

UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Escuela Superior de Ingenieros Industriales

Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos

Tesis Doctoral

**ANÁLISIS ENERGÉTICO**  
**DE**  
**SISTEMAS CONCENTRADORES**

Por

MANUEL JESÚS BLANCO MURIEL

Sevilla, Julio 1996

T. 145

Director de la Tesis: Dr. Valeriano Ruiz Hernández

UNIVERSIDAD DE SEVILLA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

TESIS DOCTORAL

“ANÁLISIS ENERGÉTICO DE SISTEMAS CONCENTRADORES”

Dep. el Dpto Ing. Energética y Mec. Fluidos

E.S. Ingenieros Industriales

28

135

02-07-96

02 JUL. 1996

18-07-96

18 Julio 1996

DEL DEPARTAMENTO

*Manuel de Pardo*

*[Handwritten signature]*

DOCTORANDO: Manuel Jesús Blanco Muriel

Sevilla, Julio de 1995

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES DE SEVILLA. BIBLIOTECA

# UNIVERSIDAD DE SEVILLA

## ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

### “ANÁLISIS ENERGÉTICO DE SISTEMAS CONCENTRADORES”

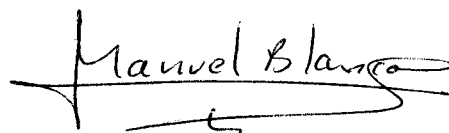
Tesis doctoral presentada Manuel Jesús Blanco Muriel en satisfacción de los requisitos necesarios para optar al grado de Doctor Ingeniero Industrial. Dirigida por el Dr. Valeriano Ruiz Hernández, catedrático de la Universidad de Sevilla.

EL DIRECTOR DE LA TESIS



Valeriano Ruiz Hernández

EL DOCTORANDO



Manuel Jesús Blanco Muriel

Sevilla, Julio de 1996

## **AGRADECIMIENTOS**

Han sido muchas las personas que han contribuido de una forma u otra a la elaboración de este trabajo. Deseo expresar mi agradecimiento a todos ellos y en especial a:

El Profesor Valeriano Ruiz Hernández por su inestimable apoyo, dirección, orientación y, sobre todo, amistad, no sólo durante la elaboración de esta tesis, sino a lo largo de toda mi experiencia académica y profesional;

Los profesores José Martín, Carlos Gómez, James Egan, James Phelps, Jhon White, Dominik Sama, el Dr. Ricardo Carmona, los Ingenieros Manuel Silva, Felipe Rosa, Mónica Payán e Ignacio Hernández y la Srta. Melissa McCreery por su amistad, apoyo y colaboración.

A mi familia y a Rosa por su cariño y comprensión.



A mis padres, Mariano y Ana.

## RESUMEN

El propósito del trabajo que aquí se expone ha sido el de explorar nuevos senderos en el campo de la concentración solar en general, y en el de la concentración secundaria en particular. En primer lugar, se reexaminan las bases de la concentración solar, cuestionándose el criterio generalmente establecido de que para conseguir altas temperaturas es necesario concentrar. Seguidamente, se centra la atención en la simulación por ordenador (un tema que puede jugar un papel importante en el futuro de los concentradores secundarios) justificándose la importancia de las herramientas informáticas en la simulación y análisis del comportamiento energético de los sistemas solares de concentración y enfatizándose el hecho de que en la actualidad no hay disponible ningún programa de ordenador de carácter general que permita simular el comportamiento energético de sistemas concentradores multirreflexivos. Una vez puesta de manifiesto esta carencia, se pasa a presentar un programa de simulación que la resuelve, explicándose en detalle su diseño y realización. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos y las lecciones aprendidas durante el diseño, fabricación y evaluación de un concentrador secundario para una central de torre y se explican los esfuerzos realizados para utilizar estos resultados y estas lecciones en la validación del programa de simulación desarrollado.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1-1</b>
<b>2. LA CONCENTRACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR</b>	<b>2-1</b>
<b>2.1 Propósito de los sistemas termosolares de concentración</b>	<b>2-5</b>
<i>2.1.1 Límites a los rendimientos de los sistemas solares térmicos no concentradores.</i>	<i>2-8</i>
<i>2.1.2 Límites actuales de las eficiencias de los sistemas no concentradores.</i>	<i>2-26</i>
<b>2.2 Ventajas conceptuales de los sistemas concentradores</b>	<b>2-28</b>
<b>2.3 Los límites.</b>	<b>2-35</b>
<i>2.3.1 Argumentos basados en el Segundo Principio de la Termodinámica.</i>	<i>2-37</i>
<i>2.3.2 Argumentos basados en el Teorema de Liouville.</i>	<i>2-42</i>
<b>2.4 Los tipos</b>	<b>2-47</b>
<i>2.4.1 Concentradores reflectivos formadores de imagen</i>	<i>2-48</i>
<i>2.4.2 Concentradores reflectivos no reproductores de imágenes.</i>	<i>2-53</i>
<i>2.4.2.1 Concentrador Parabólico Compuesto</i>	<i>2-55</i>
<i>2.4.2.2 Concentradores elípticos compuestos</i>	<i>2-61</i>
<i>Concentradores con forma de trompeta</i>	<i>2-64</i>
<b>3. MODELOS DE CÁLCULO.</b>	<b>3-1</b>
<b>3.1 Necesidad de un programa general para el análisis energético de sistemas concentradores.</b>	<b>3-4</b>
<b>3.2 Las bases para el nuevo programa.</b>	<b>3-8</b>
<i>3.2.1 El nuevo paradigma computacional.</i>	<i>3-8</i>
<i>3.2.2 El modelo del concentrador</i>	<i>3-11</i>
<i>3.2.3 El modelo del flujo de radiación solar incidente</i>	<i>3-13</i>
<i>3.2.4 El modelo de las interacciones entre la radiación solar y el sistema concentrador</i>	<i>3-14</i>
<i>3.2.5 Aspectos del diseño del software</i>	<i>3-23</i>
<b>3.3 El programa.</b>	<b>3-24</b>

## TABLA DE CONTENIDOS (CONT.)

<b>4. EVALUACIÓN DE UN CONCENTRADOR SECUNDARIO PARA UNA CENTRAL DE TORRE</b>	<b>4-1</b>
<b>4.1 Características del sistema de concentración.</b>	<b>4-6</b>
<i>4.1.1 El campo de helióstato SSPS-CRS.</i>	<i>4-7</i>
<i>4.1.2 El concentrador hexagonal parabólico compuesto (HCPC)</i>	<i>4-13</i>
<b>4.2 Objetivos del test.</b>	<b>4-21</b>
<b>4.3 Los tests.</b>	<b>4-24</b>
<b>4.4 Resultados de los tests.</b>	<b>4-34</b>
<b>4.5 Discusión de los resultados de las pruebas.</b>	<b>4-35</b>
<b>5. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROGRAMA</b>	<b>5-1</b>
<b>6. CONCLUSIONES.</b>	<b>6-1</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>7-1</b>
<b>ANEXO A</b>	<b>A-1</b>
<b>ANEXO B</b>	<b>B-1</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

Aunque, de acuerdo con el Segundo Principio de la Termodinámica la exergía de la radiación solar que llega a la Tierra es muy alta, la densidad energética de esta radiación es baja, inferior a un kilovatio por metro cuadrado. Esta combinación de alto contenido exergético y baja densidad de potencia supone un desafío para los diseñadores de sistemas solares. Mientras el aprovechamiento térmico del alto valor exergético de la radiación solar demanda el uso de sistemas capaces de alcanzar y operar eficientemente a temperaturas elevadas, la baja densidad energética de dicha radiación dificulta la realización de tales sistemas.

Tradicionalmente, este desafío se ha abordado mediante el uso de sistemas termosolares de concentración, ya que éstos al incrementar la densidad de potencia radiante sobre el receptor hacen posible el uso de receptores de menor tamaño y, por tanto, de menores pérdidas térmicas, permitiendo alcanzar temperaturas de operación altas.

En algunos casos, incluso, no basta con el uso de un sistema de concentración sino que es conveniente utilizar dos o más sistemas concentradores en serie. Considérense, por ejemplo, las centrales termosolares de torre. En ellas el tamaño de la apertura de entrada del receptor central y por consiguiente la temperatura de operación de éste está inicialmente limitado por la capacidad de concentración del campo de

heliostatos, ya que el tamaño de esta apertura ha de ser, como mínimo, igual al de la imagen del Sol que el campo de heliostatos proyecte sobre la misma. Dado que el tamaño de esta imagen depende principalmente de la distancia de los heliostatos al receptor y de la calidad óptica de los mismos, para aumentar la concentración de un campo de heliostatos se puede recurrir a la redistribución de sus heliostatos de forma que se reduzcan sus distancias al receptor y/o a la mejora de su calidad óptica. En muchas ocasiones, sin embargo, razones técnicas y/o económicas hacen desaconsejable ambos procedimientos, siendo más interesante en estos casos recurrir al uso de sistemas concentradores secundarios que colocados en las proximidades del receptor reconcentren la radiación procedente del campo de heliostatos o sistema concentrador primario.

El propósito del trabajo que aquí se expone ha sido el de explorar nuevos senderos en el campo de la concentración solar en general, y en el de la concentración secundaria en particular. En primer lugar, se reexaminan las bases de la concentración solar, cuestionándose el criterio generalmente establecido de que para conseguir altas temperaturas es necesario concentrar. Seguidamente, se centra la atención en la simulación por ordenador (un tema que puede jugar un papel importante en el futuro de los concentradores secundarios) justificándose la importancia de las herramientas informáticas en la simulación y análisis del comportamiento energético de los sistemas solares de concentración y enfatizándose el hecho de que en la actualidad no hay disponible ningún programa de ordenador de carácter general que permita simular el comportamiento energético de sistemas concentradores multirreflexivos. Una vez puesta

## 2. LA CONCENTRACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

Los mecanismos utilizados para la conversión de la energía solar en electricidad son básicamente dos: la conversión fotovoltaica y la conversión fototérmica. La existencia de estos dos mecanismos es un reflejo de la naturaleza dual de la radiación solar. Así, mientras que en la conversión fotovoltaica se aprovechan las propiedades corpusculares de la radiación solar, en concreto el efecto fotoeléctrico, para conseguir la transformación directa en el seno de un semiconductor de la energía solar en energía eléctrica, en la conversión fototérmica se aprovecha el hecho de que la radiación solar puede considerarse como calor proveniente de una fuente térmica a muy alta temperatura para, mediante esquemas termodinámicos convencionales, convertir una gran parte de su energía en trabajo mecánico y subsecuentemente en energía eléctrica.

Es de destacar que casi todos los esquemas que utilizados para la conversión fototérmica de la energía solar a media y alta temperatura se basan en el uso de sistemas concentradores formados por espejos de alta reflectividad. Estos sistemas interceptan la radiación solar y la reflejan concentrándola sobre una superficie (que puede ser real o imaginaria) donde se lleva a cabo, o se inicia, la conversión de la energía radiante en energía térmica de un fluido de trabajo. Como se verá más adelante, tanto en los sistemas fotovoltaicos como fototérmicos (también denominados termosolares), las razones que aconsejan concentrar la radiación solar tienen su fundamento, en última

instancia, en el Segundo Principio de la Termodinámica. Sin embargo, las razones por las cuales para llevar a cabo este propósito se utilizan espejos no son de índole teórica sino económica. Puesto que en la superficie terrestre la intensidad de la radiación solar (irradiancia) es baja en comparación con muchas de las necesidades energéticas del ser humano, la interceptación de cantidades apreciables de esta energía requiere que la superficie captadora de los sistemas solares sea relativamente grande. En estas circunstancias, el empleo de superficies reflectivas (espejos) en los sistemas termosolares de concentración está justificado por el bajo coste de los mismos en comparación con el de otros materiales ópticos.

Para diseñar un sistema termosolar de concentración es preciso estimar, en función del tiempo, la distribución energética de la radiación solar que incide sobre el mismo y determinar la evolución que dicha radiación experimenta en su interacción con el sistema. Como mínimo, por cada una de las superficies que integran el sistema concentrador se necesita disponer de una estimación de la distribuciones de radiación incidente, absorbida y reflejada. La precisión con la que se necesitan estas estimaciones depende de las características del sistema que se esté diseñando y del uso al cual éste se vaya a destinar. Así, por ejemplo, cuando se pretende diseñar un sistema termosolar de alta concentración para operar a temperaturas elevadas (del orden de los 1000 °C), hay que ser mucho más cuidadosos en las estimaciones óptico - energéticas, que cuando se pretende diseñar un sistema termosolar de baja concentración para operar a temperaturas medias (del orden de los 200 °C).



En general, la evaluación óptico - energética de los sistemas concentradores se suele llevar a cabo mediante simulación por ordenador. Incluso en aquellos casos en los que la determinación de las distribuciones de potencia incidente en las superficies que integran el concentrador se puede efectuar mediante métodos analíticos, se suele hacer uso de la simulación por ordenador para determinar cómo se absorbe y se refleja la radiación solar en el interior del concentrador y cómo se distribuye angularmente el flujo radiante a la salida del mismo.

Pese a ello, un repaso a la bibliografía<sup>1,2,3,4,5,6,7,8,9,10</sup> muestra que, si bien es cierto que existen diversos programas que permiten la evaluación de sistemas concentradores específicos (tales como campos de heliostatos, discos parabólicos o concentradores cilindro - parabólicos), no existe ningún programa para la evaluación energética de sistemas solares de concentración que sea de aplicación general. Esto obliga a los interesados en el diseño de nuevos sistemas de concentración a desarrollar programas específicos para llevar a cabo su evaluación.

La falta de un programa general para la evaluación energética de sistemas concentradores dificulta la comparación de estos sistemas entre sí. Frecuentemente, grupos de investigación que propugnan sistemas de concentración distintos basan la evaluación de sus correspondientes conceptos en suposiciones e hipótesis diferentes y la llevan a cabo mediante el uso de métodos y técnicas igualmente distintas. En esas condiciones puede, por tanto, descartarse la posibilidad de una comparación directa y objetiva entre los diferentes sistemas propuestos.

Dado que todos los sistemas solares de concentración se basan en los mismos principios, es razonable suponer que la carencia detectada puede subsanarse, es decir, que es posible crear un programa de ordenador de carácter general que permita la evaluación energética de cualquier sistema solar de concentración, por complejo que este sea. Uno de los objetivos de esta tesis ha sido, precisamente, el desarrollo de un programa de estas características.

Sin embargo, antes de entrar en ese tema es conveniente detenerse a reconsiderar ciertas cuestiones básicas relacionadas con la concentración de la radiación solar, tales como las siguientes:

- ¿Qué ventajas se derivan de la concentración de la radiación solar?
- ¿Existe alguna limitación de principio respecto a al grado en que dicha radiación puede concentrarse?
- ¿Qué ventajas se derivan del empleo de superficies reflectivas en los sistemas solares de concentración?

El análisis de estas cuestiones permitirá introducir de forma natural conceptos que se necesitarán con posterioridad y enmarcar el trabajo realizado en un contexto apropiado. Además, independientemente de este propósito “utilitario”, es posible que dicho análisis tengan un cierto interés científico en sí mismo.

En primer lugar, se procederá a analizar las ventajas que, tanto desde un punto de vista teórico como práctico, se derivan del uso de sistemas de concentración reflectivos.. Después, se considerará la cuestión de hasta cuanto puede concentrarse la

radiación solar. Se revisarán los principales argumentos ópticos y termodinámicos en favor de la existencia de límites de concentración y se derivarán en base a los mismos las expresiones analíticas de dichos límites. Finalmente, se introducirán y analizarán cuantitativamente los sistemas de concentración reflectivos más comúnmente utilizados, evaluándose sus ventajas y desventajas, tanto conceptuales como prácticas.

### 2.1 Propósito de los sistemas termosolares de concentración

La característica básica de todos los sistemas solares térmicos es que transforman la radiación solar en energía térmica. Una vez efectuada esta transformación, la energía térmica obtenida puede utilizarse directamente, como calor de proceso, o transformarse en trabajo mecánico en una máquina térmica. Posteriormente, si así se desea, el trabajo mecánico puede transformarse en energía eléctrica mediante el acople de la máquina térmica a un generador eléctrico.

Según varios autores<sup>11,12,13,14,15</sup>, la radiación solar directa<sup>a</sup> que llega a la Tierra puede considerarse, en una primera aproximación, como calor proveniente de una fuente térmica a una cierta temperatura,  $T_S$ .

---

a Como es sabido, la radiación solar que llega a la tierra interacciona con la atmósfera antes de llegar al nivel del suelo perdiendo en parte su direccionalidad. Se denomina radiación solar directa a la parte de la radiación solar que vista desde la superficie del planeta parece provenir directamente del disco solar.

De acuerdo con esta interpretación y en virtud del Segundo Principio de la Termodinámica la exergía,  $E_x$ , de esta radiación<sup>a</sup> puede estimarse haciendo uso de la expresión general para la exergía del calor:

$$E_x = Q \left( 1 - \frac{T_a}{T_s} \right) \quad (2 - 1)$$

donde  $Q$  es el calor;  $T_a$  la temperatura ambiente y  $T_s$  la temperatura de la fuente de calor.

El término entre paréntesis que aparece en la Ecuación 2 - 1 se corresponde, por tanto, con la fracción de la energía asociada con la radiación solar directa que puede transformarse en trabajo útil. Este término es conocido con el nombre de factor de Carnot, ya que es igual al rendimiento que tendría una máquina térmica reversible, que operase entre dos focos térmicos a temperaturas  $T_a$  y  $T_s$ . Dado que el factor de Carnot es siempre inferior a la unidad, es evidente que no toda la energía asociada con la radiación solar directa puede transformarse en trabajo útil. Asumiendo una temperatura ambiente de 25°C (298.15 K) y una temperatura equivalente<sup>b</sup> para la radiación solar directa de 5 777 K se obtiene un valor de 0.95 para el factor de Carnot, lo que significa que, en principio, es posible convertir en trabajo útil, aproximadamente, el 95 % de la radiación solar extraterrestre.

---

<sup>a</sup> Gómez<sup>16</sup> en su tesis doctoral proporciona un discusión detallada sobre la exergía de la radiación solar, incluyendo una revisión de las expresiones más importantes propuestas en la literatura.

<sup>b</sup> La temperatura equivalente de la radiación solar directa que incide sobre la Tierra se define como la que tendría que tener un cuerpo negro para producir un espectro equivalente al de dicha radiación.

Puesto que en los sistemas solares térmicos, la radiación solar se convierte en energía térmica de un fluido de trabajo y dado que, fijada la temperatura del foco frío, el rendimiento de toda máquina térmica disminuye al disminuir la temperatura del foco caliente, es deseable que los sistemas solares térmicos destinados a proporcionar trabajo operen a la temperatura más alta posible (compatible con un rendimiento aceptable de la transformación de energía solar en térmica) pues, sólo así podrán aprovechar el alto contenido exergético de la radiación solar.

En el caso de los sistemas solares térmicos destinados a generar calor de proceso la temperatura de funcionamiento está fijada, sin embargo, por los requerimientos térmicos de la aplicación, pudiendo ser tan baja como los 40 °C necesarios para acondicionar una piscina, o tan alta como los 1 000 °C requeridos en ciertos procesos industriales<sup>17</sup>.

La gran variedad de aplicaciones posibles a las que pueden destinarse los sistemas solares térmicos y el amplio rango de temperaturas de funcionamiento que ello conlleva imposibilita la existencia de una única configuración óptima que sea siempre la más adecuada en todas las situaciones y para todas las aplicaciones. Por ello, la pregunta “¿Qué ventajas se derivan de la concentración de la radiación solar?”, sólo puede contestarse adecuadamente si se reformula en términos más específicos, tales como: “¿Bajo qué circunstancias es necesario concentrar la radiación solar?”.

Desde un punto de vista práctico y a la luz del nivel tecnológico actual, la respuesta a esta última pregunta es simple:

*“El uso de concentradores solares es imperativo en aplicaciones a altas temperaturas, es decir, en aplicaciones en las que las pérdidas por radiación sean las que predominen sobre cualquier otro tipo de pérdidas térmicas”.*

Sin embargo, la simplicidad de esta respuesta es meramente formal. Conceptualmente la respuesta es compleja. Aunque, desde un punto de vista teórico, puede demostrarse que los sistemas concentradores poseen ventajas conceptuales sobre los no concentradores, lo cierto es que las consideraciones teóricas no bastan para descartar el uso de sistemas no concentradores en aplicaciones a altas temperaturas. Sólo si las consideraciones teóricas son reforzadas con argumentos de naturaleza práctica, relativos a costes de producción y disponibilidad tecnológica, es posible llegar a enunciar la respuesta dada anteriormente. Estas consideraciones se analizan con cierto detalle a continuación.

### ***2.1.1 Límites a los rendimientos de los sistemas solares térmicos no concentradores.***

Para derivar el límite máximo del rendimiento de la conversión de energía solar a trabajo en un sistema solar térmico no concentrador es suficiente con considerar un modelo muy simple de sistema solar que opere en las mejores condiciones posibles. Considérese, por ejemplo, el sistema definido por una placa plana y homogénea (absorbedor), de propiedades materiales constantes y espesor despreciable que está

expuesta a la radiación solar por su superficie frontal y que cede calor a un fluido de trabajo por su superficie posterior (ver Figura 2-1).

