S.J. Effect of tip clearance on the cooling performance of a microchannel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 1099-1103, 2004.
- [83] Miñano, J.C., Benítez, P., Gonzalez, J.C. RX: A non-imaging concentrator, *Applied Optics*, 34(13):2226-2235, 1995.
- [84] Miñano, J.C., Gonzalez, J.C., Zanesco, I. Flat high concentration devices *In Conference Record, 24th IEEE PVSC*, 1123-1126, 1994.
- [85] Morini, G.L. Single-phase convective heat transfer in microchannels: a review of experimental results. *International Journal of Thermal Sciences*, 43, 631-651, 2004.
- [86] Nilsson, J. *Optical Design and Characterization of Solar Concentrators for Photovoltaics*. Lund University, ISBN 91- 85147-15-X, 2005.
- [87] Ning, X., Winston, R., O'Gallenger, J. Dielectric totally internally reflecting concentrators. *Applied Optics*, 26(2), 300-305, 1987.
- [88] O'Gallagher, J., Winston, R. Test of a 'trumpet' secondary concentrator with a paraboloidal dish primary. *Solar Energy*, 36, 37-44, 1986.
- [89] O'Neil, M.J. Bi-focused solar energy concentrator. United States Patent 4069812, 1978.
- [90] O'Neil, M.J. Stretched Fresnel lens solar concentrator for space power. United States Patent 6075200, 2000.
- [91] O'Neill, M.J. Color-Mixing Lens for Solar Concentrator System and Methods of Manufacture and Operation Thereof. U.S. Patent 6,031,179, 2000.
- [92] O'Neill, M.J. Stretched Fresnel Lens Solar Concentrator for Space Power. U.S.

- Patent 6,075,200, 2000.
- [93] O'Neill, M.J. ENTECH's 20-Year Heritage and Future Plans in Photovoltaic Concentrators for Both Ground and Space Applications. *2nd International Solar Concentrator Conference for the Generation of Electricity or Hydrogen*, Alice Springs, 2003.
- [94] O'Neill, M.J. Silicon Low-Concentration, Line-Focus, Terrestrial Modules. *Chapter 10 in Solar Cells and Their Applications*, John Wiley & Sons, 1995.
- [95] O'Neill, M.J. Solar Concentrator and Energy Collection System. U.S. Patent No. 4,069,812, 1978.
- [96] O'Neill, M.J., McDanal, A.J. Photovoltaic Manufacturing Technology Improvements for ENTECH's Fourth-Generation Concentrator Systems. *NCPV Review Meeting*, 1996.
- [97] OptiCAD Corporation. OptiCAD: Optical Análisis Program – User's Guide, Versión 10.0, Opticad Corporation, Sante Fe, 2007.
- [98] Peng, X. F. and Wang, B. X., Cooling characteristics with microchanneled structures. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 1(4), 315-326, 1994.
- [99] Polytech ME, "Tutorial FLUENT/GAMBIT" 2007
- [100] PVGIS: [re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps3/pvest.php](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps3/pvest.php)
- [101] Qu, W., Mudawar, I. Experimental and numerical study of pressure drop and heat transfer in a single-phase micro-channel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 2549-2565, 2002.
- [102] Rabl, A. Comparison of solar concentrators. *Solar Energy*, 18, 93–111, 1976.
- [103] Rabl, A. Optical and thermal properties of Compound Parabolic Concentrators. *Solar energy*, 18, 497-511, 1985.
- [104] Rahman, M.M. Measurements of heat transfer in microchannel heat sinks. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 27, 495-506, 2000.
- [105] Rohsenow, W.M., Harnett, J. P., Cho, Y. I. *Handbook of Heat Transfer*, McGraw-Hill, 1998.
- [106] Rosell, J.I., Vallverdú, X., Lechón, M. A., Ibáñez, M. Design and simulation of a low concentrating photovoltaic/thermal system. *Energy Conversion and Management*, 46, 3034-3046, 2005.
- [107] Royne, A., Dey, C.J., Mills, D.R. Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: A critical review. *Solar Energy Materials and Solar*

- Cells*, 86, 451-483, 2005.
- [108] Ryu, J.H., Choi, D. H., Kim, S.J. Three-dimensional numerical optimization of a manifold microchannel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 1553-1562, 2003.
- [109] Ryu, J.H., Choi, D.H., Kim, S.J. Numerical optimization of the thermal performance of a microchannel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 2823-2827, 2002.
- [110] Sala, A.L. Cooling of solar cells. *Cells and Optics for Photovoltaic Concentration*, 1989.
- [111] Sanderson, R.W., O'Donnell, D. T., Backus, C. E. Effects of nonuniform illumination and temperature profiles on silicon solar cells under concentrated sunlight. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 431-436, 1980.
- [112] Shah, R.K., A correlation for laminar Hydrodynamic entry length solutions for circular and non circular ducts. *Journal of Fluids Engineering*, 100, 177-179, 1978.
- [113] Sharan, S.N., Kandpal, T.C. Testing of a Prototype Combined Photovoltaic-Thermal Linear Fresnel Concentrator-Receiver System. *Energy Conservation and Management*, **33**, 37-39, 1992.
- [114] Sharples, S. Full-scale measurements of convective energy losses from exterior building surfaces. *Building and Environment*. 19(1), 9-31, 1984.
- [115] Shortis, M. R., Johnston G. H. G. Photogrammetry: An Available Surface Characterization Tool for Solar Concentrators, Part I: Measurement of Surfaces. *ASME J. of Solar Energy Engineering*, 118, 146-150, 1996.
- [116] Shortis, M. R., Johnston G. H. G. Photogrammetry: An Available Surface Characterization Tool for Solar Concentrators, Part II: Assessment of Surfaces. *ASME J. of Solar Energy Engineering*, 119, 286-291, 1997.
- [117] Solanki, C.S., Pimpalkar, P., Bhandari, J.V. PV Concentrator Systems – A Database Search. *International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity and Hydrogen*, 2005.
- [118] Sparrow, E.M., Nelson, J.S., Tao, W.Q. Effect of leeward orientation, adiabatic framing surfaces, and eaves on solar-collector-related heat transfer coefficients. *Solar Energy*. 29(1), 33-41, 1982.
- [119] Steffen Ulmer, S., Heller, P., Reinalter, W. Slope Measurements of Parabolic