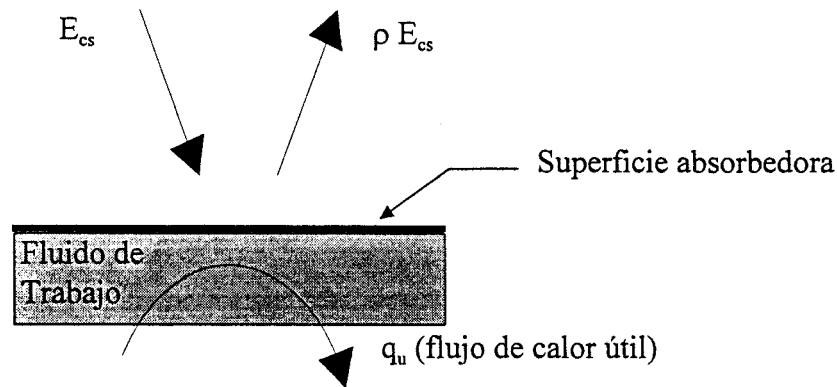


Figura 2-1. Esquema del modelo ideal de sistema solar térmico no concentrador.

A partir de este sistema se puede construir un modelo de las características deseadas si se imponen las siguientes condiciones/simplificaciones:

1. Con excepción de las pérdidas térmicas por radiación a través de su superficie frontal, todas las pérdidas térmicas del sistema son despreciables.
2. Para el cálculo de las pérdidas por radiación se puede considerar que todos los cuerpos en el Universo, excepto el absorbedor y el Sol, son cuerpos negros a la temperatura ambiente,  $T_a^a$ .

<sup>a</sup>, Aunque suficiente y adecuada para el objetivo que aquí se persigue, lo cierto es que la hipótesis de que todos los cuerpos que configuran el ambiente, con excepción del Sol, están a la temperatura ambiente  $T_a$ , es simplista. De hecho, la temperatura equivalente de cuerpo negro de la atmósfera para la transmisión de calor por radiación (temperatura de cielo,  $T_{cielo}$ ) es por lo general distinta a la temperatura media del aire. Cuando el cielo está cubierto y/o la humedad es alta, la temperatura del cielo es similar a la de éste. Sin embargo, cuando el cielo está claro y hay poca humedad, la temperatura del cielo puede llegar a ser 30°C más baja que la temperatura del aire<sup>18</sup>.

3. El absorbedor está en todo momento orientado perpendicularmente a la dirección principal de propagación de la radiación solar, por lo que la radiación solar que incide sobre la superficie frontal del absorbedor está distribuida uniformemente sobre un ángulo sólido de  $6.08 \times 10^5 \text{sr}$ , centrado con respecto a la perpendicular a la superficie del absorbedor<sup>a</sup>.
4. El valor de la irradiancia solar sobre la superficie del absorbedor es el de a la constante solar<sup>b</sup>,  $E_{CS} = 1\,367 \text{ W/m}^2$ , y su distribución espectral es la de un cuerpo negro a  $T_S = 5\,777 \text{K}$ <sup>c</sup>.

Bajo estas hipótesis, el modelo de sistema solar térmico no concentrador considerado consiste simplemente en una placa de espesor despreciable, que no ofrece resistencia a la transferencia de calor por conducción y que se mantiene a una temperatura uniforme,  $T_{abs}$ . Por su superficie frontal la placa intercambia calor por radiación con el Sol (que se considera a estos efectos un cuerpo negro a la temperatura equivalente,  $T_S$ ) y con el entorno (que se considera a estos efectos un cuerpo negro a la

---

<sup>a</sup> El ángulo sólido del Sol se calcula a partir de su radio,  $R_S = 6.96 \times 10^8 \text{ m}$ , y de la distancia media desde la Tierra al Sol,  $D_{TS} = 1.496 \times 10^{11} \text{ m}$ , mediante la expresión  $\Omega = \left( \frac{R_S}{D_{TS}} \right)^2$ .

<sup>b</sup> La constante solar,  $E_{CS}$ , se define como la potencia por unidad de superficie (irradiancia) de la radiación solar que incide sobre una superficie orientada perpendicularmente con respecto a la dirección principal de los rayos del sol y situada en el espacio a la distancia media anual Tierra - Sol. De los distintos valores de esta constante que se han propuesto en la literatura; el que se utiliza a lo largo de esta tesis es el recomendado por Winter et al.<sup>19</sup> como más fiable.

<sup>c</sup> A efectos de la demostración se supone que el Sol es un cuerpo negro esférico de radio,  $R_S = 6.69 \times 10^8 \text{ m}$ . A partir de esta suposición, la temperatura equivalente de cuerpo negro del Sol,  $T_S = 5\,777 \text{ K}$ , se determina aplicando la ley de Stefan-Boltzmann e imponiendo la condición de que el valor de la constante solar sea igual al determinado experimentalmente.



temperatura de cielo,  $T_a$ ; mientras que por su superficie trasera, la placa cede calor, a la temperatura de equilibrio  $T_{abs}$ , a un fluido de trabajo.

Puesto que el propósito del sistema solar térmico ideal que se está considerando es convertir la energía de la radiación solar que incide sobre él en calor a la temperatura de operación del absorbedor y cederlo a un fluido de trabajo, al flujo de calor cedido por el absorbedor al fluido de trabajo se le denominará en lo sucesivo “flujo de calor útil”, y se le designará por,  $q_u$ .

El rendimiento térmico,  $\eta_{SQ}$ , de este sistema solar se define como el cociente entre la potencia calorífica útil cedida por el absorbedor por unidad de tiempo y la potencia de la radiación solar incidente sobre el mismo. De acuerdo con las hipótesis establecidas este rendimiento puede expresarse como:

$$\eta_{SQ} = \frac{E_{cs}}{q_u} \quad (2 - 2)$$

donde  $E_{cs}$  es la constante solar y  $q_u$  el flujo de calor útil.

En estado estacionario (o sea, cuando  $T_{abs}$  es constante) el flujo de calor útil,  $q_u$ , vendrá dado por la diferencia entre el flujo de calor absorbido,  $q_{abs}$ , y las pérdidas por radiación por unidad de superficie,  $q_{perd}$ <sup>a</sup>:

---

<sup>a</sup> El flujo de calor se define como la cantidad de calor por unidad de tiempo y unidad de área que atraviesa una superficie. Tiene dimensiones de energía por unidad de área ( $W/m^2$  en el Sistema Internacional).

$$q_u = q_{abs} - q_{perd} \quad (2 - 3)$$

El flujo de calor absorbido,  $q_{abs}$ , se puede expresar como:

$$q_{abs} = \int_0^{\infty} \int_0^{\theta_s} \int_0^{2\pi} \alpha_{\lambda,\Omega}(\lambda, \theta, \varphi) L_{bb,\lambda}(T_s, \lambda) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi d\lambda \\ + \int_0^{\infty} \int_{\theta_s}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \alpha_{\lambda,\Omega}(\lambda, \theta, \varphi) L_{bb,\lambda}(T_a, \lambda) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi d\lambda \quad (2 - 4)$$

y las pérdidas por radiación,  $q_{perd}$ , como:

$$q_{perd} = \int_0^{\infty} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \varepsilon_{\lambda,\Omega}(\lambda, \theta, \varphi) L_{bb,\lambda}(T_{abs}, \lambda) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi d\lambda \quad (2 - 5)$$

donde  $\theta$  y  $\varphi$  son el ángulo cenital y acimutal respectivamente (ver Figura 2-2);  $\alpha_{\lambda,\Omega}(\lambda, \theta, \varphi)$  es la absorptividad direccional espectral de la superficie;  $\varepsilon_{\lambda,\Omega}(\lambda, \theta, \varphi)$  es la emisividad direccional espectral de la superficie<sup>a</sup>; y  $L_{bb,\lambda}(T, \lambda)$  es la radiancia<sup>b</sup> espectral del cuerpo negro.

<sup>a</sup> En términos rigurosos, tanto la emisión direccional espectral como la absorción direccional espectral, son también funciones de la temperatura de superficie. Sin embargo, esta dependencia no se ha tenido en cuenta ya que es insignificante para la mayoría de los materiales, al menos en los promedios de las distancias de las ondas relevantes para los cálculos de radiación térmica (ver Modest<sup>21</sup>, pp84).

<sup>b</sup> La radiación,  $L$ , es la energía por unidad de tiempo por unidad de área proyectada por unidad de ángulo sólido alrededor de la dirección de propagación de la radiación dejando una fuente o, en general, cualquier superficie de referente en una dirección dada (ver Boyd<sup>22</sup>, o el Estándar Internacional ISO 31/6-1980<sup>23</sup>).

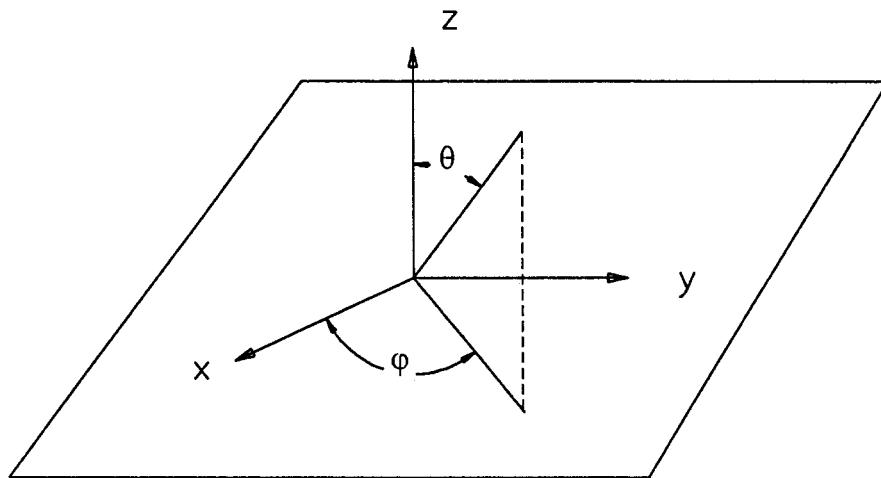


Figura 2-2. Definición de los ángulos cenital,  $\theta$ , y acimutal  $\varphi$

Si se supone que la absorptividad de la superficie del absorbedor puede ser diseñada a voluntad, está claro que no se consigue ventaja alguna si se diseña o selecciona una superficie cuya absorptividad sea función del ángulo acimutal,  $\varphi$ , ya que ni la radiación solar ni la proveniente del entorno son función de  $\varphi$ .

Por tanto, en la determinación del límite máximo del rendimiento térmico de un sistema solar térmico no concentrador, no hay pérdida de generalidad si se supone que la absorptividad direccional espectral del absorbedor es función únicamente del ángulo cenital y de la longitud de onda. Puesto que por la Ley de Kirchhoff la absorptividad espectral direccional y la emisividad espectral direccional han de ser iguales, al considerar que la primera es independiente de  $\varphi$ , se ha de considerar que la segunda también lo es.

De acuerdo con todo lo anterior, la Ecuación 2 - 3 puede escribirse:

$$q_u = 2\pi \int_0^{\infty} \int_0^{\theta_s} \varepsilon_{\lambda, \Omega}(\lambda, \Omega) \left[ L_{bb, \lambda}(T_s, \lambda) - L_{bb, \lambda}(T_{abs}, \lambda) \right] \cos \theta \sin \theta d\theta d\lambda$$

$$- 2\pi \int_0^{\infty} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \varepsilon_{\lambda, \Omega}(\lambda, \Omega) \left[ L_{bb, \lambda}(T_{abs}, \lambda) - L_{bb, \lambda}(T_a, \lambda) \right] \cos \theta \sin \theta d\theta d\lambda$$
(2 - 6)

donde, la primera integral doble representa el flujo neto de calor desde el Sol a la superficie y la segunda el flujo neto de calor desde la superficie al entorno.

Por definición:

$$L_{bb, \lambda}(T, \lambda) = \frac{1}{\pi} M_{bb, \lambda}(T, \lambda)$$
(2 - 7)

donde  $M_{bb, \lambda}$  es la excitancia radiante del cuerpo negro, esto es, la energía por unidad de tiempo y unidad de área emitida por un cuerpo negro en cualquier punto de su superficie.

De acuerdo con la Ley de Planck:

$$M_{bb, \lambda}(T, \lambda) = c_1 \frac{n^{-2} \lambda^{-5}}{\exp(c_2/n\lambda T) - 1}$$
(2 - 8)

donde  $n$  es el índice de refracción del medio en que está inmerso el cuerpo negro (o sea, el cociente entre la velocidad de la luz en vacío y la velocidad de la luz en el medio), y  $c_1$  y  $c_2$  son las denominadas primera y segunda constantes de Planck<sup>a</sup>.

A partir de las expresiones anteriores resulta evidente que, para cualquier longitud de onda, tanto la radiancia como la excitancia espectral de un cuerpo negro aumentan al aumentar su temperatura.

Como la temperatura de operación del absorbedor,  $T_{abs}$ , será siempre mayor que o igual que la temperatura ambiente,  $T_a$ , y menor o igual que la temperatura equivalente de cuerpo negro del Sol,  $T_s$ , es posible establecer las siguientes desigualdades, válidas para cualquier longitud de onda:

$$\begin{aligned} L_{bb,\lambda}(T_s, \lambda) - L_{bb,\lambda}(T_{abs}, \lambda) &\geq 0 \\ L_{bb,\lambda}(T_{abs}, \lambda) - L_{bb,\lambda}(T_a, \lambda) &\geq 0 \end{aligned} \quad (2-9)$$

En base a estas desigualdades, los integrandos de las dos integrales dobles que aparecen en la Ecuación 2 - 6 serán siempre mayores o igual que cero, dado que la emisividad espectral direccional es, por definición, un número entre cero y uno.

---

<sup>a</sup> Están relacionadas con las constantes básicas de la naturaleza. De este modo,  $c_1 = 2 \pi^5 h^6 c^3 / 15 \pi^3 k^3 = 3.741832 \cdot 10^{-16}$  W m<sup>2</sup>, y  $c_2 = hc/k = 1.438786 \cdot 10^{-2}$  m K, donde  $c$  es la velocidad de la luz en vacío,  $h$  es la constante de Planck, y  $k$  es la constante de Boltzmann (ver la Norma Internacional ISO 31/6-1980<sup>23</sup>).

Para cualquier temperatura de operación el flujo de calor cedido por el absorbedor será máximo cuando su superficie absorbedora tenga una emisividad espectral direccional de la forma:

$$\varepsilon_{\lambda,\Omega}(\lambda,\theta) = \varepsilon_{\lambda,\Omega}(\theta) = \begin{cases} 1 \forall \theta \in [0, \theta_s] \\ 0 \text{ en cualquier otro lugar} \end{cases} \quad (2-10)$$

Es decir, el absorbedor óptimo ha de tener una superficie absorbedora que absorba y emita como un cuerpo negro (con emisividad y absorptividad igual a la unidad), pero sólo dentro de un cono de direcciones centrado en torno a la perpendicular a la superficie e igual al ángulo sólido subtendido por el Sol visto desde la superficie. En cualquier dirección fuera del referido cono, la superficie absorbedora no debe absorber ni emitir radiación. En definitiva el absorbedor óptimo debe tener una superficie absorbedora que, desde el punto de vista del intercambio de calor por radiación, únicamente “vea” al Sol, no intercambiando calor por este mecanismo con ningún otro cuerpo en el Universo.

Si se efectúan las integrales de la Ecuación 2 - 6 bajo el supuesto de que la emisividad espectral direccional,  $\varepsilon_{\lambda,\Omega}$ , es la indicada en la Ecuación 2- 10 se obtiene el flujo de calor útil cedido por el absorbedor óptimo en función de su temperatura de operación.

Si se supone que el índice de refracción del medio que rodea al absorbedor es igual a la unidad la expresión de este flujo de calor se reduce a:

$$q_u = \frac{\Omega_s \sigma}{\pi} (T_s^4 - T_{abs}^4) \quad (2 - 11)$$

donde  $\sigma = 5.67032 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$  es la constante de Stefan-Boltzmann<sup>a</sup> y  $\Omega_s$  es el ángulo subtendido por el Sol visto desde la Tierra.

De la definición de  $T_s$  se deduce que:

$$\frac{\Omega_s \sigma}{\pi} T_s^4 = E_{sc} \quad (2 - 12)$$

donde  $E_{sc}$  es la constante solar. Por tanto, el rendimiento térmico del sistema,  $\eta_{SQ}$ , puede expresarse como:

$$\eta_t(T_{abs}) = 1 - \left( \frac{T_{abs}}{T_s} \right)^4 \quad (2 - 13)$$

La expresión obtenida constituye por lo tanto un límite superior al rendimiento térmico de los sistemas solares no concentradores. Para obtener un límite superior al

---

<sup>a</sup> Esta constante está también relacionada con las constantes fundamentales de la naturaleza. De hecho,  $\sigma = (2\pi^5 k^4) / (15h^3 c^2)$ , donde  $k$  es la constante de Boltzmann,  $h$  es la constante de Planck, y  $c$  es la velocidad de la luz en vacuo.

rendimiento,  $\eta_{SW}$ , de conversión de energía solar en trabajo, basta con suponer que el sistema solar ideal que se está considerando se usa como foco caliente de una máquina de Carnot. El rendimiento buscado será el producto del rendimiento de térmico del sistema solar por el rendimiento energético de la máquina de Carnot, es decir:

$$\eta_{SW}(T_{abs}, T_{cielo}) = \eta_{SQ} \times \eta_{QW} = \left[ 1 - \left( \frac{T_{abs}}{T_s} \right)^4 \right] \times \left( 1 - \frac{T_{cielo}}{T_{abs}} \right) \quad (2 - 14)$$

Para una temperatura ambiente,  $T_a$ , el rendimiento,  $\eta_{SW}$ , es únicamente función de la temperatura de operación absorbedor,  $T_{abs}$ . Puesto que, al aumentar  $T_{abs}$  el rendimiento térmico del sistema solar disminuye, mientras que el rendimiento de la máquina de Carnot aumenta, es evidente que el rendimiento global de conversión de energía solar en trabajo ha de tener un máximo. Este se obtiene, como siempre, imponiendo la condición de que la primera derivada de  $\eta_{SW}$  con respecto a  $T_{abs}$  sea igual a cero<sup>a</sup>, lo que conduce a:

$$\left( \frac{T_{opt}}{T_s} \right)^5 - \frac{3T_a}{4T_s} \left( \frac{T_{opt}}{T_s} \right)^4 - \frac{T_a}{T_s} = 0 \quad (2 - 15)$$

Ecuación que define de forma implícita una relación funcional entre la temperatura óptima de operación del absorbedor,  $T_{opt}$ , y la temperatura ambiente  $T_a$ .

---

<sup>a</sup> Obviamente, esta condición garantiza sólo que el correspondiente punto es un extremo. Para decidir si es un mínimo o un máximo se debe analizar el signo de la segunda derivada de la función con respecto a la variable independiente.



Para una temperatura ambiente dada, la temperatura óptima del absorbedor será una raíz real de esta ecuación polinómica de quinto grado.

Por ejemplo, si se resuelve la Ecuación 2 - 15 para una temperatura de ambiente de 298.15 K (25°C) se obtiene una temperatura óptima de operación del absorbedor de 2466 K. Para esta temperatura el rendimiento térmico del sistema solar es 0.967 y el rendimiento energético de la máquina de Carnot 0.879, siendo, por tanto en este caso, el rendimiento de conversión de energía solar en trabajo 0.858.

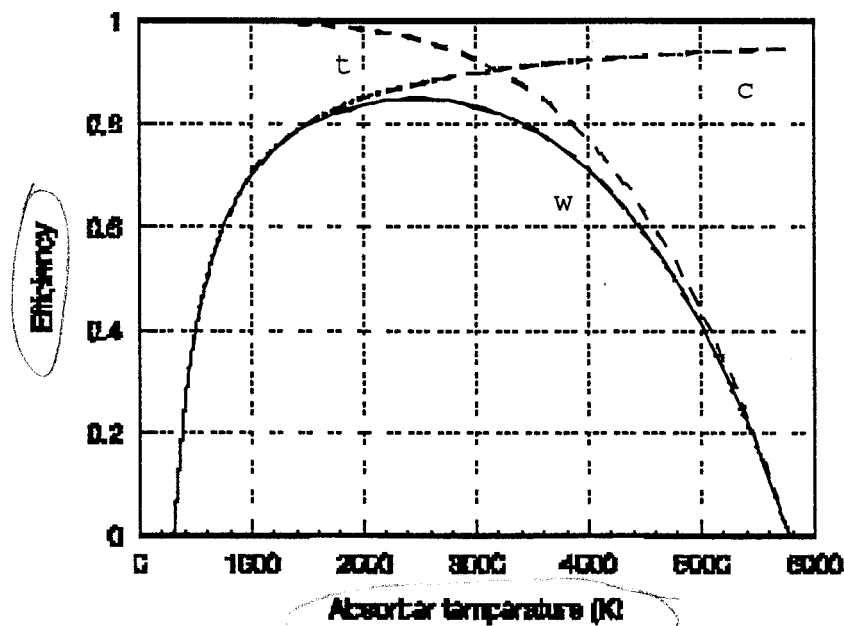


Figura 2-3. Límites máximos del rendimiento térmico y de energía solar a trabajo de sistemas solares térmicos no concentradores para una temperatura ambiente  $T_a = 298.15$  K.

La Figura 2-1 muestra los rendimientos  $\eta_{sw}$ ,  $\eta_{SQ}$  y  $\eta_{QW}$  como función de la temperatura de operación del absorbedor, para una temperatura ambiente de 25°C. Esta figura confirma que, efectivamente, el rendimiento de conversión de energía solar en

trabajo,  $\eta_{SW}$ , alcanza el valor máximo de 0.850 a la temperatura de operación del absorbedor de 2466 K obtenida al resolver la Ecuación 2 - 15.