- Dish Concentrators Using Color-Coded Targets. *ASME J. of Solar Energy Engineering*, 130, 2008.
- [120] Sung, M.K., Mudawar, I. Correlation of critical heat flux in hybrid jet impingement/micro-channel cooling scheme. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 2663-2672, 2006.
- [121] Sung, M.K., Mudawar, I. Experimental and numerical investigation of singlephase heat transfer using a hybrid jet-impingement/micro-channel cooling scheme. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 682-694, 2006.
- [122] Swanson, R.M. Photovoltaics Concentrators. *Chapter 11, in Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*,. Ed John Wiley & Sons, Ltd., 2003.
- [123] Swanson, R.M. Promise of concentrators. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 8, 93-111, 2000.
- [124] Tag, T. The Early Development of the Fresnel Lens. Reprinted from the *U. S. Lighthouse Society's The Keeper's Log*, 2005.
- [125] Taver'yanovich, E.V. Profiles of solar-engineering Fresnel lenses. *Applied Solar Energy*, 19(6), 36-39, 1984.
- [126] Terao, A., Mulligan, W.P., Daroczi, S.G., Pujol, O.C., Verlinden, P.J., Swanson, R.M., Miñano, J.C., Benitez, P., Alvarez, J.L. A mirror-lens design for micro-concentrator modules. *In Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Anchorage, Alaska, September 2000.
- [127] Tonui, J.K., Tripanagnostopoulos, Y. Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renewable Energy* 32(4), 623–637, 2007.
- [128] Tripanagnostopoulos, Y., Nousia, Th., Souliotis, M., Yianoulis, P. Hybrid photovoltaic/thermal solar systems. *Solar Energy*, 72, 217–234, 2002.
- [129] TRNSYS™ 16 User's guide.
- [130] Tuckerman, D.B., Pease, R.F.W. High-performance heat sinking for VLSI. *Electron Device Letters*, EDL-2, 26-129, 1981.
- [131] Vafai, K., Zhu, L. Analysis of two-layered micro-channel heat sink concept in electronic cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 2287-2297, 1999.
- [132] Verlinden, P., Sinton, R.A., Swanson, R.M., Crane, R.A. Single-wafer integrated 140 W silicon concentrator module. *In Conference Record, 22nd IEEE PVSC*,

- 739-743, 1991.
- [133] Verlinden, P.J., Terao, A., Smith, D.D., McIntosh, K., Swanson, R. M., Ganakas, G., Lasich, J. B. Will we have a 20%-efficient (PTC) photovoltaic system?. *In Conference Record, Proceedings 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2001
- [134] Vincenzi, D., Bizzi, F., Stefancich, M., Malagu, C., Morini, G.L., Antonini, A., Martinelli, G. Micromachined silicon heat exchanger for water cooling of concentrator solar cells. *In Conference Record, PV in Europe Conference and Exhibition—From PV Technology to Energy Solutions*, 2002.
- [135] Wang, X., Mujumdar, A. S., Yap, C. Thermal characteristics of tree-shaped microchannel nets for cooling of a rectangular heat sink. *International Journal of Thermal Sciences*, 45, 1103-1112, 2006.
- [136] Watmuff, J.H., Charters, W.W.S., Proctor, D. Solar and wind induced external coefficients - Solar collectors'. *Cooperation Mediterranee pour l'Energie Solaire, Revue Internationale d'Heliotechnique*, 1977.
- [137] Welford, W.T., Winston, R. *High Collection Nonimaging Optics*. Academic Press, 1989.
- [138] Wendelin, T.J., Jorgensen, G.J., Wood, R.L. SHOT: a method for characterizing the surface figure and optical performance of point focus solar concentrators. *Solar Engineering. American Society of Mechanical Engineers*, 555–560, 1991.
- [139] Winston, R. Principles of solar collectors of a novel design. *Solar Energy*, 16, 89-95, 1974.
- [140] Winston, R., Miñano, J.C., Benítez, P. *Nonimaging Optics*. Ed. Elsevier Academic Press, 2005.
- [141] Winston, R., Welford, W.T. Geometrical vector flux and some new nonimaging concentrators. *J. Opt. Soc. Am. A*, 69, 532-536, 1979.
- [142] Yang, M.J., Izumi, H., Sato, M., Matsunaga, S. A 3kW PV-Thermal System for Home Use. *26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Anaheim, California, 1313-1316, 1997.
- [143] Zhang, H.Y., Pinjala, D., Wong, T.N., Toh, K.C., Joshi, Y.K. Single-phase liquid cooled microchannel heat sink for electronic packages. *Applied Thermal Engineering*, 25, 1472-1487, 2005.
- [144] Zondag, H.A., de Vries, D.W., van Helden, W.G.J., van Zolingen, R.J.C., van

Steenhoven, A.A. The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector. *Solar energy* , 72, 113-128, 2002.

# Apéndice A

## Definición del sistema

---

La configuración final del sistema resulta fruto del ensamblaje de los elementos que lo constituyen, de forma que su descripción se realiza detallando los componentes que lo constituyen.

En este capítulo se introducen los diferentes elementos, que se analizarán en profundidad en los capítulos posteriores

El diseño consta de partes fijas y partes móviles.

1. Los elementos fijos son la lente primaria y las estructuras de soporte.
2. Las partes móviles son el colector y el reflector secundario.