La discusión precedente pone en evidencia que las Ecuaciones 2 - 13 y 2 - 14 representan los límites superiores de los rendimientos de las conversiones térmicas y de energía solar en trabajo de los sistemas solares térmicos no concentradores. De hecho, para poder aproximarse a estos rendimientos un sistema solar térmico no concentrador tendría que tener un absorbedor con una superficie absorbedora de muy alta selectividad angular. En la actualidad, casi todas las superficies absorbedoras disponibles se caracterizan porque no tienen selectividad angular, o tienen muy poca, por lo que los rendimientos de los sistemas solares no concentradores diseñados hasta la fecha están muy lejos de los límites deducidos<sup>a</sup>.

Se pueden conseguir límites más realistas para los rendimientos de los sistemas solares térmicos no concentradores, si la hipótesis de que la superficie del absorbedor “ve” solamente el Sol se relaja. Sustituyendo esta hipótesis por la suposición, menos restrictiva, de que la emisividad espectral de la superficie absorbedora (considerada siempre función únicamente de la longitud de onda) es distinta de cero sólo dentro de un ángulo sólido  $\Omega_s$ , (mayor o igual que el ángulo sólido subtendido por el Sol,  $\Omega_s$ ) centrado alrededor de la perpendicular a la superficie, se tiene que:

---

<sup>a</sup> Se pueden producir superficies con algún grado de selectividad angular alterando mecánicamente su terminación a nivel microscópico o macroscópico<sup>21, 24, 25</sup>.

$$\varepsilon_{\lambda,\Omega}(\lambda,\Omega) = \begin{cases} \varepsilon(\lambda) \forall \theta \in [0, \theta_v] \\ 0 \text{ en cualquier otro lugar} \end{cases} \quad (2-16)$$

En este caso, el flujo de calor útil se puede expresar como:

$$q_u = \frac{\Omega_s}{\pi} \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) f(\lambda) d\lambda \quad (2-17)$$

donde:

$$f(\lambda) = M_{bb,\lambda}(T_s, \lambda) + \left( \frac{\Omega_v}{\Omega_s} - 1 \right) M_{bb,\lambda}(T_a, \lambda) + \left( \frac{\Omega_v}{\Omega_s} \right) M_{bb,\lambda}(T_{abs}, \lambda) \quad (2-18)$$

Para obtener el límite máximo del flujo de calor útil, la función  $\varepsilon(\lambda)$  debe definirse como:

$$\varepsilon(\lambda) = \begin{cases} 1 \forall \lambda \mid f(\lambda) > 0 \\ 0 \forall \lambda \mid f(\lambda) \leq 0 \end{cases} \quad (2-19)$$

A partir de la definición de  $f(\lambda)$ , se puede probar (ver Apéndice A) que existe una cierta longitud de onda  $\lambda_c$  tal que:

$$f(\lambda) = \begin{cases} > 0 \forall \lambda \in (0, \lambda_c) \\ = 0 \mid \lambda = \lambda_c \\ < 0 \forall \lambda \in (\lambda_c, +\infty) \end{cases} \quad (2-20)$$

Según esto, la definición de  $\varepsilon(\lambda)$  que maximiza el flujo de calor útil es:

$$\varepsilon(\lambda) = \begin{cases} 1 & \forall \lambda < \lambda_c \\ 0 & \text{en cualquier otro lugar} \end{cases} \quad (2 - 21)$$

Usando la definición anterior en la Ecuación 2 - 17 se obtiene la siguiente expresión para el flujo de calor útil máximo:

$$q_{u,max} = \frac{\Omega_s}{\pi} \int_0^{\lambda_c} f(\lambda) d\lambda \quad (2 - 22)$$

Obviamente, el valor de  $\lambda_c$  depende de los valores de  $\Omega_s$ ,  $\Omega_v$ ,  $T_s$ ,  $T_a$  y  $T_{abs}$ <sup>a</sup>.

Así, para cada conjunto de valores  $\Omega_s$ ,  $\Omega_v$ ,  $T_s$  y  $T_a$ , tanto  $\lambda_c$  como el flujo de calor útil máximo serán función de la temperatura del absorbedor,  $T_{abs}$ .

Desgraciadamente, no existe una solución explícita para  $\lambda_c$ , ya que la ecuación

$$f(\lambda) = 0 \quad (0 < \lambda \leq \infty) \quad (2 - 23)$$

es trascendente, por lo que para su resolución hay que recurrir a los métodos numéricos.

Una vez determinado  $\lambda_c$  para una determinada temperatura de operación, el flujo de calor útil máximo correspondiente a esa temperatura puede evaluarse usando la

---

<sup>a</sup> Para algunas combinaciones de estos parámetros  $\lambda_c$  puede ser igual a infinito. Esto corresponde al caso en que  $f(\lambda)$  es positiva para todo el intervalo  $(0, +\infty)$ .

Ecuación 2 - 22. Puesto que la integral que aparece en dicha ecuación admite solamente solución en forma analítica cerrada cuando  $\lambda_c = \infty$ , su evaluación, en general, requiere también del uso de métodos numéricos. Una vez calculado los rendimientos térmicos máximos, multiplicando éstos por los correspondientes de Carnot se obtienen los rendimientos máximos de conversión de energía solar en trabajo.

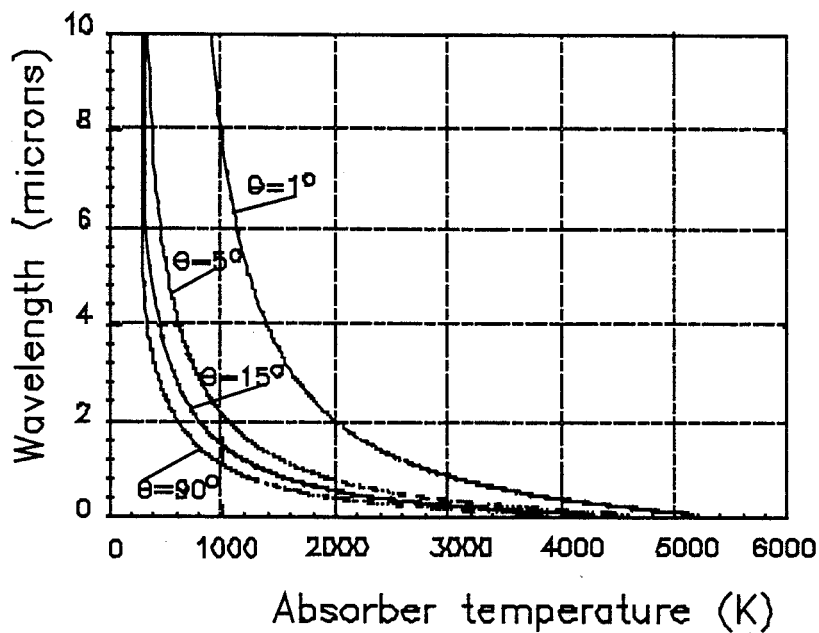


Figura 2-4. Longitud de onda a partir de la cual la absorptividad espectral debe ser cero para un sistema solar optimizado sin concentración, para diferentes grados de selectividad angular. ( $T_a = 5777$  K,  $T_s = 298.15$  K).

La Figura 2-4 muestra  $\lambda_c$  en función de la temperatura de operación del absorbedor para superficies absorbedoras con distintos grados de selectividad angular. Las figuras 4 y 5 muestran los límites máximos de los rendimientos térmicos y de conversión de energía solar en trabajo para estas mismas superficies. La selectividad angular de cada superficie se indica mediante el ángulo cenital,  $\theta$ , que define el semiángulo de apertura del cono de direcciones con respecto a la perpendicular a la

superficie para las cuales la emisividad (y por lo tanto la absorptividad) de la superficie es distinta de cero.

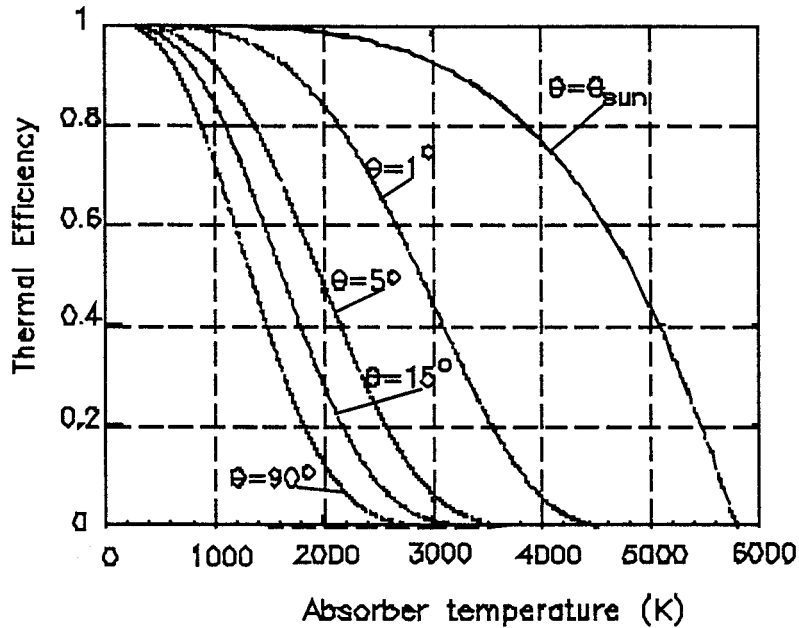


Figura 2-5. Límites superiores de las eficiencias térmicas en sistemas sin concentración y con diferentes grados de selectividad. ( $T_a = 5777$  K,  $T_s = 298.15$  K).

La Figura 2-4 pone de manifiesto que para cualquier temperatura de operación del absorbente, la longitud de onda que especifica el corte óptimo en la selectividad espectral,  $\lambda_c$ , aumenta con la selectividad angular de la superficie. Por ejemplo, mientras que para un sistema operando a  $1000^\circ\text{C}$  con un absorbente hipotético que no absorbe a ángulos mayores que  $1$  un grado, la absorptividad espectral para optimizar el sistema debe ser cero para longitudes de onda de más de ocho micrones, esta absorptividad debe ser cero para longitudes de onda de más de un micrón en el caso de una superficie isotrópica.

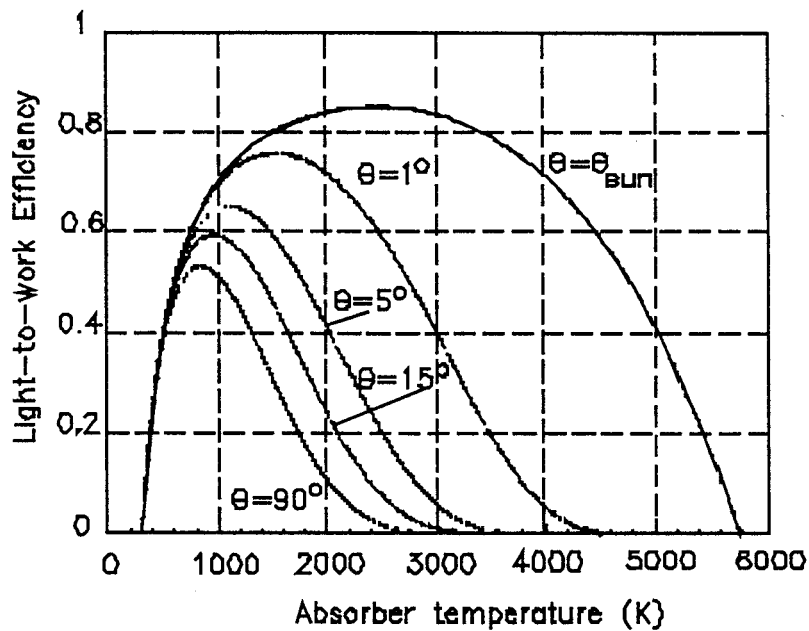


Figura 2-6. Límites superiores de los rendimientos térmico y de conversión de energía solar a trabajo en sistemas no concentradores con diferentes grados de selectividad angular ( $T_s = 5777$  K,  $T_c = 298.15$  K).

Por otro lado, la Figura 2-5 y la Figura 2-6 muestran como, cualquiera que sea la selectividad angular de la superficie absorbadora, los rendimientos eventualmente disminuyen con la temperatura y como, a muy alta temperatura, solamente para superficies con alto grado de selectividad angular tiene un aumento en esa selectividad un efecto importante en los rendimientos. Así, el rendimiento máximo de conversión de energía solar en trabajo de un sistema operando a  $3000$  °C con una selectividad angular de un grado aumentaría de un 40 % a más de un 82 % si la selectividad angular del sistema se reduce hasta que sólo absorba radiación dentro del cono de direcciones correspondiente al disco solar. Sin embargo, una disminución del cono de absorción de, digamos, 80 a 60 grados, apenas afectaría el bajo rendimiento del sistema.

Resumiendo la discusión anterior, puede concluirse que, si se reducen al mínimo las pérdidas por convección y conducción, es teóricamente concebible que un sistema térmico no concentrador diseñado para la generación de electricidad o para el suministro de calor de proceso a alta temperatura pueda funcionar eficientemente si se cuenta con un mecanismo que permita diseñar la absorptividad del sistema “modelando” su selectividad angular y espectral. Esto confirma que, contrario a lo que se podría deducir de algunos trabajos publicados en la literatura<sup>26</sup>, las consideraciones teóricas con respecto al comportamiento de los sistemas solares térmicos no concentradores no son suficientes, por sí solas, para excluir la posibilidad de su uso en aplicaciones a alta temperatura.

### ***2.1.2 Límites actuales de las eficiencias de los sistemas no concentradores.***

No obstante todo lo dicho en el apartado anterior, a la vista del estado actual de la tecnología solar, la respuesta práctica a la pregunta, “¿bajo qué circunstancias es conveniente, o necesario, usar concentradores solares?” es muy clara. Hace 26 años fue formulada concisamente por Braun<sup>27</sup>, ex-director del Departamento de Programas de Sistemas de Energía Solar Térmica del Departamento de Energía de los EE.UU:

*“La concentración de la luz solar es necesaria para aquellas aplicaciones que requieran temperaturas por encima de 200°F (93°C)”.*

El hecho de que esta respuesta haya sido válida durante 26 años y lo siga siendo en la actualidad indica la existencia de limitaciones tecnológicas y/o económicas



que descartan la comercialización de sistemas solares sin concentración para aplicaciones a alta temperatura.

En la Tabla I se muestran las temperaturas máximas de operación de los sistemas solares térmicos no concentradores más comunes y en la Tabla II las correspondientes a los sistemas solares térmicos de concentración. La comparación de ambas tablas apoya la conclusión de Braun. Esta comparación indica también que, en el estado actual de desarrollo de la tecnología, el nivel de concentración en un sistema solar térmico está determinado por el nivel de temperatura al cual debe operar: mientras más alta sea la temperatura de operación del sistema, más concentración se necesita para alcanzarla.

**Tabla I. Temperatura máxima de operación de sistemas solares térmicos no concentradores.**

Tipo de colector	Temperatura máxima aproximada de operación (°C)
Estanque solar poco profundo	40-60
Estanque solar profundo (gradiente salino)	40-90
Colector plano	
(a) Diseño convencional	40-80
(b) de plástico	30-60
(c) sin cristal	10-20

Tabla II. Temperatura máxima aproximada de operación de colectores solares sin concentración.

Tipo de colector	Temperatura máxima aproximada de operación (°C)
CPC de orientación fija o ajuste estacional	80-120
CPC de tubos receptores evacuados	100-200
Cilindro - parabólico	300
Reflector cilíndrico de Fresnel	250
Reflector cilíndrico fijo y receptor móvil.	250
Disco parabólico o reflector de Fresnel de revolución	≥1500
Sistema de torre o receptor central	≥1000
Reflector fijo semiesférico y receptor móvil.	400

## 2.2 Ventajas conceptuales de los sistemas concentradores

La característica básica de los sistemas solares térmicos de concentración es el uso de aparatos ópticos para direccionar la radiación solar que incide sobre una determinada superficie, denominada superficie de captación,  $A_c$ , y concentrarla sobre una superficie de menor tamaño: la superficie absorbadora del receptor, o absorbedor, del sistema. El cociente de las áreas de estas dos superficies se denomina razón de concentración geométrica:

$$C_g = \frac{A_c}{A_{abs}} \quad (2 - 24)$$

Una razón de concentración, tal vez más significativa, es la razón de concentración de densidad del flujo medio,  $C_f$ , definida como el cociente entre el flujo o

densidad de potencia (potencia por unidad de área) medio que incide sobre la superficie captadora y el flujo medio que incide sobre la superficie absorbadora:

$$C_f = \frac{\frac{P_{abs-i}}{A_{abs}}}{\frac{P_c}{A_c}} \quad (2 - 25)$$

donde  $P_{abs-i}$  es la potencia total de la radiación solar incidente sobre el superficie absorbadora y  $P_c$  es la incidente sobre el superficie de captación.

Si  $\eta_0$  es la fracción de la potencia asociada con la radiación solar que incide sobre la superficie de captación que alcanza el absorbador, entonces:

$$C_f = \eta_0 C_g \quad (2 - 26)$$

Como  $\eta_0$  es un número entre cero y uno, siempre se verifica que:

$$C_f \leq C_g \quad (2 - 27)$$

donde el signo de igual se aplica sólo en el caso ideal en el que no haya pérdidas dentro del concentrador.

Para probar desde un punto de vista teórico que los sistemas solares térmicos concentradores presentan ventajas conceptuales sobre los sistemas solares térmicos no

concentradores, se necesita definir un modelo de sistema concentrador que sea lo suficientemente complicado como para representar el comportamiento básico de los sistemas concentradores reales y lo suficientemente simple como para facilitar derivaciones matemáticas. En este caso, el propósito no es derivar límites máximos para los rendimientos de los sistemas concentradores, sino probar que bajo circunstancias análogas, los sistemas solares térmicos concentradores funcionan mejor que los sistemas no concentradores. Por lo tanto, las hipótesis del modelo deben representar condiciones de funcionamiento normales en lugar de las mejores condiciones de funcionamiento posibles.

Así, un modelo razonable puede ser el definido por las siguientes hipótesis:

1. Se considera que las pérdidas por conducción y convección son linealmente proporcionales al área del absorbedor y a la diferencia entre la temperatura del absorbedor,  $T_{abs}$ , y la temperatura ambiente,  $T_a$ ; siendo el factor de proporcionalidad el coeficiente global de convección - conducción  $U$ , que se supone constante.
2. Las pérdidas por radiación se consideran insignificantes, salvo las correspondientes a la parte "frontal" del absorbedor.
3. Las pérdidas por radiación se calculan suponiendo que todos los cuerpos en el universo, con la excepción del absorbedor y el Sol, son cuerpos negros a temperatura ambiente,  $T_a$ . Esto es, se da por hecho que el aire, el cielo, el suelo, y cualquier otro cuerpo capaz de intercambiar calor radiación con el absorbedor están todos a la temperatura  $T_a$ .

4. Las propiedades materiales del absorbedor y su temperatura son independientes de la posición.
5. La radiación solar incidente es la misma en todos los puntos de la superficie de captación y esta distribuida dentro de un ángulo sólido de  $6.80 \cdot 10^{-5}$  sr. alrededor de su principal dirección de propagación, siendo su la irradiancia incidente igual al valor de la constante solar  $E_{cs}$ .

Bajo estas suposiciones, la potencia de la energía solar captada,  $P_c$ , es:

$$P_c = E_{cs} A_c F \quad (2 - 28)$$

donde  $F$  es un factor (comprendido entre cero y uno) que sirve para tomar en cuenta tanto el hecho de que las superficies del sistema captador puedan no ser perpendiculares a la dirección principal de propagación de la radiación solar (efecto coseno), como los posibles efectos de sombra y bloqueo que se puedan producir en el seno del subsistema de captación y concentración de la radiación solar.

La potencia de la energía absorbida,  $P_{abs-a}$ , es:

$$P_{abs-a} = \alpha \eta_0 P_c \quad (2 - 29)$$

donde  $\alpha$  es la absorptividad global efectiva del absorbedor<sup>a</sup>.

Las pérdidas térmicas son:

$$q_{perd} = \varepsilon \sigma (T_{abs}^4 - T_a^4) A_{abs} + U (T_{abs} - T_a) A_{abs} \quad (2 - 30)$$

donde  $\varepsilon$  es la emisividad global efectiva del absorbedor<sup>a</sup>.

Por lo tanto, el rendimiento térmico del sistema concentrador se puede expresar como:

$$\eta_t = \alpha \eta_0 - \left[ \frac{\varepsilon \sigma}{E_{cs} F} (T_{abs}^4 - T_a^4) + \frac{U}{E_{cs} F} (T_{abs} - T_a) \right] \left( \frac{1}{C_g} \right) \quad (2 - 31)$$

De acuerdo con esta ecuación, a cualquier temperatura, el rendimiento térmico aumenta con la razón de concentración geométrica,  $C_g$ , si el rendimiento óptico del subsistema captador/concentrador,  $\eta_0$ , permanece constante.

---

<sup>a</sup> En el caso de un absorbedor cubierto,  $\alpha$  se interpreta como un producto efectivo de la transmisión-absorción,  $(\tau\alpha)$ .

La última expresión puede escribirse en forma adimensional como sigue:

$$\eta_i = \alpha \eta_0 - \left[ \frac{a}{F} (Z^4 - 1) + \frac{b}{F} (Z - 1) \right] \left( \frac{1}{C_g} \right) \quad (2 - 32)$$

donde:

$$a = \frac{\varepsilon \sigma T_a^4}{E_{cs}} \quad (2 - 33)$$

$$b = \frac{U T_a}{E_{cs}} \quad (2 - 34)$$

$$Z = \frac{T_{abs}}{T_a} \quad (2 - 35)$$

Para una temperatura ambiente e irradiancia solar dadas,  $a$  es función únicamente de la emisividad efectiva del sistema solar térmico, mientras que  $b$  depende sólo del coeficiente global de pérdidas por convección - conducción,  $U$ .

Si el absorbedor del sistema solar térmico se utiliza como foco caliente de una máquina térmica, entonces el rendimiento de conversión de energía solar a trabajo del conjunto (sistema solar - máquina térmica) será el producto del rendimiento de la conversión térmica del sistema solar por el rendimiento energético de la máquina

---

<sup>a</sup> En esta discusión simplificada, hemos tomado  $Z$  (o  $T_{abs}$ ) como un valor característico del absorbedor. En práctica, la temperatura característica de las pérdidas de radiación variarán de las pérdidas conductivas y convectivas.

térmica. Así bajo las hipótesis enunciadas, se obtendrá un límite superior al rendimiento de conversión de energía solar a trabajo si se supone que el rendimiento de la máquina térmica es el de Carnot. De acuerdo con las definiciones efectuadas, este rendimiento o factor de Carnot puede expresarse adimensionalmente en la forma:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{1}{Z} \quad (2 - 36)$$

En ese caso:

$$\eta_{w-max} = \left\{ \alpha \eta_0 - \left[ \frac{a}{F} (Z^4 - 1) + \frac{b}{F} (Z - 1) \right] \left( \frac{1}{C_g} \right) \right\} \left( 1 - \frac{1}{Z} \right) \quad (2 - 37)$$

Derivando con respecto a  $Z$  e igualando a cero,

$$Z^5 - \left( \frac{3}{4} \right) Z^4 + \left( \frac{b}{4a} \right) Z - \left\{ \frac{\alpha \eta_0 F C_g + a + b}{4a} \right\} = 0 \quad (2 - 38)$$

La solución real de esta ecuación dará la temperatura óptima de funcionamiento del sistema, es decir, la que corresponde al valor máximo del rendimiento máximo,  $\eta_{w-max}$ , de conversión de energía solar en trabajo<sup>28</sup>. Mientras mayor sea el término independiente, mayor será el valor de la temperatura óptima. Así, siempre que el rendimiento óptico del subsistema captador/concentrador no disminuya al aumentar la concentración, el valor de la temperatura óptima de operación del sistema aumentará con la concentración. Por ello, un sistema solar térmico de concentración que



esté bien diseñado tendrá mayores rendimientos (térmico y de conversión de energía solar a trabajo) y le corresponderán valores óptimos de temperatura de operación superiores, que un sistema no concentrador que use el mismo tipo de absorbedor y esté diseñado para captar la misma cantidad de energía solar. Obviamente, esta conclusión será válida sólo cuando se estén comparando sistemas que usen superficies absorbedoras que no tengan un alto grado de selectividad angular. El motivo de esto es que (tal y como se demostrará más tarde) el uso de subsistemas concentradores aumenta siempre la distribución angular de la radiación que incide sobre el absorbedor, por lo que estos sistemas no pueden utilizarse eficientemente en conjunción con absorbedores que tengan una alta selectividad angular.

### 2.3 Los límites.

La medida en que la radiación solar, o cualquier otra radiación, puede ser concentrada depende de la distribución angular de la radiación. Si un haz de rayos perfectamente paralelos se hace incidir sobre un reflector con forma de paraboloide, de tal manera que el eje óptico del reflector sea paralelo a la dirección de propagación del haz, todos los rayos del haz se reflejarán a través del punto focal del paraboloide. Cualquier absorbedor que se coloque en el foco, por pequeña que sea su área, interceptará todos los rayos reflejados, no existiendo, en este caso, un límite a la razón de concentración de densidad de flujo medio  $C_f$ .

En el otro extremo, considérese el caso de la radiación isotrópica, como por ejemplo la radiación del cuerpo negro o radiación de equilibrio. En base a

razonamientos termodinámicos es fácil demostrar que si fuese posible concentrar esta radiación sería posible crear un móvil perpetuo de segunda especie, o lo que es lo mismo, violar el Segundo Principio de la Termodinámica.

La radiación solar es un ejemplo intermedio. Desde la superficies de la tierra, el disco solar subtende un ángulo sólido de aproximadamente  $0.008 \times 10^{-3}$  sr, correspondiendo a una apertura angular de  $4.653 \times 10^{-3}$  rad o 16 minutos de arco<sup>20</sup>. Por lo tanto, los rayos que componen la radiación solar directa que incide sobre la superficie terrestre no son paralelos entre sí, sino que se distribuyen sobre un cono de direcciones de semiángulo  $\theta_s$ , alrededor de la línea que une el punto de observación que se esté considerando con el centro del disco solar<sup>a</sup>. Un rayo arbitrario de ese cono, al reflejarse en el reflector paraboloide considerado con anterioridad no interceptará un absorbedor situado en su foco si este es lo suficientemente pequeño.

Cuando la distancia entre la fuente de radiación y la superficie de captación es muy grande comparada con las dimensiones de la superficie, el ángulo sólido subtendido por la radiación es el mismo en cualquier punto de ésta.

La radiación solar que alcanza la Tierra satisface esta condición para todos los tamaños de superficies captadoras utilizados en la práctica.

---

<sup>a</sup> Debido a la dispersión y la absorción en la atmósfera de la Tierra, parte de los rayos solares que componen la luz solar directa se originan en una región del cielo cercana a, pero fuera de, el disco solar (la llamada región circumsolar). Así, el medio-ángulo  $\theta_s$ , es generalmente mayor que los 16 minutos de arco correspondientes al radio angular del disco solar.

La pregunta “¿En qué medida se puede concentrar la radiación solar?” se puede responder tanto con argumentos basados en el Segundo Principio de la Termodinámica<sup>29</sup>, como con argumentos basados en el Teorema de Liouville<sup>a</sup>.

### 2.3.1 Argumentos basados en el Segundo Principio de la Termodinámica.

Considérese una esfera radiante de radio  $r$  situada a una distancia  $R$  de la superficie de captación de un sistema concentrador (Figura 2-1). Désígnese por,  $A_c$ , el área de la superficie de captación (supuesta plana y circular) y por  $d$  a su diámetro. Supóngase, además, que la esfera radia uniformemente en todas direcciones y que el espacio entre la esfera y la superficie de captación está lleno de un medio no participativo que tiene un índice de refracción,  $n$ , función de la frecuencia,  $\nu$ , de la radiación.

---

<sup>a</sup> Los límites de la concentración de radiación solar fueron derivados por primera vez por Winston<sup>30</sup>.

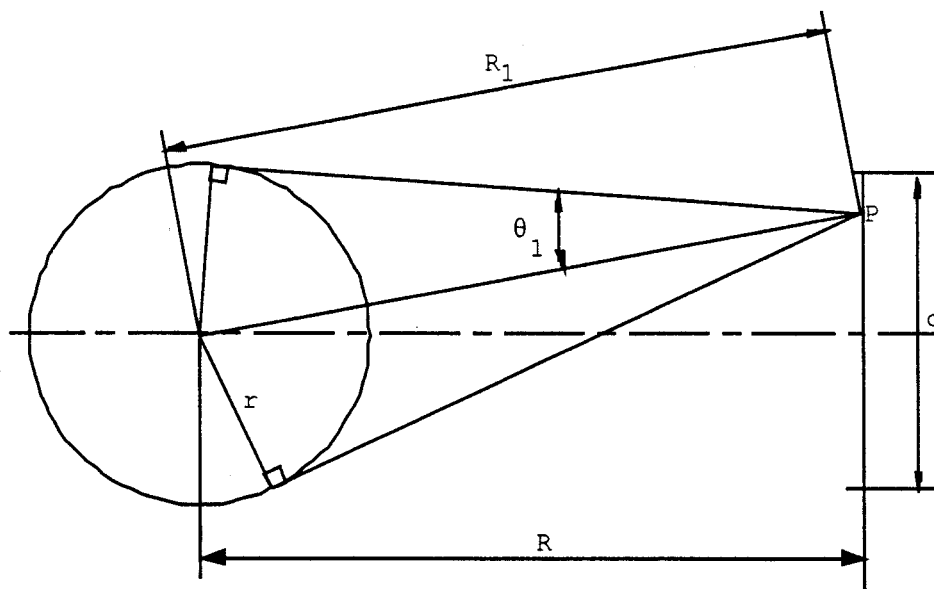


Figura 2-7. Construcción usada para derivar los límites de la concentración

Bajo estas hipótesis, la radiación que alcanza un punto dado de la superficie de captación estará distribuida continuamente sobre un cono de direcciones de semiángulo  $\theta_1$  definido por:

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{r}{R_1}\right) \quad (2 - 39)$$

donde  $R_1$ , es la distancia desde el centro de la esfera al punto de la superficie de captación que se está considerando. Si  $A_c/R$  tiende a cero, se puede considerar  $R_1$  igual a  $R$  para cualquier punto de la superficie de captación.

En esas circunstancias, de acuerdo con la Ecuación 2 - 39, la radiación incidente en cualquier punto de la superficie de captación estará distribuida de forma continua en un cono de direcciones de semiángulo  $\theta$  definido por:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{r}{R}\right) \quad (2 - 40)$$

Supóngase, ahora, que la radiación es radiación de equilibrio, es decir, que tanto la fuente como el absorbedor son cuerpos negros a la misma temperatura  $T$ . De acuerdo con el Segundo Principio de la Termodinámica, en estas condiciones, no puede haber ninguna transferencia neta de calor entre la esfera y el absorbedor. Esto ha de verificarse, no sólo de forma global, para la transferencia neta de calor por radiación en su conjunto, sino para cada frecuencia o intervalo de frecuencias. Es decir, para que se verifique el Segundo Principio, para cualquier frecuencia,  $\nu$ , la transferencia neta de calor por radiación entre la esfera y el absorbedor ha de ser nula.

Para una frecuencia determinada, el diferencial,  $dQ_{sc}(\nu)$ , de la potencia incidente en la superficie de captación será:

$$dQ_{sc}(\nu) = G_{bb,\nu}(T, \nu) n_c^2 F_{cs} A_c d\nu \quad (2 - 41)$$

donde  $G_{bb,\nu}(T, \nu) n_c^2$  es la radiancia espectral del cuerpo negro a la temperatura  $T$ , y  $F_{cs}$  es el factor de forma desde la superficie de captación a la esfera.

De acuerdo con la geometría de la Figura 2-7,  $F_{CS}$  es:

$$F_{cs} = \sin^2 \theta \quad (2 - 42)$$

Substituyendo este valor de  $F_{CS}$  en la expresión de  $dQ_{sc}$ , se obtiene:

$$dQ_{sc}(\nu) = G(T, \nu) n_c^2 \pi \sin^2 \theta A_c d\nu \quad (2 - 43)$$

Si no hay pérdidas ópticas en el concentrador, el diferencial,  $d\dot{Q}_{sa}$ , de la potencia incidente en el absorbedor a la frecuencia  $\nu$ , ha de ser igual al diferencial de la potencia incidente en la superficie de apertura a esa misma frecuencia, esto es:

$$d\dot{Q}_{sa} = dQ_{sc} \quad (2 - 44)$$

Así mismo el diferencial,  $d\dot{Q}_{as}$ , de la potencia que desde el absorbedor incide sobre la esfera será:

$$d\dot{Q}_{sa}(\nu) = G(T, \nu) n_a^2 \pi F_{as} A_a d\nu \quad (2 - 45)$$

donde  $F_{as}$  es el factor de forma desde el absorbedor a la esfera<sup>a</sup>.

---

<sup>a</sup> Por definición,  $F_{as}$  será siempre menor o igual a la unidad.

En el equilibrio,

$$d\dot{Q}_{sa}(\nu) = d\dot{Q}_{as}(\nu) \quad (2 - 46)$$

lo que implica que:

$$C_f = \frac{A_c}{A_{abs}} = F_{as} \frac{n_{abs}^2}{n_c^2 \sin^2 \theta} \quad (2 - 47)$$

Por lo tanto,

$$C_{f,max} = \frac{n_a^2}{n_c^2 \sin^2 \theta} \quad (2 - 48)$$

Se debe tener en cuenta que la expresión anterior para el valor máximo de la razón de concentración de flujo medio,  $C_{f,max}$ , se ha obtenido para la radiación de un cuerpo negro a una frecuencia específica bajo los siguientes argumentos:

1. La radiación incidente en cualquier punto de la superficie de captación llena un cono de direcciones de semiángulo  $\theta_s$ .
2. El índice de refracción del medio que llena el sistema de concentración es independiente de la posición (sólo depende de la frecuencia de la radiación) sobre las superficie de captación y sobre el absorbedor (igual a  $n_c$  y  $n_a$ , respectivamente).

El efecto de un sistema óptico en la trayectoria de un rayo no polarizado dependerá de la frecuencia del rayo, del punto de la superficie de captación por el que el rayo entre en el sistema y de la dirección inicial del rayo.

Así, todos los rayos de una misma frecuencia, que incidan sobre la superficie de captación en un mismo punto y con una misma dirección serán dirigidos a un mismo punto del absorbedor. Esto significa que la distribución espacial de la potencia de la radiación incidente no afecta a la razón de concentración de un sistema, si este no tiene pérdidas ópticas. Por lo tanto, la expresión obtenida para  $C_{f,max}$  es válida incluso cuando la radiación no es radiación de equilibrio, siempre que el resto de las hipótesis utilizadas en la demostración sean satisfechas.

### 2.3.2 Argumentos basados en el Teorema de Liouville.

La primera hipótesis en la que se basa este argumento es que los principios de la óptica geométrica son aplicables para el tipo de sistemas concentradores en consideración (es decir, los efectos de difracción son insignificantes). En este marco se puede definir el problema del límite de concentración como sigue:

*“Dado un haz de rayos con una divergencia angular  $\theta$ , distribuidos sobre la apertura de entrada de un sistema concentrador, ¿cuál es la menor superficie sobre la que estos rayos pueden ser concentrados?”*



Este problema se resuelve adoptando una formulación puramente geométrica, en la que la trayectoria de cada rayo se describe en forma paramétrica, tomando como parámetro una de sus coordenadas, por ejemplo la  $z$ , (a efectos de la demostración, la orientación del eje  $z$  se elige coincidente con la del eje óptico del sistema). Un rayo quedaría, por lo tanto, especificado mediante las funciones,  $x(z)$  e  $y(z)$ , que definen su trayectoria.

En esta formulación, el Principio de Fermat puede expresarse de la siguiente forma:

$$\int_{z_1}^{z_2} n \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2} dz = 0 \quad (2 - 49)$$

donde  $n$  (que puede ser función de  $z$ ) es el índice de refracción del medio en el que está inmerso el rayo.

Si se interpreta el integrando como el Lagrangiano del rayo, la expresión anterior es formalmente idéntica al Principio de Hamilton. Bajo esta interpretación los momentos canónicos conjugados de  $x$  e  $y$  son:

$$P_x = n \frac{dx}{dz} \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2} \quad (2 - 50)$$

$$P_y = n \frac{dy}{dz} \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2} \quad (2 - 51)$$

Debido a la completa analogía formal con la descripción Hamiltoniana, los rayos deben verificar el Teorema de Liouville, es decir, dados dos planos  $z = z_1, z = z_2$ , cualesquiera la siguiente igualdad debe siempre verificarse:

$$\int_{z_1} dx dy dP_x dP_y = \int_{z_2} dx dy dP_x dP_y \quad (2 - 52)$$

es decir, para cualquier plano  $z = cte$  el valor de la integral:

$$\int_z dx dy dP_x dP_y \quad (2 - 53)$$

es siempre un invariante.

Si, en cualquier punto de la apertura de entrada al sistema concentrador los rayos incidentes se distribuyen de forma continua en un cono de direcciones de semiángulo en el vértice  $\theta$  en torno a la dirección del eje óptico del sistema (eje  $z$ ) y el índice de refracción es constante en las superficies de entrada y salida del concentrador y en su seno es constante o depende únicamente de  $z$ , entonces

$$\int_{z_1} dx dy dP_x dP_y = 4 n_c^2 \sin^2 \theta A_c \quad (2 - 54)$$

$$\int_{z_2} dx dy dP_x dP_y = 4 n_a^2 A_a \quad (2 - 55)$$

Por lo tanto

$$C_g = \frac{A_c}{A_a} = \frac{n_a^2}{n_c^2 \sin^2 \theta} \quad (2 - 56)$$

y claramente

$$C_{f,max} = \frac{n_a^2}{n_c^2 \sin^2 \theta} \quad (2 - 57)$$

Esta expresión es idéntica a la obtenida mediante consideraciones termodinámicas basadas en el Segundo Principio y es válida para todos los sistemas concentradores que concentran la radiación en tres dimensiones, tales como los discos parabólicos o cualquier otro concentrador con geometría de revolución. Para aquellos sistemas que concentran la radiación sólo en dos dimensiones, tales como los concentradores cilindro - parabólicos, el límite de concentración bidimensional es la raíz cuadrada del límite tridimensional, es decir:

$$C_{max-2D} = \frac{n_a}{n_c \sin \theta} \quad (2 - 58)$$

Las expresiones derivadas para los límites de concentración son aplicables a cualquier radiación que este distribuida angularmente en un cono de direcciones de

semiángulo  $\theta$ . Éste puede ser interpretado como el semiángulo del cono de direcciones que define el ángulo sólido subtendido por la fuente de radiación. Cuando la fuente es el disco solar, las Ecuaciones 2 - 57 y 2 - 58 proporcionan los valores máximos que puede alcanzar la razón de concentración en sistemas concentradores tri- y bidimensionales respectivamente.

Los límites de concentración ayudan, también, a determinar la fracción máxima de radiación difusa que un concentrador puede “aceptar”. Si sobre una superficie incide una radiación de radiancia constante,  $L$ , distribuida angularmente de forma uniforme en un cono de direcciones de semiángulo  $\theta$  en torno a la normal a la superficie, el flujo de energía asociado con la referida radiación vendría dado  $2\pi L \sin^2 \theta$ . En el caso de que la distribución angular de la radiación que incide sobre la superficie fuese isotrópica, es decir, la radiación estuviese distribuida uniformemente sobre la semiesfera que cubre a la superficie, el flujo de energía vendría dado por  $2\pi L$ . Por tanto, la fracción de la radiación difusa de radiancia constante,  $L$ , que alcanza una superficie dentro de un cono de direcciones de semiángulo  $\theta$  en torno a su normal será  $\sin^2 \theta$ , siendo la “aceptación” de un sistema de razón de concentración,  $C$ , como máximo igual a  $1/C$ .

Estos límites son ideales e inalcanzables en la práctica, debido a errores e imperfecciones en la fabricación de los concentradores y al hecho de que el diseño óptico de la mayoría de los concentradores, impone restricciones adicionales (de naturaleza geométrica) a estos límites, de forma que incluso en condiciones

completamente ideales con esos diseños los valores máximos de la razón de concentración que podrían alcanzarse estarían lejos de los límites hallados.

#### 2.4 Los tipos

La radiación solar al interactuar con la materia, además de ser absorbida, puede ser reflejada (especularmente o no), refractada o difractada. Todas estas posibilidades han sido exploradas en los diseños de sistemas concentradores, así en la literatura es posible encontrar diseños basados en el uso de espejos, lentes, fibras ópticas y hologramas. Adicionalmente, también es posible encontrar diseños de concentradores luminiscentes. Estos concentradores en lugar de modificar alguna de las propiedades de la radiación solar que incide sobre ellos (modificando por ejemplo la dirección de sus rayos como hacen los concentradores reflectivos), lo que hacen es absorberla, devolviendo la energía obtenida en el proceso de absorción como energía radiante con un espectro de frecuencias distinto, que puede ser convenientemente adaptado (modificando la composición y las propiedades de los materiales que configuran el concentrador) al espectro de absorción del transformador de energía (una célula fotovoltaica, por ejemplo)<sup>31,32</sup>

Para el diseño y análisis de concentradores basados en lentes y espejos, es posible hacer uso de la óptica geométrica, es decir, puede utilizarse el concepto de rayo en la modelización del comportamiento óptico y energético de la radiación solar. Para el diseño y análisis de concentradores basados en hologramas y en materiales

luminiscentes y, hasta cierto punto, en fibras ópticas es necesario, sin embargo, tener en consideración la naturaleza ondulatoria de la radiación solar y/o su naturaleza cuántica.

Una manera útil de clasificar los sistemas concentradores es de acuerdo con su comportamiento óptico, según sean o no formadores de imagen. Así, se definen como concentradores formadores de imagen aquellos diseñados de tal forma que concentren toda la radiación proveniente de un mismo punto de la fuente de radiación en un mismo punto de su apertura de salida y, consecuentemente, se definen como concentradores no formadores de imagen a los que no están diseñados de esa forma.

En esta sección se analizan los principales tipos de concentradores reflectivos usados en los sistemas solares térmicos, derivándose los límites de concentración de los más emblemáticos o representativos. El objetivo no es hacer una revisión exhaustiva de los concentradores reflectivos propuestos hasta la fecha en la literatura, sino ilustrar las limitaciones de los conceptos más populares.

#### ***2.4.1 Concentradores reflectivos formadores de imagen***

De acuerdo con la ley de Descartes, en toda reflexión especular el ángulo de incidencia es igual al de reflexión cuando ambos se definen con respecto a la normal a la superficie reflectora. En cualquier punto de una parábola, la normal a la superficie divide en dos partes iguales el ángulo entre el eje de la parábola y la línea que une el punto con el foco - el concepto del concentrador parabólico es tan antiguo como el concepto de parábola.