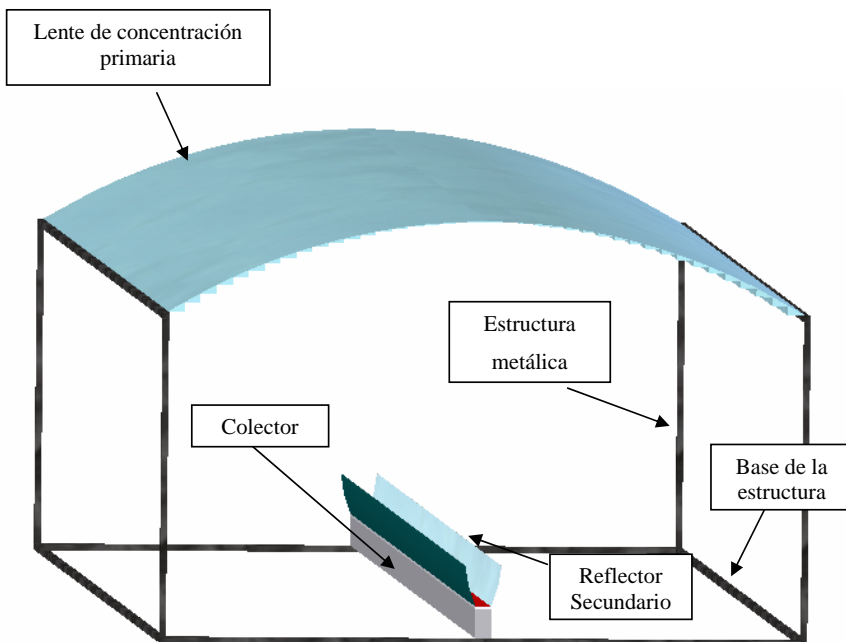


Figura A.1. Esquema del concentrador.

### **Concentrador primario**

El concentrador primario es un elemento estático formado por una lente de Fresnel. Las características del concentrador se especifican en el capítulo X.

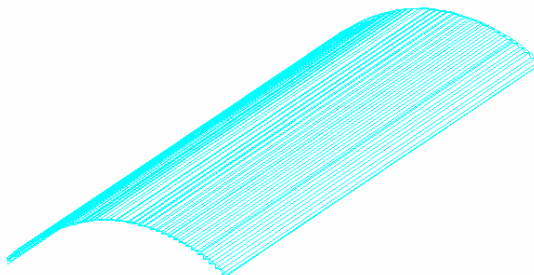


Figura A.2. Concentrador primario.

El material de la lente que se utiliza es polimetilo de metacrilato (acrílico).

### **Estructura metálica**

La estructura metálica puede tener diferentes disposiciones. Las funciones que debe cumplir son principalmente dos:

- 1.- Actuar como soporte del concentrador primario, del concentrador secundario y del colector.
- 2.- Permitir el movimiento al cuerpo secundario.

El sistema de control y la estructura metálica no se incluyen en los objetivos de la tesis, dado que se considera se desarrollarán constituyendo en sí un proyecto final de carrera o una tesis.

### **Reflector secundario**

El reflector secundario se incluye para cumplir un doble objetivo. Aumentar el ratio de concentración global del sistema en un factor 2 y minimizar el movimiento de seguimiento con una buena homogeneidad aprovechando las características de aceptación del concentrador parabólico compuesto.

El material del reflector secundario será aluminio altamente pulido MIRO2 4200GP de la marca ALANOD, de esta forma se evita la fragilidad del vidrio, se aligera peso y la



reflectividad de este material es prácticamente igual o superior a la de un espejo (Reflexión total de un 95%).

El secundario se encuentra unido al colector o modulo fotovoltaico, de forma que ambos se mueven de forma solidaria.



Figura A.3. Reflector + colector.

### Colector

El colector está formado por varios elementos que son: el disipador, el reflector secundario, las células fotovoltaicas, entre el disipador y el envés de las células se emplaza el aislante eléctrico y como cerramientos: EVA y vidrio sobre las células y material aislante en el resto.

La parte exterior de las paredes laterales y pared inferior se cubren con un material aislante. En la tabla siguiente aparecen los principales aislantes que se pueden utilizar para esta función:

Material	Descripción	Rango de temperaturas
<b>ASBESTO</b>	Es un grupo de minerales del tipo silicato que se dan en la naturaleza y que pueden ser separados en fibras fuertes, duraderas y resistentes al fuego o también en fibras largas y flexibles para tejidos de tela. Este material es dañino para la salud humana.	Altas temperaturas
<b>FIBRA CERÁMICA</b>	Es un compuesto de alúmina de alta pureza y sílice que generan una fibra de alúmina resistente a altas temperaturas.	-18°C a 1250°C
<b>SILICATO DE</b>	Es un compuesto natural compuesto de cal	-18°C a 650°C

<b>CALCIO</b>	y sílice que es impregnado con aglomerantes y sometido a un proceso de horneado que le dan rigidez y consistencia	
<b>PERLITA</b>	La Perlita es un mineral volcánico silicio, principalmente silicato de aluminio, cuya característica más destacable, es la cantidad de agua ocluida. La que le confiere la posibilidad de expandirse al someterla a un tratamiento térmico	-18°C a 650°C
<b>LANA DE ROCA</b>	Es una lana mineral compuesta de roca basáltica o volcánica que es fundida a altas temperaturas y mediante centrifugado se obtienen fibras largas y flexibles a las que se le impregna aglomerantes a base de silicatos y óxidos metálicos que le dan la rigidez	-18°C a 750°C
<b>LANA DE VIDRIO</b>	Es una lana mineral compuesta de sílice que es fundida a altas temperaturas y mediante centrifugado se obtienen fibras largas y flexibles a las que se les impregna aglomerantes que le dan la rigidez necesaria.	-18°C a 454°C
<b>VIDRIO CELULAR</b>	Las placas de Vidrio Celular se obtienen a partir de polvo vítreo a través de un proceso termo-químico, creándose por fusión multitud de células cerradas en estado de parcial vacío las cuales se comunican entre sí por una fina pared de vidrio.	-286°C a +482°C
<b>POLIURETANO</b>	Es un compuesto a base de dos componentes químicos que son el polioliol y el isocianato, que al combinarse generan una reacción expansiva, quedando finalmente como un material rígido y compacto.	-183°C a +149°C
<b>POLIESTIRENO</b>	Material plástico celular y rígido fabricado a partir del moldeo de perlas preexpandidas de poliestireno expandible, que es un polímero de estireno que tiene como elemento expansor el pentano, o uno de sus copolímeros y que presenta una estructura celular.	-183°C a +74°C

Tabla A.1. Características aislantes térmicos.



Figura A.4. Caucho sintético.

De los materiales que se detallan, los primeros son los que se utilizan para altas temperaturas, y los tres últimos son más usuales en procesos de frío. Teniendo en cuenta una temperatura de trabajo sobredimensionada de 100°C (excluye el poliestireno), hay un amplio abanico en el mercado de aislantes que se pueden utilizar, ya que dentro de rango están toda una serie de aislantes de caucho sintético negro, de silicona, etc.

El aislante utilizado es poliuretano de alta densidad en plancha de 3 cm de espesor.

### Disipador

El conducto por el que circula el líquido refrigerante es un tubo de aluminio comercial de sección rectangular de 20 x 10 mm<sup>2</sup>, con un espesor de las paredes de 1.5 mm. Estas medidas son las que constituyen en anchura el canal principal, a partir de aquí si la mancha focal es mayor se van añadiendo más elementos formando una matriz de canales idénticos (configuración multicanal).

Células fotovoltaicas de concentración: son unas células fotovoltaicas especialmente diseñadas para trabajar en concentración. Las células están manufacturadas por la empresa británica NaREC PV Technology Centre, con referencia Cz -wafer Solar Cells. Estas células se producen con la tecnología LGBG (laser grooved buried grid) que proviene del trabajo realizado por la empresa BP solar, cuyos principales avances se realizaron en el mencionado proyecto IDECONTE. Las características técnicas de las células, según los datos facilitados por el fabricante, son los representados en los siguientes gráficos:

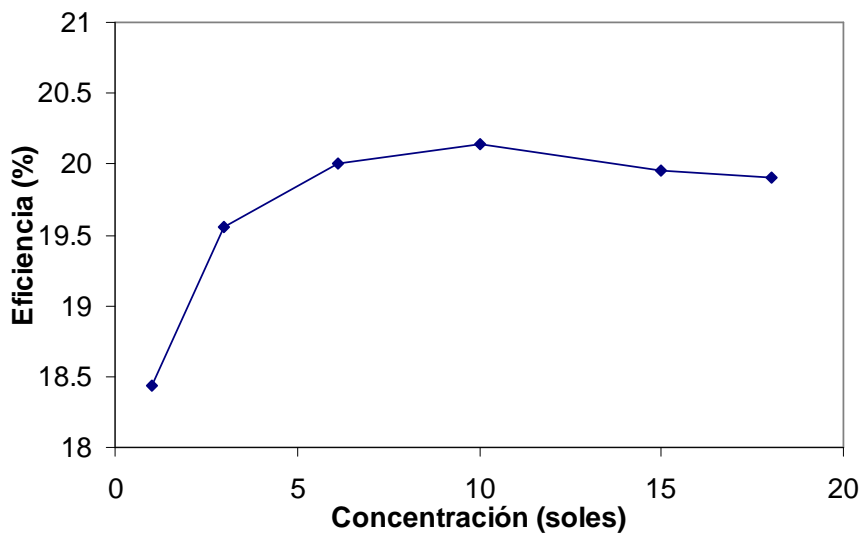


Figura A.5. Curva de eficiencia en la conversión eléctrica vs concentración.

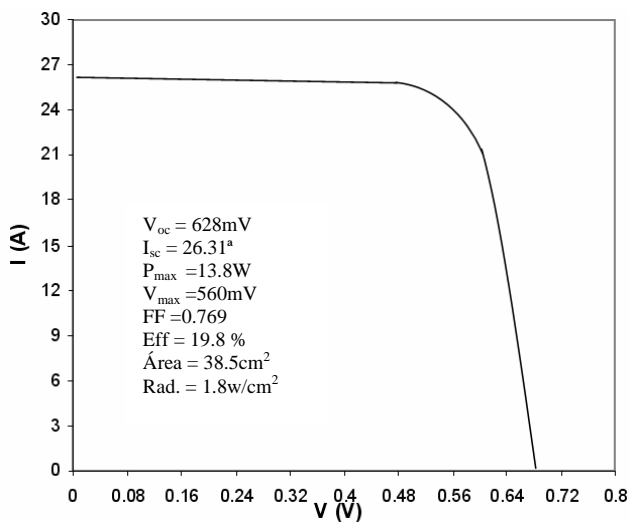


Figura A.6. Curva IV 25 °C.

Por debajo de las células y sobre el aluminio se emplaza una lámina de aislante eléctrico de **kapton**<sup>®</sup>, que se presenta en forma de adhesivo de doble capa. Se utiliza también para fijar las células al sistema refrigerador.

**CHOMERICS™ THERMATTACH T404. N°: 014550 OP**

Tipo Material	Kapton MT
Espesor-Tolerancia	0,127mm±0,03mm
Impedancia Térmica <1psi (0,0069MPa)	3,7 °Ccm <sup>2</sup> /W
Conductividad Térmica	0,37 W/mK
Voltaje Máximo	5000V
Resistividad	3x10 <sup>14</sup> ohmcm
Rango Inflamabilidad (E140244)	94V-0
Adhesión de cizalladura	0,862 MPa
Adhesión de cizalladura (25°)	0,897 MPa
Adhesión de cizalladura (150°)	0,345 MPa
Nivel de Adhesión (25°C, 12psi(0,083MPa))	>50 días
Nivel de Adhesión (150°C, 12psi(0,083MPa))	>50 días
CTE Adhesivo (-40 a +150°C)	400ppm/°C

Figura A.7. Características del kapton.

En la parte superior, el módulo se cierra con un film de EVA (Ethylene and Vinyl Acetate -Acetato de EtilenVinilo-) y un vidrio extraclaro SGG ALBARINO fabricado por la compañía Saint Gobain con una transmitancia del 91.4%.