La Figura 2-8 muestra la sección recta de un concentrador cilindro - parabólico. Esta sección tiene forma de parábola con el eje geométrico de la parábola coincidiendo con el eje óptico del absorbedor. En la figura también se representa la sección recta del absorbedor, que en este caso se supone circular, cuyo centro está situado en el foco de la parábola. Un parámetro que caracteriza este tipo de concentradores es el denominado “ángulo de borde”,  $\phi$ , que es el definido entre el eje óptico y la línea que une el foco con uno de los extremos de la parábola. Si se elige el radio del absorbedor como el mínimo compatible con la condición de que no se pierda ninguna radiación que incida sobre el concentrador con una distribución angular caracterizada por un cono de direcciones de eje paralelo al óptico y semiángulo de apertura  $\theta$ , la figura deja claro que la razón de concentración,  $C_g$ , para este concentrador será:

$$C_c = \frac{\sin\phi}{\pi \sin\theta} = \frac{\sin\phi}{\pi} C_{f,max-2D} \quad (2 - 59)$$

Esta razón de concentración, por lo tanto, alcanza un máximo, igual a  $1/\pi$  del límite de concentración en dos dimensiones, para un ángulo de borde,  $\phi$ , de  $\pi/2$ .

El receptor cilíndrico de sección circular que se ha considerado, aunque es el más utilizado en la práctica, no es sin embargo el receptor de menor área capaz de interceptar toda la radiación reflejada por el concentrador cilindro - parabólico. Gómez<sup>18</sup> ha demostrado que, si se define la sección recta del receptor cilíndrico en función de los puntos de máximo acercamiento al foco de la parábola de los rayos extremos de los

pinces de radiación que inciden sobre el concentrador es posible obtener una razón de concentración 1,36 veces superior a la obtenida con el absorbente de sección circular.

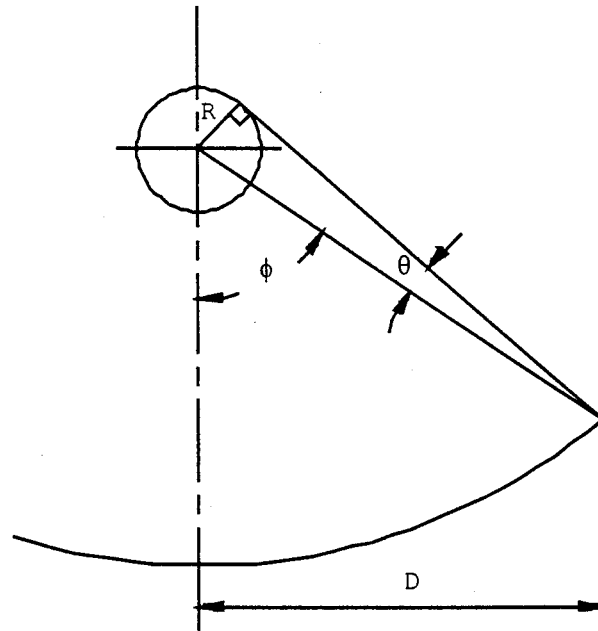


Figura 2-8. Construcción utilizada para derivar el límite de concentración para un colector parabólico con un absorbente circular.

La extensión al caso tridimensional es inmediata, basta con interpretar la Figura 2-8 como la representación de las secciones rectas de un concentrador reflectivo en forma de paraboloides de revolución y de un receptor esférico. En ese caso, la razón de concentración del sistema será:

$$C_g = \frac{\text{sen}^2 \phi}{4 \text{sen}^2 \theta} = \frac{1}{4} \text{sen}^2 \phi C_{g,\text{max}-2D} \quad (2 - 60)$$

la cual tiene un máximo, igual a  $1/4$  del límite de concentración en tres dimensiones, para un ángulo de borde de  $\pi/2$ .



Al igual que antes, Gómez ha demostrado que el receptor esférico no es el de menor superficie capaz de interceptar toda la radiación reflejada. Usando una construcción similar a la usada en el caso bidimensional, ha obtenido una configuración geométrica de receptor con la que se puede obtener una razón de concentración más de tres veces superior a la obtenida con el receptor esférico.

En el caso, también bastante común, de un concentrador cilindro - parabólico que tenga un absorbedor plano situado en su línea focal perpendicularmente al eje óptico, la razón de concentración del sistema, de acuerdo con la Figura 2-9, será:

$$C_c = \frac{\text{sen } \phi \text{ sen } (\phi + \theta)}{2 \text{ sen } \theta} = \frac{\text{sen } \phi \text{ sen } (\phi + \theta)}{2} C_{f, \max-2D} \quad (2-61)$$

Esta razón de concentración alcanza un valor máximo, igual a  $\frac{1}{4} (1 - \text{sen } \theta) C_{f, \max-2D}$ , para un ángulo de borde  $\phi = (1/2)(\theta - \pi/2)$ .

Cuando el área de apertura del sistema concentrador es muy grande, en lugar de utilizar un sólo espejo de grandes dimensiones, que sería difícil de construir y operar, se recurre a sustituir éste por muchos espejos de tamaño razonable. Cada uno de estos espejos se orienta de forma independiente, moviéndose en azimut y elevación de forma que refleje en cada instante la imagen del sol sobre un único.

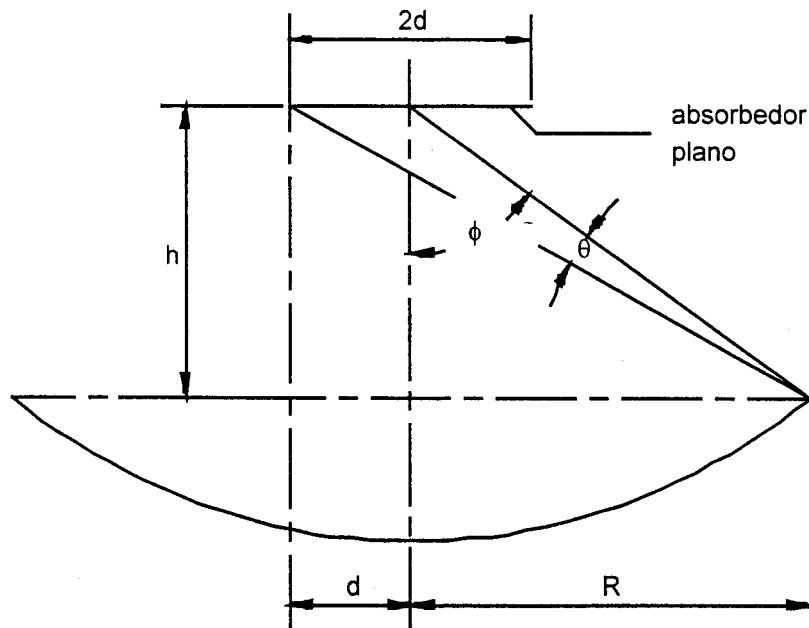


Figura 2-9. Construcción utilizada para derivar el límite de concentración para un recolector parabólico de conducto con un absorbedor horizontal plano.

Un sistema de estas características, formado por un único absorbedor, usualmente situado en lo alto de una torre, rodeado por un campo de espejos (denominados heliostatos) se denomina sistema de torre o de receptor central.

Realizar un análisis completo de un sistema de torre es complicado. El área de apertura efectiva de un campo de heliostatos varía continuamente en función del tiempo. Para determinarla se deben tener en cuenta tres factores: las sombras, los bloqueos y el efecto coseno. Un punto de la superficie reflectiva de un heliostato está en sombra si desde él no puede verse directamente el disco solar y está bloqueado si desde él no puede verse directamente el receptor. La causa común de sombras y bloqueos es la existencia de algún objeto (normalmente un heliostato) situado en la línea de visión. Ambos efectos disminuyen la superficie efectiva de un heliostato. El cálculo de esa

disminución es relativamente complejo debido a que frecuentemente las áreas en sombra y bloqueo se solapan.

El efecto coseno tiene en cuenta el hecho de que la superficie reflectiva de un heliostato, en la mayoría de las ocasiones, no está orientada en la dirección perpendicular a la radiación solar, por lo que la superficie vista por el Sol es inferior al área reflectiva del heliostato. El factor de proporcionalidad existente entre estas áreas es el coseno del ángulo entre la normal a la superficie del heliostato y la dirección principal de propagación de la radiación solar (de ahí el nombre de efecto coseno).

Si todos estos efectos se caracterizan mediante un factor geométrico  $G(t)$ , los límites de concentración que se obtienen para un sistema de torre son iguales a los obtenidos para un concentrador parabólico multiplicados por el factor  $G$ .

#### ***2.4.2 Concentradores reflectivos no reproductores de imágenes.***

Sea un concentrador cilíndrico<sup>33</sup> consistente en dos reflectores de sección recta parabólica colocados simétricamente. El eje de la parábola derecha forma un ángulo  $\theta$  con respecto al plano de simetría del concentrador y su foco está en el extremo izquierdo de la sección recta de éste. La pendiente de la parábola en el extremo correspondiente a la apertura de entrada es paralela al plano de simetría del concentrador.

En un concentrador de este tipo (denominado Concentrador Parabólico Compuesto) todos los rayos que inciden sobre la apertura con un ángulo menor o igual que  $\theta$  alcanzan el absorbedor, mientras que todos los que lo hagan con un ángulo superior emergen eventualmente a través de esa misma apertura. Su razón de concentración alcanza, por lo tanto, el límite de concentración en dos dimensiones definido por la Ecuación (47), por lo que el CPC es un ejemplo de concentrador ideal.

También es un ejemplo de concentrador no formador de imágenes. En efecto, rayos que provengan del mismo punto de la fuente de radiación, pero que incidan en la superficie de apertura del concentrador en distintos puntos y con distintos ángulos no serán dirigidos al mismo punto de la superficie de salida, no formándose sobre ésta una imagen de la fuente. El hecho de no formar imagen no puede considerarse como un defecto sino más bien lo contrario. La meta de un concentrador solar no es formar una imagen perfecta del Sol, sino redirigir hacia un absorbedor lo más pequeño posible toda la radiación que incide sobre su área de apertura. Esta diferencia de objetivos marca una diferencia fundamental entre la óptica tradicional y la óptica de sistemas concentradores.

En el diseño tradicional de un sistema formador de imagen lo más importante es definir el comportamiento óptico de los denominados rayos centrales, aquellos que inciden sobre el sistema en un abanico de direcciones muy estrecho en torno a la dirección del eje óptico del sistema. Por el contrario, en el diseño de concentradores ideales el papel principal es asumido por los rayos extremos, aquellos que inciden sobre el sistema formando con su eje óptico el ángulo límite de aceptación,  $\theta$ . Así, imponiendo la condición de que todo rayos extremos que incidan sobre el área de

apertura del concentrador sea redirigidos hacia el borde o límite de su área de salida se llegan a diseñar concentradores con razones de concentración iguales o próximas al límite de concentración. Este principio director utilizado en el diseño de concentradores ideales no formadores de imagen es conocido con el nombre de Principio de los Rayos Extremos.

La forma de un concentrador ideal depende de la forma de la forma y posición del absorbedor y de la distribución angular de la radiación incidente para la que esté diseñado. Cuando la fuente de radiación está a una distancia muy superior a la longitud característica de la apertura de entrada, el Principio de los Rayos Extremos lleva al concepto de CPC. Sin embargo, cuando la distancia a la fuente es del mismo orden de magnitud dicho principio conduce a los conceptos de concentrador elíptico compuesto (CEC) y de concentrador “tipo trompeta”.

#### 2.4.2.1 Concentrador Parabólico Compuesto

Aunque el concepto de CPC ya ha sido introducido, a continuación se aborda su definición conceptual desde una perspectiva distinta, en la que el concepto se presenta como la solución al siguiente problema de diseño planteado en términos de la definición de las trayectorias de los rayos extremos:

*“Considérese la sección recta de un concentrador cilíndrico cuyo plano de simetría es perpendicular tanto a la apertura de entrada como a la de salida. Si sobre cada punto de la apertura de entrada la radiación incidente está distribuida de forma*

*continúa sobre un cono de direcciones de semiángulo  $\theta_m$  con respecto a la normal, ¿qué forma ha de tener el lado derecho (izquierdo) de la sección recta para reflejar los rayos extremos contenidos en el plano de la sección hacia el extremo izquierdo (derecho) de la apertura de salida?."*

Por el principio de conservación del volumen en el espacio de las fases, si ningún rayo que incida sobre la apertura de entrada del concentrador con un ángulo mayor que  $\theta_m$  alcanza la apertura de salida, entonces cualquier rayo que incida con un ángulo menor que  $\theta_m$  la hará..

Imponiendo la condición de que cualquier rayo extremo que se refleje sobre la parte derecha (izquierda) de la superficie reflectante lo haga hacia el extremo izquierdo (derecho) de la apertura de salida, se obtiene la ecuación de una parábola con foco en dicho extremo.

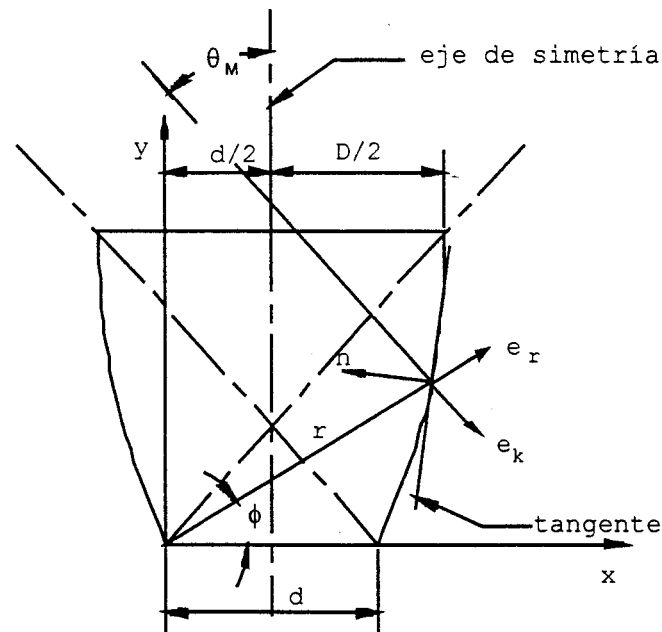


Figura 2-10. Construcción que ilustra el principio de diseño para el Concentrador Parabólico Compuesto (CPC).

Según la Figura 9, la condición que se debe satisfacer para que un rayo extremo se refleje sobre el extremo correspondiente de la apertura de salida es:

$$e_k \cdot dr = -\frac{r}{|r|} \cdot dr \quad (2 - 62)$$

donde  $e_k$  es el vector unitario en la dirección del rayo extremo y  $r$  es el vector de posición de un punto de la superficie reflectiva en un sistema de coordenadas con centro en el extremo correspondiente de la apertura de salida. Esta condición lleva a la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dr}{r} = \frac{\cos(\theta_M - \phi)}{1 + \sin(\theta_M - \phi)} d\phi \quad (2 - 63)$$

donde  $(r, \phi)$  son las coordenadas polares del vector  $r$ . Integrando la parte derecha de la Ecuación 2 - 63 entre 0 y  $\phi$  y consecuentemente la parte izquierda entre  $d$  y  $r$ , se obtiene:

$$r = \frac{(1 + \sin\theta_m) d}{1 + \sin(\theta_m - \phi)} \quad (2 - 64)$$

donde  $d$  es la longitud de  $r$  para  $\phi = 0$ , es decir, la dimensión característica (en el plano de la sección recta) de la apertura de salida del concentrador. La ecuación obtenida es la de una parábola con el foco en el origen del sistema de coordenadas considerado y eje de simetría inclinado un ángulo  $\theta_m$  en sentido contrario a las agujas del reloj.

Al particularizar la Ecuación 2 - 64 para la línea de sombra, es decir, para  $\phi = \pi/2 - \theta_M$ , se obtiene:

$$r_2 = \frac{d(1 + \sin\theta_M)}{2\sin^2\theta_M} \quad (2 - 65)$$

donde  $r_2$  es la longitud del vector de posición  $r$  del extremo derecho de la sección recta de la apertura de entrada al concentrador (punto en el que la pendiente de la superficie parabólica es paralela al eje óptico).



De la Figura 9 se deduce que:

$$r_2 = \frac{D + d}{2 \sin \theta_M} \quad (2 - 66)$$

donde  $D$  es la longitud de la sección recta de la apertura de entrada.

Como el lado derecho de la Ecuación 2 - 65 debe ser igual al lado derecho de la Ecuación 2 - 66,

$$\frac{D}{d} = \frac{1}{\sin \theta_M} \quad (2 - 67)$$

que es el límite de concentración en dos dimensiones.

Puesto que se supone que la distribución angular de la radiación incidente en cada punto de la apertura de entrada del concentrador es simétrica con respecto a la dirección del eje óptico, es evidente que la parte izquierda de la sección recta del concentrador ha de ser una imagen especular de su parte derecha, completándose así la descripción del CPC.

Con el fin de reducir superficie reflectiva y obtener un concentrador de menores dimensiones, en muchos casos, se opta por truncar el desarrollo de las parábolas que definen las secciones rectas del CPC. El precio que se paga por este ahorro en superficie reflectiva es una disminución de la razón de concentración. El concentrador truncado, así obtenido, tiene una razón de concentración inferior a la ideal.

Como se ha puesto en evidencia, la forma de un CPC está definida por su ángulo de aceptación y por la elección que se haga del tipo de apertura de salida o absorbedor. En el caso considerado, la apertura de salida ha sido una superficie de plana y perpendicular al plano de simetría del concentrador. Sin embargo, en otros casos otros tipos de superficies pueden ser más apropiados dando lugar a otras geometrías concentradoras. Así, Winston y Hinterberger<sup>34</sup> han derivado geometrías concentradoras del tipo CPC especialmente optimizadas para varios tipos de absorbedores.

Cuando la radiación que incide sobre un CPC de ángulo de aceptación  $\theta_1$  está distribuida uniformemente sobre todos los ángulos  $\theta < \theta_1$ , la radiación a la salida del concentrador y, por tanto, la que llega al absorbedor es totalmente difusa. La mayoría de los materiales, sin embargo, tiene poca absorción a ángulos de incidencia próximos a la horizontal. En muchos casos es conveniente diseñar un concentrador de forma que la distribución angular de la radiación a su salida esté restringida. Si se restringe la distribución angular de la radiación a la salida del concentrador de forma que ésta esté distribuida de forma continua sólo en un cono de direcciones de semiángulo  $\theta_2$  con respecto a la normal a la apertura de salida entonces, según Rabl y Winston<sup>35</sup>, si  $n$  es el índice refracción del medio en el que está inmerso el absorbedor, el límite de concentración viene dado por:

$$C_{f,max-2D} = \frac{n \sin \theta_2}{\sin \theta_1} \quad (2 - 68)$$

$$C_{f,max-3D} = \frac{n^2 \sin^2 \theta_2}{\sin^2 \theta_1} \quad (2 - 69)$$

#### 2.4.2.2 Concentradores elípticos compuestos

El hecho de que los concentradores convencionales (formadores de imagen) no alcancen los límites de concentración ideales implica que la radiación en el foco de un concentrador convencional ha de presentar siempre una divergencia angular inferior a  $\pi/2$ . La existencia de una cierta direccionalidad en dicha radiación hace posible aumentar su concentración. Por ejemplo, si la radiación en el foco de un concentrador parabólico está distribuida de forma continua sobre un cono de direcciones de semiángulo  $\theta_m$  es posible aumentar la concentración de dicha radiación acoplando en serie con el concentrador parabólico un CPC de ángulo de aceptación  $\theta_m$ , situado de forma que su área de apertura coincida con el foco del concentrador parabólico.

Sin embargo, este diseño no es el mejor posible. Se pueden conseguir mayores concentraciones aprovechando el hecho de que la fuente de radiación de la segunda etapa concentradora está a una distancia finita con respecto a la entrada del concentrador secundario. Rabl y Winston<sup>35</sup> han presentado un método para geometrías bidimensionales que permite obtener diseños que alcanzan el límite de concentración en dos dimensiones en aquellos casos en los que los absorbedores considerados no sean cóncavos.

Sea una fuente de radiación situada en  $AA'$  y cuyos rayos van dirigidos a un foco  $F$  (ver Figura 2-11).

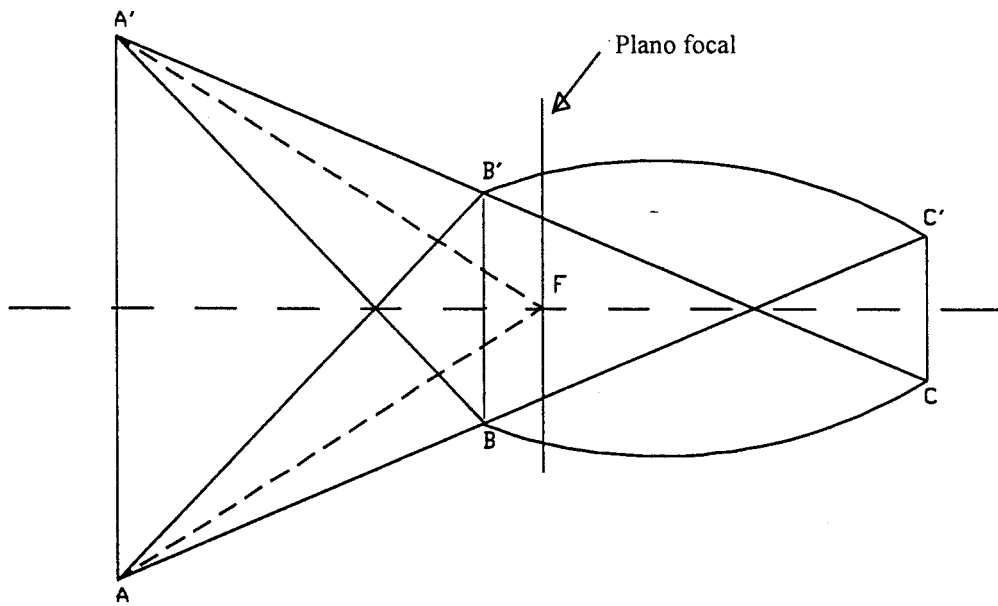


Figura 2-11. Construcción usada para derivar el límite de concentración del Concentrador Elíptico Compuesto.

Si los rayos extremos siguen las líneas  $A'C'$  y  $AC'$ . La apertura más pequeña que intercepta todos los rayos está en la línea  $BB'$ . Todos los rayos emitidos desde el borde superior de la fuente (punto  $A'$ ) alcanzarán  $C'$  si son reflejados por una superficie elíptica con focos en  $A'$  y  $C'$ . De las propiedades de la elipse,

$$(A'B) + (BC') = (A'C) + (CC') \quad (2 - 70)$$

Sin embargo,

$$(A'C) = (A'B') + (BC') \quad (2 - 71)$$

Por lo tanto,

$$(A'B) - (A'B') = (CC') \quad (2 - 72)$$

y la razón de concentración es:

$$C = \frac{BB'}{(A'B) - (A'B')} \quad (2 - 73)$$

Si se usa la regla de Hottel<sup>36</sup> para determinar el factor de forma,  $F_{a-f}$ , desde la apertura de entrada del concentrador a la fuente de radiación se observa que la expresión obtenida para la razón de concentración es la inversa de dicho factor. Por consiguiente,  $C$  es el valor máximo al que se puede concentrar la radiación proveniente de dicha fuente.

Si se impone la condición adicional de que la radiación a la salida del concentrador esté distribuida en un cono de direcciones de semiángulo ángulo  $\theta_2$  con respecto a su eje óptico, los límites de concentración en dos y tres dimensiones vendrán dado respectivamente por las siguientes expresiones:

$$C_{f,max-2D} = \frac{n \sin \theta_2}{F_{a-f}} \quad (2 - 74)$$

$$C_{f,max-3D} = \frac{(n \sin \theta_2)^2}{F_{a-f}} \quad (2 - 75)$$

donde  $n$  es el índice de refracción del medio en el que está inmerso el concentrador.

Observese que el concentrador elíptico compuesto, CEC, puede usarse como un concentrador secundario para reconcentrar la radiación reflejada desde un concentrador parabólico<sup>37</sup>.

#### 2.4.2.3 Concentradores con forma de trompeta

Otro tipo de concentrador que se puede usar cuando el tamaño de la apertura es significativo en comparación con la distancia a la fuente es el concentrador hiperbólico o concentrador tipo trompeta propuesto por Winston y Welford<sup>38</sup>.

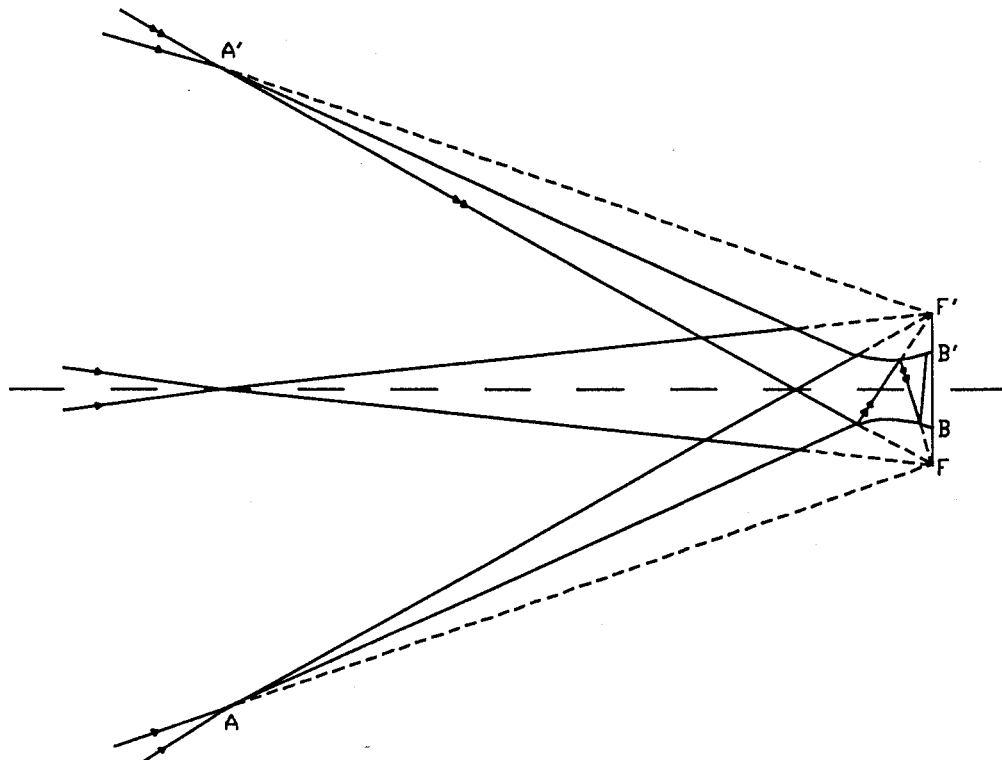


Figura 2-12. Concentrador con forma de trompeta.

Los secciones rectas de los reflectores  $AB$  y  $A'B'$  en la Figura 2-12 son hipérbolas con focos en  $F$  y  $F'$  respectivamente. Los proponentes de este concentrador indican que, en principio, es menos sensible a los errores de alineación que un CEC. Otra ventaja es que facilita el aumento del factor interceptación. Como sólo una pequeña fracción de la radiación procedente del concentrador primario se refleja en el concentrador de tipo trompeta antes de alcanzar el absorbedor, una configuración en la que el secundario sea un concentrador de este tipo ha de tener menores pérdidas por reflexión que una basada en reconcentradores de tipo CPC o CEC. Sin embargo, para factores de concentración mayores de tres, el comportamiento de un reconcentrador de tipo CPC es mejor que el de uno de tipo trompeta<sup>38</sup>.

### 3. MODELOS DE CÁLCULO.

De la discusión del capítulo precedente queda claro que la mayor parte de las aplicaciones solares térmicas a alta temperatura usan sistemas concentradores reflectivos. Una revisión de la literatura pone de manifiesto la gran diversidad de concentradores de este tipo que han sido propuestos en uno u otro momento. Incluso cuando se centra la atención en una clase concreta de concentrador reflectivo, se observa la existencia de una amplia gama de parámetros de diseño y configuraciones posibles. Para explorar esta gran variedad de alternativas con el objeto de decidir que clase de concentrador y que configuración específica se adapta mejor a unas necesidades concretas se necesita recurrir a modelos computacionales, ya que el coste de la exploración experimental es usualmente prohibitivo. Incluso si los análisis experimentales son factibles, es sin duda interesante disponer de modelos de estimulación que permitan analizar, interpretar y extrapolar los resultados de los experimentos y sirvan de ayuda a la hora de plantearlos.

Hay varias etapas en el diseño de un sistema solar térmico. Cada etapa suele requerir respuestas a nuevas preguntas, a la vez que una ampliación en el nivel de detalle de respuestas a preguntas formuladas en etapas previas. En el diseño de la mayor parte de las aplicaciones y en especial en el de las aplicaciones a alta temperatura hay una etapa que requiere un buen entendimiento del comportamiento óptico-energético del sistema concentrador.



Entre otras cosas, este entendimiento se necesita para:

1. Asistir en el diseño térmico y mecánico del sistema de concentración. Por ejemplo, al diseñar un reconcentrador para un Sistema Receptor Central es importante conocer las distribuciones de flujo incidente, tanto en los espejos del reconcentrador, como en el receptor. Las distribuciones de flujo sobre los espejos del reconcentrador se utilizan para determinar el sistema de refrigeración que los espejos deben tener y dimensionarlo adecuadamente. Análogamente, la distribución de flujo sobre el receptor es esencial para su diseño y dimensionamiento.
2. Definir las estrategias de funcionamiento. Los sistemas solares térmicos de alta temperatura no pueden funcionar continuamente en régimen estacionario debido a la naturaleza de su suministro energético - la radiación solar directa. El sistema de captación de energía solar debe empezar a funcionar cada mañana tan pronto como la irradiancia directa alcance un valor umbral establecido (el cual depende del sistema) y debe dejar de hacerlo cada tarde en cuanto la irradiancia directa sea inferior a dicho umbral. Durante las operaciones de puesta en marcha y parada, el flujo solar incidente sobre el receptor o absorbedor sufre drásticas variaciones en cortos intervalos de tiempo, yendo desde cero hasta el valor nominal a plena carga durante los arranques y desde el valor nominal hasta cero durante las paradas. Con objeto de minimizar la fatiga térmica producida por esas variaciones, se deben definir estrategias de funcionamiento que controlen la forma en que el flujo incidente sobre el receptor o absorbedor aumenta y disminuye. La definición de esas estrategias requiere una información detallada de las distintas distribuciones del flujo a la

entrada del receptor que pueden conseguirse si se cambian o modifican algunos parámetros de la configuración del sistema.

3. Diseñar experimentos especiales. Los experimentos con nuevos materiales y su fabricación son aplicaciones de los sistemas solares térmicos a alta temperatura que cada día cobran más relevancia. Ambas aplicaciones necesitan un control exacto de la distribución espacial y temporal del flujo solar que se concentra sobre las piezas que se están experimentando o fabricando. De nuevo, esto requiere una información detallada acerca de las diferentes distribuciones de flujo que pueden conseguirse en la superficie de la pieza al cambiar la configuración del sistema.
4. Llevar a cabo análisis de seguridad. En el diseño de un sistema solar térmico de alta temperatura, se debe analizar la respuesta del sistema no sólo en condiciones normales de funcionamiento, sino también en condiciones de funcionamiento anómalo. Entre las posibles condiciones anómalas bajo las que puede funcionar un sistema solar térmico de alta temperatura, los fallos de seguimiento son especialmente importantes porque pueden producir graves daños. Generalmente, los concentradores reflectivos de sistemas solares térmicos de alta temperatura poseen mecanismos de seguimiento, mediante los cuales siguen continuamente al Sol de forma que en todo momento mantienen su “imagen”<sup>a</sup> reflejada sobre la apertura del receptor o absorbedor. Cuando los mecanismos de seguimiento fallan y el

---

<sup>a</sup> Como se ha dicho anteriormente, el propósito del diseño de un sistema concentrador de luz reflejada para recoger energía no es el de producir una imagen del sol de alta calidad, sino el de concentrar la luz solar directa. De hecho, como se ha mostrado, los sistemas concentradores con los más altos cocientes de concentración posibles no forman una imagen del Sol. Así, para la presente discusión, se debería interpretar el término “imagen” en un sentido muy libre, es decir, como el área reducida sobre la que es redirigida la mayor parte de la incidencia de la luz solar directa sobre la apertura del concentrador.

concentrador deja de seguir el Sol, la imagen que éste proyecta sobre el receptor comienza a despalzarse con el tiempo, pudiendo causar la aparición de “puntos calientes” sobre el receptor (es decir, puntos de flujo solar incidente muy alto), o lo que es peor, sobre estructuras próximas al receptor que no estén ni diseñadas para soportar tales flujos. Para evaluar las consecuencias de un fallo de seguimiento es necesario estimar la evolución temporal de la localización y magnitud de estos puntos de calientes. Para realizar esta evaluación se necesita conocer detalladamente las distribuciones del flujo solar incidente en los espejos del concentrador y en el receptor en los instantes posteriores al fallo.

### **3.1 Necesidad de un programa general para el análisis energético de sistemas concentradores.**

La literatura de los concentradores solares reflectivos es muy extensa. En ella, se pueden encontrar trabajos que tratan sobre el comportamiento energético de casi cualquier sistema que haya sido alguna vez propuesto.

Sin embargo, en la mayoría de los casos, los investigadores parecen haber creado códigos “ad hoc” para analizar el comportamiento energético de los sistemas específicos sobre los que versan sus trabajos. Frecuentemente, esos códigos ni son útiles para analizar otras configuraciones y geometrías concentradoras, ni están disponibles para uso público. De hecho, en la actualidad el número de códigos de ordenador que realmente están disponibles de una forma práctica para el análisis energético de

concentradores solare reflectivos se reduce a ocho. Estos son, en orden alfabético: DBS<sup>5</sup>, DELSOL<sup>6</sup>, HELIOS<sup>7,8</sup>, HFLCAL<sup>9</sup>, NS código de comportamiento  $\lambda$  de pila?<sup>10</sup>, RC código de optimización  $\lambda$  de pila?<sup>11,12</sup>, SIMSOL<sup>3,4</sup>.

**Tabla I. Códigos de ordenador disponibles para el análisis energético de concentradores reflectivos**

Programa	Simula el sistema	Métodos	Disponibilidad	Lenguaje	Año
DBS	Disco parabólico	Óptica de haces	Pública	Fortran	1980
DELSOL2	Campo heliostatos	Óptica de haces	Pública	Fortran	1981
HELIOS	Campo heliostatos	Óptica de haces	Pública	Fortran	1978
HFLCAL	Campo heliostatos	Óptica de haces	Venta pública	Fortran	1986
MIRVAL	Campo heliostatos	Monte Carlo	Pública	Fortran	1979
RC	Campo heliostatos	Monte Carlo	Venta pública	Fortran	1980
SIMSOL	Cilindro - parabólico	Óptica de haces	Venta pública	Basic	1980

**Tabla II. Desventajas de los códigos de ordenador disponibles para el análisis energético de concentradores reflectivos**

Programa	Difícil modificación	No puede modelar reflexiones múltiples	No puede modelar más que un solo tipo de sistema
DBS	X	X	X
DELSOL2	X	X	X
HELIOS	X	X	X
HFLCAL		X	X
MIRVAL			X
NS	X	X	X
RC	X		X
SIMSOL	X	X	X

Tal y como se resume en la Tabla I y Tabla II; todos estos códigos tienen en común una o más de las siguientes características:

1. Están basados en la óptica de haces, una óptica que sólo válida para simular sistemas concentradores de una única reflexión,
2. Están diseñados para modelar sólo una clase de concentradores reflectivos (bien, un campo de helióstatos, o un concentrador cilindro-parabólico, o un disco parabólico),
3. Fueron creados hace más de diez años.

La primera característica implica que la mayoría de estos códigos no pueden analizar concentradores multirreflexivos, ni pueden ser adaptados para ello. La segunda que si se quiere analizar un sistema concentrador distinto de un campo de heliostatos, un concentrador cilindro - parabólico, o un disco parabólico, es necesario elegir alguno de los códigos y modificarlo a tal fin. La tercera que al adaptar los códigos a las necesidades específicas de un proyecto surgirán problemas.

Todos los códigos mencionados, con la posible excepción de HFCAL (!escrito y documentado en Alemán¡), han sido escritos en la era de los “mainframes” y del FORTRAN. Son códigos de ordenador escritos en la época de las tarjetas perforadas, cuando las unidades de cinta se utilizaban como archivos de entrada y salida y la programación estructurada aún no se había inventado. Todo ello hace que no sean fáciles de utilizar, ni de modificar. Considérense, por ejemplo, las estadísticas del programa HELIOS que se muestra en la Tabla III.

Tabla III. Estadísticas básicas del programa HELIOS

<b>Número total de sentencias</b>	<b>9794</b>
Sentencias GOTO	683
Sentencias CALL	285
Sentencias COMMON	435
<b>Número total de Subrutinas</b>	<b>112</b>
Subrutinas que contienen sentencias GOTO	63
Subrutinas que contienen sentencias CALL	49
Subrutinas que contienen sentencias COMMON	65

Esta tabla muestra que aunque el código está dividido en subrutinas (112), éstas están muy interconectadas entre sí por un gran número de sentencias COMMON (435) y sentencias CALL. El exceso de interconexiones entre las rutinas, propiciado por el abuso de variables globales, hace muy difícil prever los efectos colaterales de cualquier modificación del código por pequeña que ésta sea.

La proliferación de sentencias GOTO (683) es otra indicación de que la modificación del HELIOS puede plantear importantes dificultades. Debido a ella, el flujo del programa es difícil de determinar. Está repleto de saltos incondicionales hacia delante y hacia atrás (es un ejemplo de lo que se llama “programación espagueti”).

En definitiva, ninguno de los códigos de ordenador en la actualidad al alcance de la comunidad investigadora proporciona una solución global al análisis del comportamiento energético de concentradores solares reflectivos. Esta carencia es

especialmente patente cuando se desea abordar el análisis energético de conceptos nuevos o avanzados, como concentradores no formadores de imagen<sup>26</sup> o sistemas de concentración de múltiples etapas<sup>38,29</sup>.

### **3.2 Las bases para el nuevo programa.**

Uno de los objetivos de esta tesis ha sido el desarrollo de un programa de ordenador que superase los defectos y limitaciones de los actuales. Un programa de ordenador que:

1. Proporcione un paradigma computacional flexible que permita abordar de forma unificada (es decir, utilizando el mismo conjunto de herramientas) el análisis del comportamiento energético de cualquier concentrador o conjunto de concentradores reflectivos que uno pueda concebir.
2. Sea fácil de usar,
3. Pueda ser adaptado, expandido y/o mantenido fácilmente.

#### **3.2.1 El nuevo paradigma computacional.**

El enfoque utilizado para alcanzar este objetivo ha consistido en desarrollar una formulación general y abstracta del problema de análisis energético y de su solución, y traducir esta formulación a una estrategia o paradigma computacional flexible que permita al usuario:

1. Simular y analizar una gran variedad de geometrías concentradoras y situaciones,
2. Acelerar o simplificar los cálculos incorporando conocimientos específicos al procedimiento computacional.

La siguiente analogía puede ser útil para aclarar esta idea: considérese el problema de desarrollar un programa de computador para evaluar las integrales mostradas en las ecuaciones (75) y (76):

$$\int_0^{\pi} \text{sen } x \, dx \quad (3 - 1)$$

$$\int_0^{\pi} \frac{e^x}{x} \, dx \quad (3 - 2)$$

La primera de las integrales se puede evaluar eficazmente y con precisión, si se tiene en cuenta el hecho de que tiene solución analítica. La segunda, sin embargo, al no tener solución analítica, no admite este enfoque. Para resolverla hay que recurrir a métodos numéricos menos eficaces y precisos. Por lo tanto, una posibilidad sería crear dos programas distintos, uno para cada una de las integrales.

Este enfoque permitiría aprovechar al máximo las características específicas de cada integral. Sin embargo, tiene un inconveniente importante: su falta de generalidad. Para evaluar cada nueva integral que se presente es necesario desarrollar un nuevo programa.



El enfoque opuesto sería escribir un programa general que permita la evaluación de cualquier integral del tipo:

$$\int_a^b f(x) dx \quad (3 - 3)$$

y usar el programa para evaluar las dos integrales en consideración. Puesto que se puede diseñar el programa de forma que el procedimiento para calcular la integral esté separado del procedimiento para evaluar  $f(x)$ , las dos integrales consideradas se calcularían por el mismo método. El inconveniente de este segundo enfoque es la imposibilidad de simplificar los cálculos mediante la incorporación de conocimiento específico. Aunque sepamos la solución analítica de la primera de las integrales el marco computacional definido no permite tomar ventaja de este conocimiento.

Ahora bien, es posible plantear un enfoque intermedio entre los dos expuestos hasta el momento. Este tercer enfoque consiste en desarrollar un programa genérico que calcule no la integral de una función, sino el producto de un número real por la integral de una función. De esta forma, la evaluación de la integral sinusoidal puede acelerarse, ya que al ser la función seno simétrica con respecto a  $\pi/2$ , se puede usar el programa para calcular el producto:

$$2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \text{sen } x \, dx \quad (3 - 4)$$

Como este cálculo requiere la evaluación de la integral del seno sólo en la mitad de su intervalo original, este último enfoque reduce a la mitad el tiempo necesario para la evaluación de la integral original. De este modo, al aumentar la flexibilidad del programa (y sus grados de libertad), este enfoque permite incorporar y tomar ventaja de los conocimientos específicos sobre las integrales a evaluar y simultáneamente ofrecer una cierta generalidad.

Siguiendo la analogía del ejemplo que se acaba de presentar, el enfoque adoptado en el desarrollo de un programa para el análisis energético de concentradores reflectivos se basa en la definición de un paradigma computacional de carácter universal (válido cualquier configuración) que proporciona:

1. Un modelo del concentrador,
2. Un modelo del flujo de radiación solar incidente sobre dicho sistema,
3. Un modelo de las interacciones básicas entre la radiación solar y el sistema concentrador, y
4. Una forma flexible de especificar los resultados que debe generar el programa.

### ***3.2.2 El modelo del concentrador***

El modelo de concentrador está formado por:

1. Una apertura de entrada,
2. Un volumen contenedor y

### 3. Una lista de superficies.

La apertura de entrada, ha de situarse en una de las superficies del volumen contenedor. Se define de forma que sólo la radiación que pasa a través de ella es relevante para los balances de energía del concentrador bajo estudio. Su geometría se selecciona para facilitar los cálculos, cambiándose su forma y orientación de un instante a otro en función de cómo varíe con el tiempo el flujo de radiación solar incidente.

El volumen contenedor es un volumen de geometría simple (normalmente un cubo) que delimita la región del espacio en la que está situado el concentrador. Se supone que una vez que un rayo sale del volumen contenedor, no produce ningún efecto sobre el concentrador. Entre otras cosas, el volumen contenedor proporciona un criterio para concluir los cálculos referentes a cada uno de los rayos en los que se considera dividido el flujo solar incidente.

La lista de superficies está compuesta por superficies reflectantes y superficies de control. Las primeras configuran el sistema concentrador que se desea analizar, mientras que las segundas, representan superficies reales o virtuales sobre las que sea de interés estudiar la distribución de flujo solar.