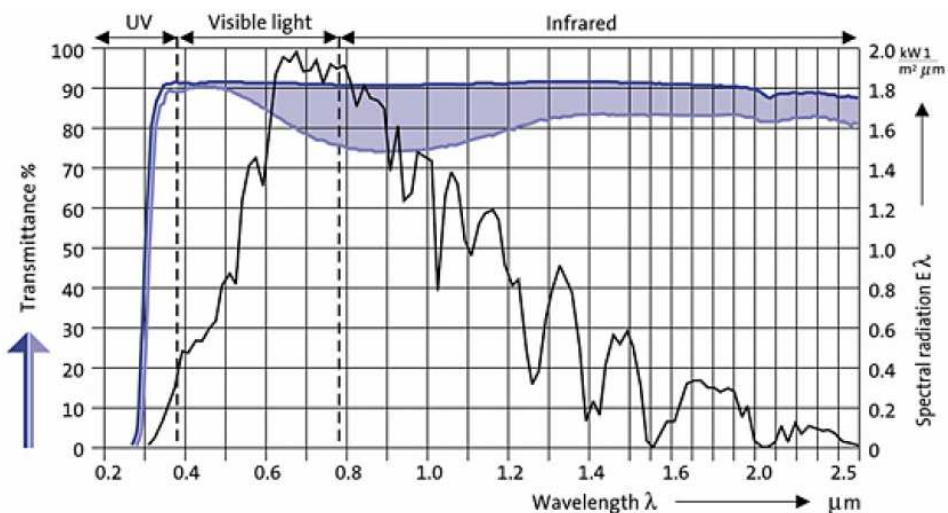



Figura A.8. Características del vidrio SGG Albarino (azul) en comparación con un vidrio estándar (violeta).

Item	Unit	Uncured	Cured	Note
Chemical Composition				
Vinyl Acetate	Wt%	28, 32	28, 32	28% or 32% VA
Density	g/cm <sup>3</sup>	0.96	0.96	
Melting Point	°C	~ 65 - 70		
Transmittance (400-1500nm)	%	92-94	91-92	
Refractive Index		1.48	1.48	
Gel Content	%		88 ± 2	3T/145°C/ 8 min
	%		73 - 92	135-150°C range
Volume Resistivity	Ohm-cm	1.1 - 6.4x10 <sup>14</sup> (average: 2.3x10 <sup>14</sup> )	0.3 - 3.9x10 <sup>15</sup> (formulation dependent)	
Photothermal Stability (UV-induced Discoloration)	YI		Very low to no visible yellowing	(yellowness index)
Adhesion Strength			(formulation dependent)	
to Plain Glass	N/mm		10 - 14	
to TPE or TPW	N/mm		5.6 - 8.4 (TP layer delaminated)	
to TPT	N/mm		3.6 - 7.2	
Maximum Load at Break	N/cm <sup>2</sup>	1000 - 1200	2000 - 3000	
Elongation at Break	%	1500 - 1700	1300 - 1550	
Damp Heat Resistance Adhesion Strength Loss	% (in N/mm)		~10 - 15	(85°C, 85% RH, 1000 h)
Shelf Life (based on gel% and adhesion tests)	months	6 to >10		When stored properly

Figura A.9. Características EVA (SunShine®).

# Apéndice B

## Colector térmico plano teórico

Icon		TRNSYS Model	Type 73
Proforma	Solar Thermal Collectors\Theoretical Flat-Plate Collector\Type73.tmf		

### PARAMETERS

	Name	Dimension	Unit	Type	Range	Default
1	Number in series	Dimensionless	-	integer	[1;+Inf]	1
	The solar collector model can simulate an array of identical solar collectors hooked up in series. This parameter is used to specify how many collectors are hooked up in a series arrangement where the output of the first collector is the inlet to the second collector.					
2	Collector area	Area	m <sup>2</sup>	real	[0.0;+Inf]	2.0
	The total area of the solar collector array consistent with the supplied efficiency parameters (typically gross area and not net area).					
3	Fluid specific heat	Specific Heat	kJ/kg.K	real	[0.0;+Inf]	4.190
	The specific heat of the fluid flowing through the solar collector array.					
4	Collector fin efficiency factor	Dimensionless	-	real	[0.0;+1.0]	0.7
	The fin efficiency is a measure of the heat transfer from the fin to the maximum possible heat transfer from the fin. The maximum heat transfer from the fin would occur if the fin was uniformly at the base temperature. Refer to: ASHRAE Standard 93-77 for details on the fin efficiency					
5	Bottom, edge loss coefficient	Heat Transfer Coeff.	kJ/hr.m <sup>2</sup> .K	real	[0.0;+Inf]	3.0
	The loss coefficient for the bottom and edges of the solar collector per unit aperture area.					
6	Absorber plate emittance	Dimensionless	-	real	[0.0;1.0]	0.7
	The emittance of the absorber plate of the solar collector. The emittance, or emissivity, is defined as the ratio of the radiation emitted by the surface in question to the radiation emitted by a blackbody (the perfect emitter) at the same temperature. This property is used to calculate radiation losses from the collector.					
7	Absorptance of absorber plate	Dimensionless	-	real	[0.0;1.0]	0.8
	The absorptance of the absorber plate of the solar collector. The absorptance is a ratio of the amount of radiation absorbed by a surface to the total radiation incident on the surface.					
8	Number of covers	Dimensionless	-	integer	[1;+Inf]	1
	The number of glass covers covering the solar collector absorber plate.					
9	Index of refraction of cover	Dimensionless	-	real	[0.0;+Inf]	1.526
	The index of refraction of the material covering the solar collector absorber plate.					
10	Extinction coeff. thickness product	Dimensionless	-	real	[0.0;1.0]	0.0026
	The product of the extinction coefficient and the thickness of one of the glazings covering the solar collector absorber plate.					

### INPUTS

	Name	Dimension	Unit	Type	Range	Default
1	Inlet temperature	Temperature	C	real	[-Inf;+Inf]	20.0
	The temperature of the fluid entering the the solar collector.					
2	Inlet flowrate	Flow Rate	kg/hr	real	[0.0;+Inf]	100.0
	The flow rate of the fluid entering the solar collector.					

3	Ambient temperature	Temperature	C	real	[-Inf;+Inf]	10.0
The temperature of the environment in which the solar collector is located. This temperature will be used for loss calculations.						
4	Incident radiation	Flux	kJ/hr.m <sup>2</sup>	real	[0.0;+Inf]	0.
The total (beam + diffuse) radiation incident on the plane of the solar collector per unit area. This input is commonly hooked up to the TYPE 16 "total radiation on surface 1" output.						
5	Windspeed	Velocity	m/s	real	[0.0;+Inf]	0.0
The speed of the wind flowing across the solar collector array.						
6	Horizontal radiation	Flux	kJ/hr.m <sup>2</sup>	real	[0.0;+Inf]	0.0
The total radiation incident upon a horizontal surface. Includes beam radiation, sky diffuse radiation, and ground reflected diffuse radiation.						
7	Horizontal diffuse	Flux	kJ/hr.m <sup>2</sup>	real	[0.0;+Inf]	0.0
The diffuse radiation on a horizontal surface.						
8	Ground reflectance	Dimensionless	-	real	[0.0;1.0]	0.2
The reflectance of the surface above which the solar collector is located. The ground reflectance is defined as the ratio of reflected radiation to total incident radiation. Typical values are 0.2 for ground not covered by snow and 0.7 for snow-covered ground.						
9	Incidence angle	Direction (Angle)	degrees	real	[-360;+360]	20.0
The angle of incidence of beam radiation on the collector surface.						
10	Collector slope	Direction (Angle)	degrees	real	[-360;+360]	0
The angle between the plane of the collector surface and the horizontal. The slope is positive when facing the direction of the surface azimuth. 0 = Horizontal; 90 = Vertical facing Azimuth As a general rule, the performance is somewhat optimized when the slope is set equal to the latitude.						

**OUTPUTS**

	Name	Dimension	Unit	Type	Range	Default
1	Outlet temperature	Temperature	C	real	[-Inf;+Inf]	0
The temperature of the fluid exiting the solar collector array.						
2	Outlet flowrate	Flow Rate	kg/hr	real	[0.0;+Inf]	0
The flowrate of the fluid exiting the solar collector array. In this model: $\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in}$						
3	Useful energy gain	Power	kJ/hr	real	[0.0;+Inf]	0
The rate of useful energy gain by the solar collector fluid: $Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in})$						



# Apéndice C

## Ejemplos de integración arquitectónica

En este apéndice se pretende ilustrar la factibilidad de integración arquitectónica diseñándose en Autocad® diferentes configuraciones de edificación con diferentes posibilidades de incorporación del sistema PVT.

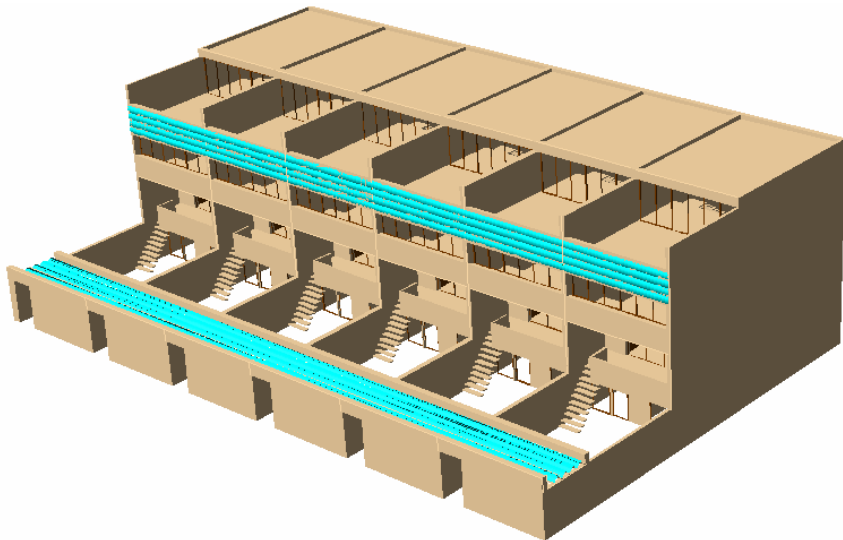


Figura C.1. Unifamiliares adosados.

El primer edificio que se muestra son unos unifamiliares adosados tipo casa crujía. La disposición del sistema de captación solar que se propone es sobre el porche

de entrada y sobre la terraza del último piso. Según las necesidades del domicilio se podría incluir sólo sobre el porche, o en el caso de requerirse un mayor aporte energético situar colectores sobre el tejado o demás terrazas.

A continuación se muestran dos posibilidades de entre las comentadas:

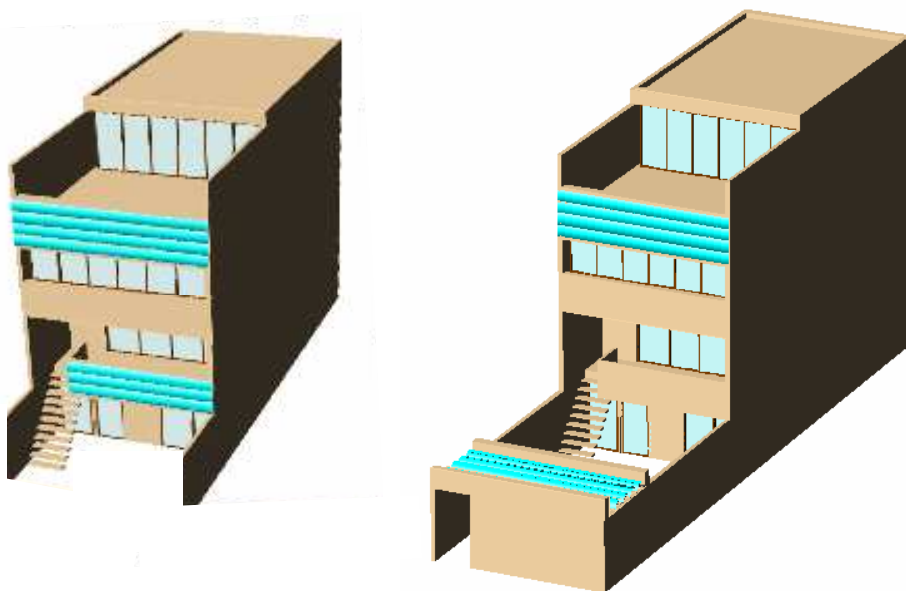


Figura C.2. Casas tipo cruzja.

Se representa en la siguiente figura una vista de detalle de la colocación del sistema en el porche de la entrada de la casa:

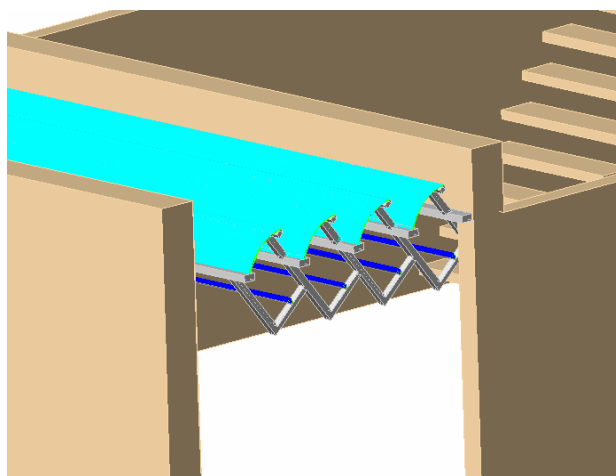


Figura C.3. Detalle sistema PVT en porche entrada.