Durante la implementación del modelo del concentrador, se ha creado una forma abstracta y general de representar todos estos elementos, junto con las herramientas y los medios para definir y modificar fácilmente estas representaciones.

### 3.2.3 El modelo del flujo de radiación solar incidente

La radiación que incide sobre el concentrador se define especificando en cada punto de la apertura de entrada la radiancia<sup>a</sup> de la radiación que la atraviesa en dirección al sistema concentrador.

Puesto que la radiancia  $L(\vec{r}, \vec{\Omega})$  en un punto,  $\vec{r}$ , de la apertura de entrada del concentrador y en la dirección de propagación  $\vec{\Omega}$  es, por definición, la energía radiante que sale de dicho punto por unidad de tiempo, por unidad de área perpendicular  $\vec{\Omega}$  y por unidad de ángulo sólido alrededor  $\vec{\Omega}$ <sup>22</sup>, la radiación incidente sobre el concentrador vendrá dada por la función:

$$L(\vec{r}, \vec{\Omega}) \quad (3 - 5)$$

donde  $\vec{r}$  es el vector de posición de un punto en la apertura de entrada, y  $\vec{\Omega}$  el vector unitario que define una dirección propagación hacia el interior del sistema concentrador.

Como todos los puntos de la apertura de entrada están situados sobre una superficie (generalmente un plano), sólo dos de las tres coordenadas del vector de

---

<sup>a</sup> La propiedad que hace que la radiación sea una elección apropiada/adecuada para describir el campo de radiación es que la radiación se conserva/se mantiene a lo largo del camino de un rayo de luz si el medio óptico no interactúa en ella (es decir, si no absorbe y/o esparce la radiación). Así, mientras el medio que rellena el espacio entre las superficies reflectantes no interactúa con la radiación, la radiación de un rayo de luz se conservará entre reflexiones.

posición  $\vec{r}$  son independientes. Lo mismo ocurre con el vector de dirección  $\vec{\Omega}$ , aunque, en este caso, la relación existente entre sus coordenadas expresa el hecho de que es un vector unitario.

La radiación incidente sobre el concentrador puede representarse por lo tanto mediante una función de cuatro variables:

$$L(u, v, \theta, \varphi) \quad (3 - 6)$$

donde  $L$  es la radiancia en un punto de la apertura de entrada definido por los parámetros  $u$  y  $v$  en la dirección de propagación hacia el sistema concentrador definida por los ángulos  $\theta$  y  $\varphi$ .

#### ***3.2.4 El modelo de las interacciones entre la radiación solar y el sistema concentrador***

Las interacciones entre la radiación solar y las superficies que define el sistema concentrador reflectivo son modeladas dentro del ámbito de aplicación de la óptica geométrica, es decir, sin tener en cuenta que la longitud de onda de la radiación solar no es nula, sino finita<sup>a</sup>.

---

<sup>a</sup> Esta simplificación se usa a menudo en transferencias de calor de radiación<sup>41</sup>. Se basa en el hecho de que casi toda la energía emitida/irradiada por el sol es emitida en forma de radiación electromagnética de pequeña longitud de onda (del orden de 10-5 cm) comparada con las dimensiones características de los sistemas en estudio.

El concepto fundamental de la óptica geométrica es el rayo. Éste se define como la curva que marca el camino por el que se propaga la energía asociada con la radiación electromagnética. La definición siguiente es de Born y Wolf<sup>40</sup>:

*“Los consideraremos (a los rayos de luz) como curvas orientadas cuya dirección coincide en todos los sitios con la dirección del vector de Poynting medio”.*

Los rayos obedecen a la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{d}{ds} \left( n \cdot \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \nabla n \quad (3 - 7)$$

donde  $\vec{r}$  es el vector de posición de un punto del rayo,  $s$  la longitud del rayo medida desde un punto fijo sobre él, y  $n$  es el índice refracción del medio en el que se propaga el rayo, que en principio se supone función de la posición, es decir,  $n = n(\vec{r})$ .<sup>a</sup>

Cuando el medio es ópticamente homogéneo ( $n = \text{constante}$ ) los rayos siguen trayectorias rectilíneas. En dichos casos, la solución de la Ecuación 3 - 7 es:

$$\vec{r} = s\vec{a} + \vec{b} \quad (3 - 8)$$

---

<sup>a</sup> Una derivación de esta ecuación puede encontrarse en el ya clásico libro Principles of Optics de Born y Wolf (Ref. 40, pp.122).

donde  $\vec{a}$  y  $\vec{b}$  son vectores constantes.

El comportamiento de un rayo al interactuar con una superficie especular está determinado por la Ley de la Reflexión de Descartes<sup>a</sup>, en virtud de la cual:

1. El rayo incidente, la normal a la superficie en el punto de incidencia, y el rayo reflejado están todos en el mismo plano,
2. El ángulo entre el rayo incidente y la normal a la superficie en el punto de incidencia es igual al ángulo entre dicha normal y el rayo reflejado.

De acuerdo con la notación de la Figura 12, el vector unitario en la dirección del rayo reflejado,  $\vec{r}$ , se puede expresar en función del vector unitario en la dirección del rayo incidente,  $\vec{i}$  y del vector unitario normal a la superficie en el punto de incidencia,  $\vec{n}$  mediante la siguiente expresión:

$$r = i + 2(n \cdot i)n \quad (3 - 9)$$

En la mayoría de las ocasiones el índice de refracción del medio óptico en el que está inmerso el sistema concentrador puede considerarse constante. En esos casos las ecuaciones 2 y 3 son suficientes para describir la propagación de los rayos en el

---

<sup>a</sup> La Ley de Reflexión puede ser derivada tanto desde la teoría de la luz electromagnética al, por ejemplo, aplicar las ecuaciones de Maxwell a una onda monocromática plana en el límite de dos medias en conjunción con condiciones apropiadas de limitación<sup>42</sup>, o desde la teoría clásica de la óptica geométrica aplicando el Principio de Fermat de menos tiempo<sup>43</sup>.

medio y la interacción con las superficies reflectivas que componen el sistema concentrador.

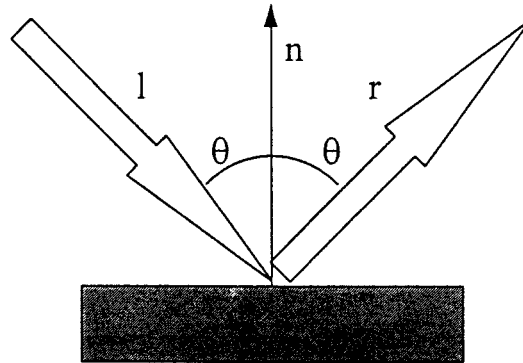


Figura 1. Geometría de reflexión.

De hecho, para analizar las propiedades de formación de imágenes de sistemas ópticos reflectivos de simetría central (sistemas en los que el eje de simetría de todas las superficies y el eje óptico coinciden) las ecuaciones 2 y 3 son las únicas necesarias.

Al diseñar un sistema concentrador reflectivo, sin embargo, el objetivo no es formar una imagen definida de la fuente de la radiación, sino concentrar de una manera eficaz la energía que proviene de dicha fuente. En este contexto, por lo tanto, el concepto de la formación de imagen es irrelevante; siendo los parámetros significativos la distribución del flujo sobre la apertura de salida y la razón de concentración.



El método computacional utilizado para evaluar estos parámetros se basa en las técnicas de seguimiento de rayos y en el método de Monte Carlo. Básicamente, el método consiste en:

1. Para el instante de tiempo  $t$  que se esté considerando, determinar la potencia total asociada con el flujo de radiación incidente en dicho instante sobre la superficie de apertura. Puesto que, como se ha indicado con anterioridad, la radiación incidente sobre la superficie de apertura se supone especificada, en un instante dado, mediante la función  $L(u, v, \theta, \varphi)$ , que define en cada punto de la apertura de entrada la radiancia de la radiación que la atraviesa en dirección al sistema concentrador, la potencia total asociada con dicha radiación,  $\Phi_{Sol}$ , puede determinarse mediante la expresión:

$$\Phi_{Sol} = \iiint L(u, v, \theta, \varphi) \sin \theta \cos \theta \, du \, dv \, d\theta \, d\varphi \quad (3 - 10)$$

2. Adoptar un modelo corpuscular de la radiación solar en el que la energía de la radiación incidente sobre el área de apertura del sistema concentrador en el intervalo de tiempo,  $[t, t + dt]$ , se considere discretizada en  $N_{Total}$  “paquetes de energía” o “grupos de fotones” todos de igual valor energético  $\Delta E$ . Obviamente,

$$\Delta E = \frac{\Phi_s \, dt}{N_{Total}} \quad (3 - 11)$$

3. Sustituir la descripción radiométrica de la radiación solar incidente por una descripción estadística, definida en base a una función de densidad,

$p(u, v, \theta, \varphi)$ , que exprese la probabilidad de que un grupo de fotones de energía  $\Delta E$  atraviese la apertura de entrada en dirección al sistema concentrador en un punto determinado y con una orientación específica. Esta función de densidad puede definirse como:

$$p(u, v, \theta, \varphi) = \frac{L(u, v, \theta, \varphi) \cos \theta \sin \theta}{\Phi_s} \quad (3 - 12)$$

4. Simular el flujo de radiación incidente mediante el lanzamiento "aleatorio" desde la apertura de entrada de un gran número de grupos de fotones en dirección al concentrador, de forma que la variable aleatoria que define el punto de la apertura de entrada desde el que se efectúa el lanzamiento y su orientación tenga la función de densidad definida anteriormente.
5. Utilizar técnicas de seguimiento de rayos para seguir el progreso de cada grupo de fotones en su viaje a través del sistema concentrador, hasta que salgan del volumen contenedor, o sean absorbidos en alguna superficie.
6. Hacer uso de técnicas estadísticas para modelar la reflectividad de las superficies que constituyen el sistema concentrador, de forma que cuando un grupo de fotones choque contra una superficie reflectiva la determinación de si el grupo es absorbido o reflejado se efectúe mediante la simulación de un experimento aleatorio cuya función de densidad sea concordante con la reflectividad de la superficie.



Mediante este método, la densidad de flujo radiante en una superficie cualquiera, real o virtual, puede estimarse con relativa facilidad a partir del análisis estadístico de los grupos de fotones que han incidido sobre ella.

Los aspectos claves estudiados durante la implementación de este método fueron:

1. Encontrar una manera eficaz de pasar de la descripción radiométrica de la distribución de radiación en la apertura de entrada (basada en la especificación de la radiancia) a la descripción probabilística (basada en la especificación de una función de densidad, que determine la probabilidad de que un grupo de fotones parta de la superficie de apertura en dirección al sistema concentrador desde un punto determinado y con una determinada dirección) y de generar eventos “pseudoaleatorios” que obedezcan dicha función de densidad y puedan por lo tanto servir para guiar la generación de rayos (grupos de fotones) en dirección al sistema concentrador.
2. Diseñar un esquema de seguimiento de rayos que sea rápido, preciso y lo suficientemente flexible y general para permitir un tratamiento formalmente uniforme de una gran variedad de superficies,
3. Formular un criterio estadístico que permita finalizar los cálculos en base a la consecución de la exactitud requerida.

El primer aspecto es esencial; si los fenómenos semialeatorios generados en el ordenador no obedecen a la distribución de probabilidad que representa el flujo de

radiación incidente sobre la superficie de apertura, los resultados que se obtengan no estarán relacionados con la verdadera solución al problema que se pretende analizar. Casi de forma universal, siempre que se pretende modelar sucesos o eventos aleatorios en un computador digital, se toma como punto de partida o componente básico a partir del cual construir el algoritmo de simulación a una función o subrutina denominada Generador de Números Aleatorios (GNA), que supuestamente genera números pseudoaleatorios distribuidos uniformemente en el intervalo  $[0,1]^a$ . Por lo tanto, para generar eventos que respondan a una distribución de probabilidad diferente, se deben usar técnicas de transformación de variables aleatorias. Para una sola dimensión, estas técnicas son bastante simples; sin embargo, no lo son tanto para distribuciones de probabilidad de cuatro dimensiones, como las que se necesitan para modelar la distribución de flujo incidente sobre la apertura de entrada del sistema concentrador<sup>45</sup>.

El segundo aspecto es también muy importante. La naturaleza estadística del método propuesto implica que se deben considerar muchos grupos de fotones para conseguir unos resultados significativos. Si no de los grupos de fotones no se hace eficientemente el programa puede resultar demasiado lento para ser de utilidad. Como en cualquier procedimiento basado en las técnicas de seguimiento de rayos, el paso que requiere un esfuerzo computacional más intensivo es el cálculo de las intersecciones rayo -superficie<sup>46</sup>, se ha realizado un gran esfuerzo para efectuar estos cálculos de la manera más rápida posible. El enfoque adoptado para ello ha sido el de aprovechar al

---

<sup>a</sup> De hecho, la mayoría de las librerías de funciones matemáticas estándar de los lenguajes de programación científica más usuales incluyen este tipo de funciones.

máximo la especificidad de cada uno de los diferentes tipos de superficies. La única manera de conseguir esto y al mismo tiempo conseguir que el programa sea capaz de tratar una gran cantidad de diferentes tipos de superficies, consiste en encapsular la información acerca de cómo un rayo intercepta un determinado tipo de superficie junto con la información que representa dicho tipo de superficie, es decir, tener tantos procedimientos de intersección de rayos con superficie como tipos de superficies. La forma más elegante de implementar un método de estas características es mediante un lenguaje de ordenador orientado a objeto. Esta es la razón por la cual todo el código se ha escrito en C++.

Por último, la importancia del tercer aspecto recae en la doble necesidad de mantener la carga computacional tan baja como sea posible y de proporcionar una estimación de la exactitud de los resultados. El enfoque con el que se puede abordar estas dos cuestiones está, también, marcado por la naturaleza estadística del método. Debido a ella, no es posible determinar con un nivel de confianza del 100% la exactitud y/o precisión de los resultados, ya que éstos estarán siempre sujetos a fluctuaciones estadísticas. Sin embargo, dicho nivel de confianza se puede aproximar tanto como se desee al 100 % aumentando el número de grupos de fotones analizados a expensas, evidentemente, de aumentar el tiempo de ejecución del programa. Durante el desarrollo del programa se han investigado diversas formas de definir estimadores estadísticos y de usar el teorema de límite central y otros teoremas similares para construir criterios que permitan estimar la precisión de los resultados con un nivel de confianza determinado y en base a ello establecer criterios de finalización de los cálculos.

### 3.2.5 Aspectos del diseño del software

Uno de los objetivos principales de diseño del software ha sido desarrollar un programa que pueda ser fácilmente modificado, adaptado y mantenido. Esto se ha conseguido imponiendo como principios directores del diseño: modularidad, localidad, y encapsulamiento.

Así, el programa se ha dividido en subrutinas y cada subrutina se ha implementado como un módulo independiente con una interfaz estándar. Se han tomado todas las precauciones posibles para asegurar la información y los datos usados en un módulo dato sea siempre local, es decir, sea únicamente relevante y conocida en dicho módulo. Así, se garantiza que mientras no se cambie la interfaz del módulo, cualquier tipo de modificación que se realice en su código no afectará al resto del programa, lo que significa que los módulos pueden ser sustituidos y/o modificados sin afectar otros módulos.

Como plataforma de desarrollo del software se ha utilizado Microsoft® Visual C++ 2.0. Dado que la implementación de los métodos computacionales descritos llevan de forma natural a la utilización de técnicas de programación orientadas a objeto, la selección de C++ como lenguaje de desarrollo está justificada por ser éste uno de los lenguajes que mejor permite la aplicación de técnicas de programación orientadas a objeto, a través del uso del concepto de “clases”. La aplicación de los métodos clásicos

de la denominada Programación Orientada a Objeto (POO) a la implementación de los métodos propuestos ha permitido:

1. Definir el procedimiento para llevar a cabo el análisis energético de concentradores reflectivos de una forma lo suficientemente abstracta y modular como para que sea posible perfeccionar y añadir funcionalidad al programa sin, prácticamente, tener que modificar el código ya existente,
2. Optimizar el algoritmo de cálculo de las intersecciones rayo - superficie, en base a sacar provecho de las peculiaridades de cada tipo de superficie,
3. Crear un código que cumple rigurosamente con los principios de diseño estipulados inicialmente de modularidad, localidad, y protección de la información.

En la sección siguiente de este capítulo se describen con detalle aspectos claves de la implementación del programa.

### **3.3 El programa.**

Las características más relevantes del programa de análisis energético de concentradores reflectivos desarrollado son su modularidad y su facilidad de mantenimiento. Ambas características se ha conseguido mediante un uso intensivo del concepto de clase definido en C++. A continuación, como una muestra de la modularidad y de la simplicidad formal conseguida se presenta el listado de la subrutina `main()`, el código fuente del programa en su totalidad puede encontrarse en el Anexo C.

```

1.  int main()
2.  {
3.      ReadInput (InputFile, Concentrator, InputAperture);
4.      InitGlobal();
5.      do
6.      {
7.          NPrimaryRays = 0;
8.          do
9.          {
10.             Ray = InputAperture.PrimRay();
11.             RayPower = InitialPower;
12.             do
13.             {
14.                 Inter = Intersect(Ray,Concentrator);
15.                 if (Inter.Valid)
16.                 {
17.                     Inter.pSurface->PwUpdate(RayPower,Inter);
18.                     if(RayPower>PowerThreshold)
19.                     {
20.                         SecondaryRay = TRUE
21.                         Ray = Inter.pSurface->SecondRay(Ray,Inter);
22.                         RayLevel+ +;
23.                     }
24.                 }
25.                 else (SecondaryRay = FALSE);
26.             } while((SecondaryRay == TRUE)&&(RayLevel<MaxLevel));
27.             } while(+ + NPrimaryRays<MaxPrimRays);
28.         } while(!Terminate(Concentrator));
29.         PrintResults(OutputFile,Concentrator);
30.         return 0;
31.     }

```

En la línea 1, se lee el archivo de entrada que define el modelo del concentrador a analizar, así como las propiedades del campo de radiación solar para el que este análisis se debe a cabo. En la línea 2, se inicializan algunas variables globales necesarias para controlar el flujo del programa y para llevar a cabo tareas de contabilidad. De la línea 5 a la 29 se ejecuta el bucle principal del programa. Cada vez que se ejecuta este bucle se lanzan desde la apertura de entrada del sistema concentrador una número MaxPrimRays de rayos hacia el sistema concentrador. Después de cada ejecución del bucle, se lleva a cabo un test para comprobar si es necesario seguir lanzando rayos. Si es así, se ejecuta de nuevo el bucle.



De la línea 8 a la 29 se lanza un rayo primario hacia el sistema concentrador y se le sigue en sus reflexiones con las superficies del sistema. El seguimiento finaliza cuando se la energía del rayo disminuye por debajo de un valor umbral (definido por la variable `PowerTreshold`), o cuando abandona el sistema (es decir, cuando no se encuentran ningunas intersección válida con las superficies que definen el sistema concentrador).

Aunque podría haberse optado por una solución más elegante, basada en la recurrencia, al implementar el procedimiento de seguimiento de rayos, esto no se ha hecho con objeto de evitar posibles problemas de asignación de memoria o de desbordamiento del stack que pudieran resultar al ejecutar el programa en un ordenador personal. El seguimiento del rayo se lleva a cabo generando explícitamente un rayo secundario cada vez que se obtiene una intersección válida entre el rayo y las superficies del concentrador.

Las líneas 14 al 17 definen el bucle que controla la generación de rayos secundarios. Cada vez que se obtiene una intersección válida entre el rayo y el concentrador y la energía remanente en el rayo después de la intersección es mayor que el umbral se genera un nuevo rayo secundario.

Cada superficie es responsable de determinar si un rayo la intercepta y, en su caso, de calcular el punto de intersección, actualizar la energía d rayo después de la

intersección y calcular la dirección del rayo reflejado. Básicamente una superficie es una Clase C++ que “sabe” cómo:

1. Leerse ella misma desde el archivo de entrada (función: ReadYourself).
2. Determinar si un rayo la intercepta.
3. Encontrar el punto de intersección en con un rayo,
4. Calcular el rayo secundario producido después de la intersección,
5. Poner al día su energía total acumulada, su distribución de energía, y la energía del rayo que la intercepta.

Cada tipo particular de superficie es una clase derivada de la clase virtual *Surface*. Esta clase virtual es una representación del concepto de genérico de superficie. Se utiliza en el programa para definir las características que, tanto en lo referente a datos, como a funcionalidad, deben de compartir todos los tipos específicos de superficies. Además, proporciona el mecanismo necesario para la estructura fundamental del programa de una manera abstracta e independiente de las peculiaridades de los distintos tipos de superficie.

El alto nivel de abstracción que se consigue con el uso de la clase virtual *Surface* es una de las ventajas principales del programa. Dado que una gran parte de la funcionalidad del programa reside en las especificaciones de los tipos (*Clases*) de superficies, ésta se puede aumentar o perfeccionar sólo con añadir módulos que definan nuevos tipos de superficies o que perfeccionen la descripción de tipos ya existentes. Esto puede lograrse sin tener que modificar a penas el código existente. Así, para añadir

al programa la capacidad de simular sistemas de concentración que contengan un tipo determinado de superficie (heliostato, concentrador cilindro - parabólico, etc.) basta con desarrollar un módulo que describa el comportamiento de dicho tipo o clase particular de superficie, modificar el módulo correspondiente a la subrutina `ReadInput`, compilar ambos y linkar de nuevo el programa para producir un nuevo ejecutable.