Otra tipología de edificación en la que se ejemplifican emplazamientos del sistema es en una casa unifamiliar aislada.

En primer lugar se muestra su ubicación en el caso de una cubierta plana, situándose el concentrador con una inclinación igual a la latitud del lugar, y cubriéndose la cubierta en mayor o menor grado en función de las necesidades.

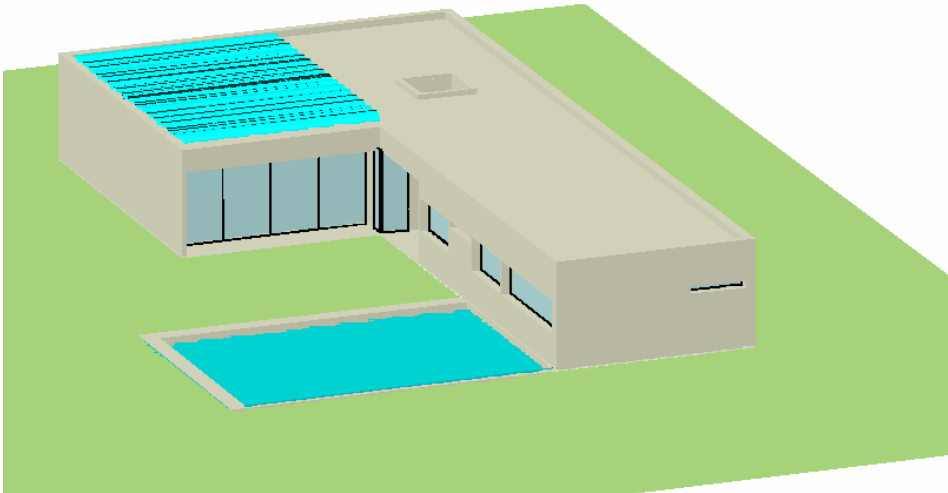


Figura C.4. Casa unifamiliar cubierta plana.

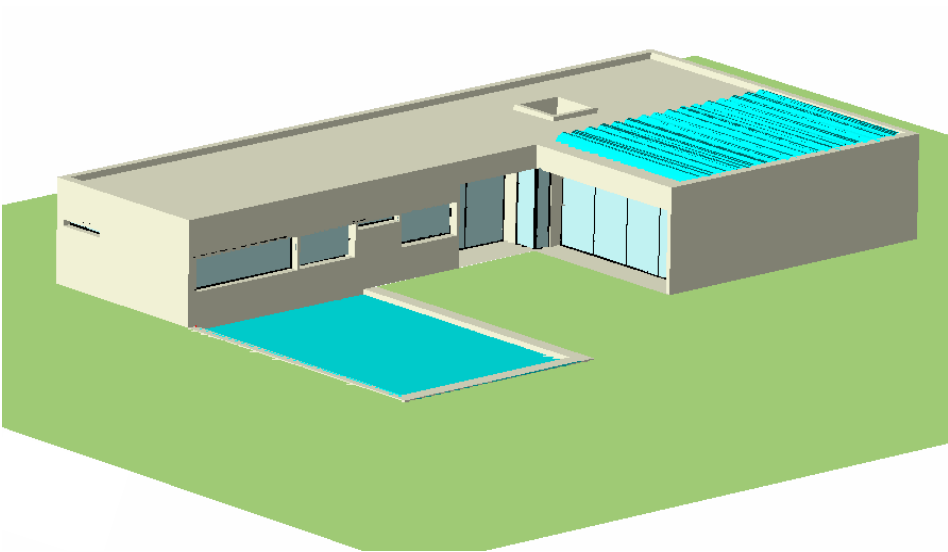


Figura C.5. Casa unifamiliar cubierta plana.

En segundo lugar se sitúa el colector sobre una cubierta inclinada. En esta situación si la incorporación se prevé a la hora de diseñar la casa, la inclinación de la cubierta se podría adecuar para que situando el sistema plano sobre ésta cumpliera la función de cerramiento. De esta forma la integración resultaría total, obteniéndose como resultado una cubierta inclinada transparente constituida por el los colectores híbridos.

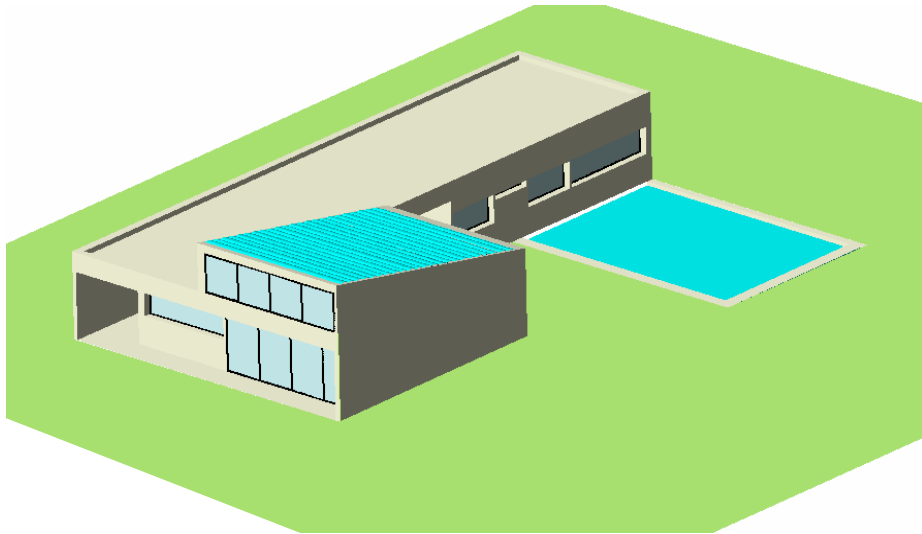


Figura C.6. Casa unifamiliar cubierta inclinada.

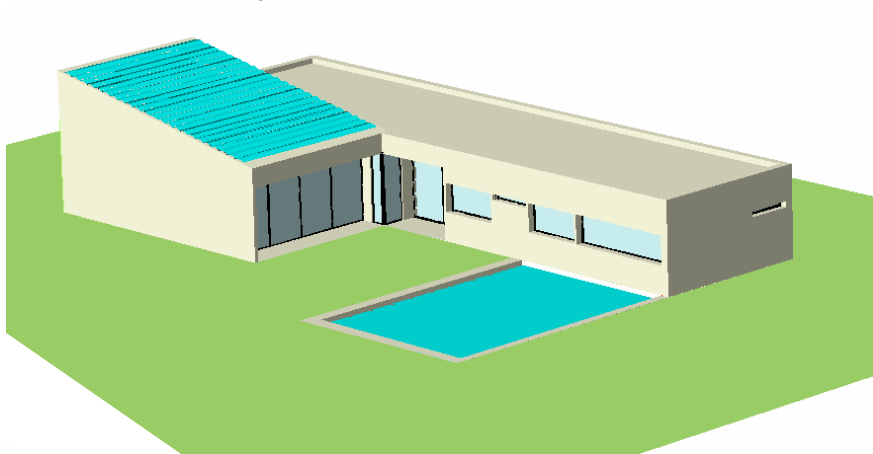


Figura C.7. Casa unifamiliar cubierta inclinada.

El último de los ejemplos sobre el que se muestran posibles configuraciones de integración del sistema híbrido es un edificio que puede representar un hospital, una industria, un bloque de apartamentos, etc.

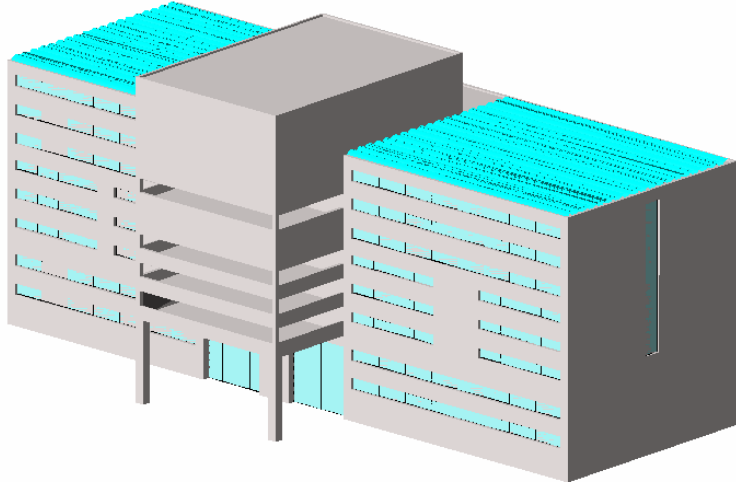


Figura C.8. Edificio con integración en cubierta plana.

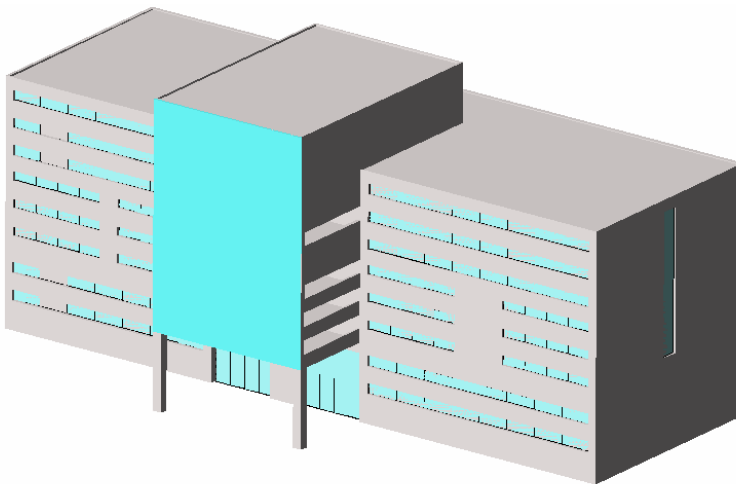


Figura C.9. Edificio con integración en fachada.



Figura C.10. Edificio con posibilidades de integración.

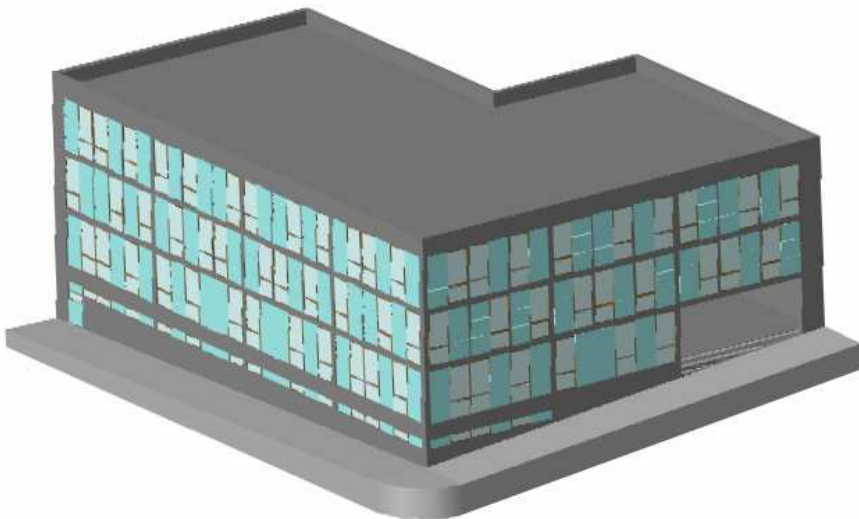


Figura C.11. Edificio en chaflán con integración en fachada.

Una variación de configuración en edificio de las propuestas presentadas es la sustitución de los elementos metálicos de la fachada (figura C.10) por sistemas concentradores híbridos térmico fotovoltaicos, representados en azul (figura C.11).

# Apéndice D

## Publicaciones

---

A continuación se adjuntan las diferentes publicaciones derivadas de la realización de la tesis.