## 4. EVALUACIÓN DE UN CONCENTRADOR SECUNDARIO PARA UNA CENTRAL DE TORRE

Dentro del ámbito conceptual de esta tesis y como parte de los trabajos experimentales en el campo del análisis energético de sistemas concentradores reflectivos en los que ha participado su autor, en la Plataforma Solar de Almería se llevaron a cabo una serie de experimentos con el propósito de evaluar un prototipo a escala real de un concentrador secundario multirreflectivo para una central de torre.

La Plataforma Solar de Almería es una de las mayores instalaciones europeas dedicada a la investigación y experimentación en el campo de la energía solar en general y de los sistemas solares térmicos de media y alta temperatura en particular. Aunque de titularidad española, tiene un marcado carácter y orientación internacional. Prueba de ello es que su dirección, operación y mantenimiento es responsabilidad conjunta del Instituto Español de Energías Renovables (IER) y del Instituto Aeroespacial Alemán (DLR). Precisamente fueron estas dos instituciones las que hicieron posible la realización de los experimentos a los que aquí se hace referencia al aportar los fondos y recursos necesarios (humanos y materiales) para ello.

En concreto, los experimentos realizados tenían por objeto la caracterización energética de un prototipo a escala real de concentrador secundario tipo CPC de geometría hexagonal (HCPC). El diseño de este concentrador secundario estaba

especialmente adaptado al campo de heliostatos de la planta CRS-SSPS (Central Receiver System - Small Solar Power Systems), que es una de las dos plantas tipo torre que existen en la Plataforma Solar de Almería. Siendo su función redirigir la radiación solar proveniente del campo de heliostatos para concentrarla sobre la apertura, relativamente pequeña, de un receptor volumétrico.

Los experimentos de caracterización del reconcentrador formaron parte de una campaña de experimentos y pruebas cuyo objeto era investigar las posibilidades del tandem reconcentrador hexagonal - receptor volumétrico<sup>47</sup>, ya que este tandem es el módulo constructivo de un nuevo concepto de receptor para centrales de torre. La idea básica de este concepto consiste en colocar los referidos tandem, o módulos, a modo de panel (por este motivo el secundario es hexagonal) hasta formar un receptor compuesto capaz de recibir y transformar eficientemente la energía solar proveniente de un campo de heliostatos. Obviamente, el número y distribución de los módulos vendrá determinado en cada caso por tamaño y geometría del campo de heliostatos y por su capacidad de concentrar la radiación solar. La Figura 13 muestra el esquema de uno de estos módulos (conjunto HCPC- Receptor Volumétrico).

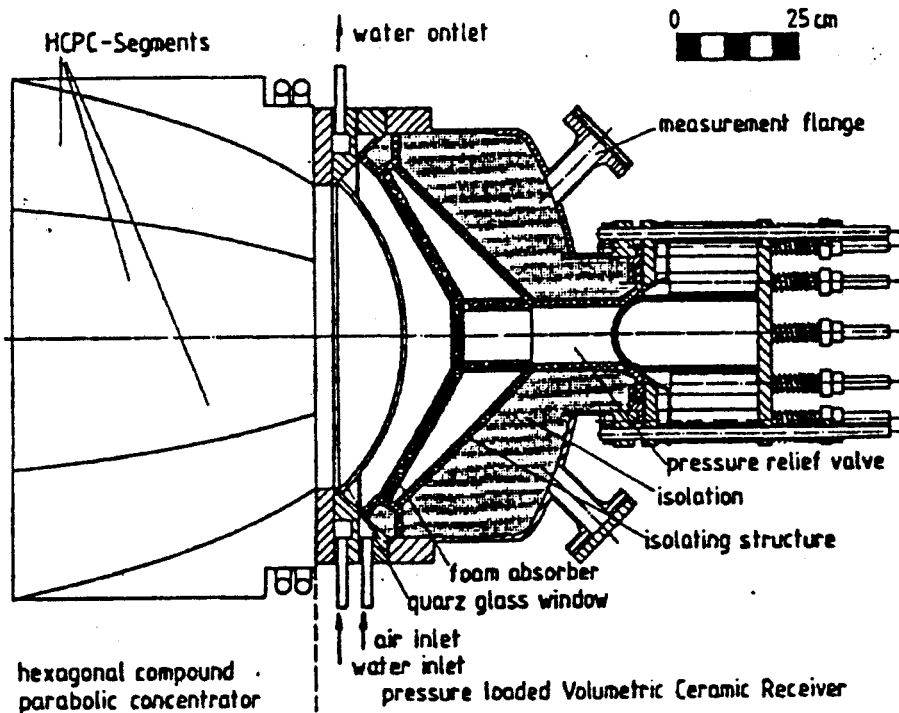


Figura 1. Esquema del conjunto HCPC-Receptor Volumétrico.

Esencialmente, el receptor volumétrico consiste en una cavidad que contiene en su interior una malla de hilos cerámicos a través de la cual circula aire, que en este caso es el fluido de trabajo. Mientras la radiación solar procedente del campo de heliostatos calienta la malla de hilos cerámicos, el aire que fluye a través de sus poros los enfría, de forma que, en estado estacionario, una parte importante de la potencia de la radiación solar que incide sobre el receptor se invierte en mantener el salto de entálpico que experimenta el aire a su paso por el mismo.

Para que el receptor funcionase de forma eficiente había de operarse a alta temperatura y a presión superior a la atmosférica. Por una parte, operar a altas temperaturas requería que sobre la malla metálica el flujo de radiación incidente fuese lo

más alto posible.. Por otra, posibilitar la operación presurizada del receptor hacía necesario cerrar la apertura de entrada mediante una ventana de cuarzo. Para satisfacer ambas necesidades era imprescindible el uso de un concentrador secundario. En primer lugar, por que el nivel de concentración proporcionado por el campo de heliostatos CRS-SSPS no era el suficiente para conseguir los niveles de temperaturas requeridos en el receptor. En segundo, porque las limitaciones tecnológicas, relativas a la fabricación de la ventana de cuarzo imponían severas restricciones en el tamaño y forma de su apertura de entrada<sup>a</sup>. Por lo que salvo que se utilizase un concentrador secundario no era posible conseguir que al interior del receptor llegase una fracción apreciable de la potencia reflejada por el campo de heliostatos.

---

<sup>a</sup> En el momento en que se construyó el receptor, esta había de ser circular y tener un diámetro máximo de 1.5 m (sensiblemente menor que el diámetro mínimo de la imagen del sol proyectada por el campo de heliostatos, que es del orden de los 3 m).

Tabla I. Características de diseño del receptor volumétrico cerámico

- 
- potencia nominal: 500 kW
  - presión nominal: 10 bar
  - temperatura del aire a la salida: > 1000°C
  - nivel de flujo: hasta 3 MW/m<sup>2</sup>
  - ventana de cuarzo
    - diámetro: 610 mm
    - espesor: 10/12 mm
    - esferoidal
    - marco de ventana refrigerado por agua
  - malla de hilos cerámicos
    - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> foam (SIRCON) with special coating
    - porosidad: 20 poros por pulgada
    - absorción: 95%
    - espesor: 25 mm
    - piramidal
    - hecho de FLAT FOAM PLATES
  - estructura aislante hecha de fibras cerámicas reforzadas
    - matriz: Sauereisen no. 8
    - fibras: SiC, SiTiCO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
  - válvulas de descarga cerámicas
    - regulación de presión por muelles
    - sellado con aislamiento cerámico expansivo
- 

En la Tabla I se presentan las características del receptor volumétrico cerámico, que se utilizó en los ensayos.



El autor de esta tesis colaboró en el diseño del concentrador secundario hexagonal tipo CPC (HCPC) utilizado. Definió su geometría, reflectividad a la radiación solar y posición y orientación con respecto al campo de heliostato. Llevó a cabo un estudio de su comportamiento óptico-energético en condiciones de diseño, para estimar las distribuciones de potencia absorbida en sus superficies reflectivas y las de flujo incidente en el plano de su apertura de salida y en otros situados tras éste <sup>39</sup> a. Finalmente, participó en la definición y supervisión de las pruebas efectuadas para caracterizarlo.

En las siguientes subsecciones se describen los experimentos llevados a cabo para analizar el comportamiento energético de este concentrador secundario y se presentan y analizan los resultados obtenidos.

#### **4.1 Características del sistema de concentración.**

Como se ha dicho anteriormente, el HCPC fue diseñado específicamente para trabajar en conjunción con el campo de heliostato SSPS-CRS. Por lo tanto, desde el punto de vista de la caracterización energética, el sistema concentrador reflectivo a considerar es el conjunto formado por estos dos elementos: campo de heliostato SSPS-CRS y concentrador secundario HCPC.

---

<sup>a</sup> Estas estimaciones de energía y flujo fueron utilizadas durante el diseño mecánico del concentrador secundario para definir su sistema de enfriamiento. W. Pritzkow realizó el diseño mecánico en el Instituto para Estructuras y Diseño del DLR de Stuttgart.

#### 4.1.1 El campo de heliostato SSPS-CRS.

El campo de heliostato SSPS-CRS está compuesto de 93 heliostatos diseñados y suministrados por la compañía estadounidense Martin-Marietta. La superficie total reflectiva de cada uno de estos heliostatos es de  $39.3 \text{ m}^2$ , distribuida en 12 módulos rectangulares e idénticos de  $1.09 \times 3.05 \text{ m}$  denominados facetas. Cada faceta sostiene un espejo curvo de  $1.079 \times 3.035 \text{ m}$  con una superficie total reflectiva de  $3.275 \text{ m}^2$ .

No todos los heliostatos del campo son exactamente iguales. Pueden diferir en la longitud focal de sus facetas. El campo CRS-SSPS está dividido en cuatro zonas, a las que corresponden heliostatos de longitud focal 77, 101, 132 y 162 m respectivamente. La utilización de heliostatos de distintas longitudes focales en función de sus distancias al receptor permite mejorar la concentración del campo en su conjunto, ya que con ello se logra que la imagen del sol que proyectan los heliostatos sobre el blanco (sea éste la propia superficie absorbente del receptor, en el caso de un receptor plano, la apertura de entrada de su cavidad, en el caso de un receptor de cavidad, o la apertura de entrada del HCPC, en este caso concreto), no aumente demasiado con la distancia de éstos al blanco. Con ese mismo propósito una vez situados los heliostatos en el campo, la orientación de sus facetas se ajusta de forma individual, en un proceso denominado "canteo".

Las facetas están unidas en tres puntos a la estructura que las soporta; dos de éstos puntos son ajustables para posibilitar el canteo. El grupo formado por la estructura soporte y las facetas se denomina “conjunto reflector”.

La estructura soporte de las facetas está formada por cuatro perfiles paralelos, cada uno de 35.6 cm de profundidad, montados sobre una barra horizontal perpendicular a los mismos, denominada barra de elevación. La barra de elevación, a su vez, está montada sobre dos brazos rígidos que la conectan con el mecanismo de seguimiento, el cual consiste, básicamente, en un conjunto de engranajes reductores accionados por dos motores. Es el accionamiento de los motores, controlados por computador, el que permite el movimiento del heliostato (es decir, de su superficie reflectiva) en dos ejes: acimut y elevación

Los decodificadores angulares (necesarios para determinar la orientación del heliostato) están situados colinealmente con los ejes: el decodificador de elevación en uno de los brazos que une el mecanismo de dirección con la barra de elevación y el decodificador de acimut dentro del pedestal debajo de este mecanismo.

Todo el conjunto (facetas, estructura soporte y mecanismo de dirección) está sostenido por un pedestal de 3.784 m de alto, fabricado a partir de un tubo de 54.3 m de diámetro y 0.64 cm de espesor. La parte inferior del pedestal termina en un disco de mayor diámetro, conectado a la cimentación mediante unos tornillos diseñados especialmente para facilitar la nivelación del heliostato.

La Figura 14 muestra una vista global del heliostato Martín-Marietta.

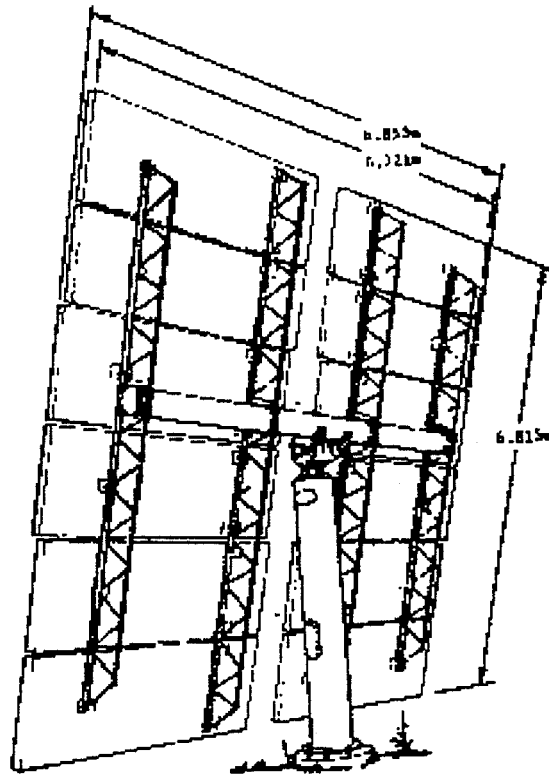


Figura 2. Vista global del heliostato Martín-Marietta<sup>48</sup>

Todos los heliostatos del campo están situados al norte de una torre de 43 m de altura. Sobre esta torre se situó el concentrador secundario HCPC y el receptor volumétrico. Si se define un sistema de coordenadas cartesiano de forma que el origen esté situado al pie de la torre del campo de heliostatos; el plano x-y sea el plano horizontal; el eje x esté situado en la dirección este-oeste, positivo hacia el este; el eje y en la dirección norte-sur, positivo hacia el norte; y el eje z en la dirección vertical, positivo hacia el cenit, entonces la localización de los heliostatos se puede describir diciendo que están distribuidos al tresbolillo y de forma simétrica con respecto al eje y sobre 12 arcos circulares concéntricos centrados alrededor del origen. Esta distribución

está diseñada para minimizar los efectos de sombra y bloque entre heliostatos. La Figura 15 muestra un esquema del campo de heliostatos CRS-SSPS. En la Tabla VII se listan las coordenadas de los centros de sus bases.

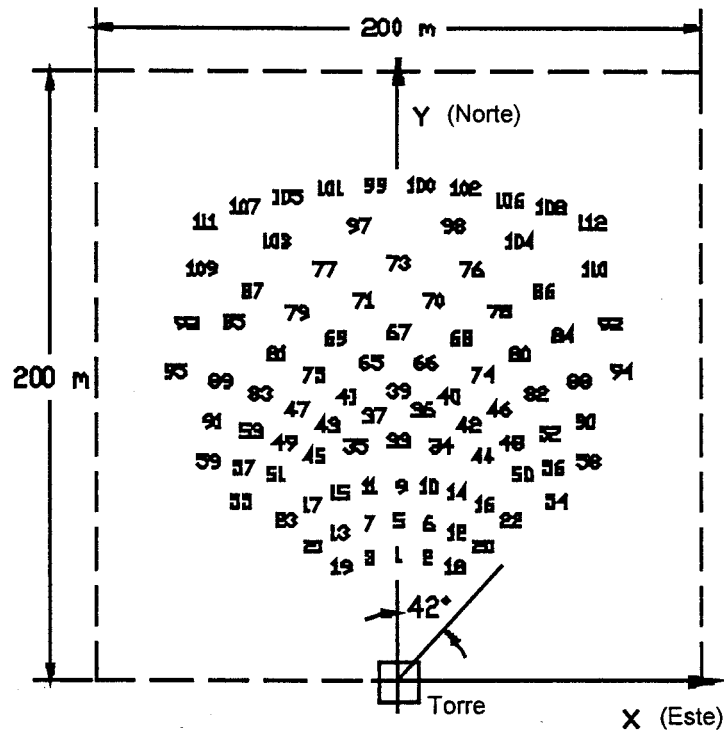


Figura 3. Configuración del campo de heliostatos CRS-SSPS.

El número, tamaño y distribución de los heliostatos, así como la localización y altura de la torre, están definidos para que el campo CRS-SSPS proporcione en el punto de diseño<sup>a</sup> 2.7 MW térmicos sobre un blanco circular de 3.51 m de diámetro situado en posición vertical en lo alto de la torre<sup>48</sup>.

<sup>a</sup> El punto de diseño de la planta CRS-SSPS se define para el mediodía solar del equinoccio de Primavera, con una irradiación solar directa de 920 W/m<sup>2</sup> y una reflectividad de media de los heliostatos de 0.911

Tabla II. Coordenadas de los centros de la base de los 93 heliostatos del campo SSPS-CRS

Helioestado	x (m)	y (m)	z (m)	Helioestado	x (m)	y (m)	z (m)
				102	22.56	161.99	3.35
1	0.00	42.21	0.84	106	36.58	159.11	3.38
2	9.75	41.15	0.87	108	50.60	155.45	3.88
18	18.90	37.79	0.88	112	64.04	150.27	3.84
5	0.00	52.85	1.05	8	-9.75	41.15	0.77
6	9.91	51.83	1.07	19	-18.89	37.80	0.70
12	19.46	49.06	1.07	7	-9.91	51.82	0.97
20	28.20	44.65	1.04	13	-19.44	49.06	0.88
9	0.00	65.11	1.28	21	-28.17	44.64	0.75
10	9.90	64.01	1.33	11	-9.90	64.01	1.20
14	19.51	62.04	1.34	15	-19.51	62.03	1.12
16	28.62	58.36	1.30	17	-28.62	58.36	1.02
22	37.19	53.35	1.26	23	-37.19	53.34	0.85
33	0.00	79.26	1.58	35	-14.03	78.03	1.46
34	14.02	78.03	1.63	45	-27.74	74.22	1.33
44	27.74	74.22	1.62	51	-40.69	68.28	1.12
50	40.69	68.27	1.57	55	-52.12	59.72	0.92
54	52.15	59.72	1.46	37	-7.92	87.33	1.71
36	7.93	89.33	1.78	43	-23.46	84.28	1.54
42	23.48	84.27	1.79	48	-37.80	78.94	1.37
48	37.81	78.94	1.77	57	-51.20	70.55	1.14
56	51.22	70.55	1.68	41	-17.05	94.17	1.77
39	0.01	95.97	1.90	47	-33.51	89.60	1.61
40	17.09	94.18	1.97	53	-48.91	82.30	1.89
46	33.54	89.62	1.96	59	-62.77	72.36	1.11

---

52	48.93	82.30	1.87	65	-9.45	104.85	2.98
58	62.80	72.38	1.78	75	-28.04	101.50	1.85
66	9.45	104.85	2.13	83	-45.56	94.95	1.65
74	28.03	101.49	2.17	91	-61.88	85.33	1.87
82	45.57	94.94	2.13	69	-20.73	113.09	2.15
90	61.87	85.34	2.03	81	-40.23	107.75	1.94
67	0.00	114.92	2.30	89	-58.84	98.74	1.64
68	20.73	113.09	2.36	71	-11.74	125.43	2.43
80	40.23	107.76	2.37	79	-33.53	121.31	2.25
88	59.84	98.76	2.27	85	-54.56	118.69	1.96
70	11.71	125.43	2.56	95	-73.76	102.25	1.63
78	33.52	121.80	2.59	77	-24.53	135.03	2.57
84	54.57	113.69	2.55	87	-48.16	128.63	2.32
94	73.77	102.26	2.43	93	-70.10	117.65	1.98
73	0.01	137.36	2.75	97	-13.41	149.65	2.93
76	24.55	135.04	2.83	108	-40.23	144.77	2.69
86	48.16	128.63	2.83	109	-64.93	135.46	2.38
92	70.11	117.65	2.74	99	-7.47	163.07	3.20
98	18.41	149.63	3.05	101	-22.56	161.98	3.11
104	40.28	144.78	3.12	105	-36.59	159.11	2.97
110	64.98	135.46	3.05	107	-50.60	155.44	2.83
100	7.48	163.06	3.29	111	-64.02	150.26	2.66

---

#### 4.1.2 El concentrador hexagonal parabólico compuesto (HCPC)

El concentrador hexagonal secundario HCPC es un CPC hexagonal truncado diseñado para producir, bajo condiciones de nominales (mediodía solar del equinoccio de Primavera, con una irradiación solar directa de  $800 \text{ W/m}^2$ , una reflectividad media del campo de heliostatos de 0.85, y una reflectividad media de los espejos del HCPC de 0.80), un flujo medio de  $3.5 \text{ MW/m}^2$  sobre la apertura de entrada del receptor volumétrico de  $0.234 \text{ m}^2$  de superficie, suministrándole, por tanto, una potencia de 819 kW. En la Tabla III se proporciona información sobre las características básicas del concentrador secundario HCPC.

Tabla III. Características de diseño del concentrador secundario HCPC

---

<input type="checkbox"/> forma hexagonal
<input type="checkbox"/> longitud de un lado del hexágono de entrada: 520 mm
<input type="checkbox"/> longitud de un lado del hexágono de salida: 300 mm
<input type="checkbox"/> profundidad: 610 mm
<input type="checkbox"/> razón de concentración geométrica: 3
<input type="checkbox"/> recubrimiento de las superficies reflectivas:
- plata con una reflectividad del 96-97% y resistente hasta una temperatura de $300^\circ\text{C}$ (used in the tested HCPC)
<input type="checkbox"/> refrigeración por agua de todas las superficies reflectivas
- 2/3 con tubos de 10 mm de diámetro
- 1/3 con tubos de 6 mm de diámetro

---

El diseño del reconcentrador HCPC representa un compromiso entre dos objetivos antagónicos: conseguir un razón de concentración geométrica elevada y



maximizar la cantidad total de energía que el concentrador es capaz de redirigir hacia su apertura de salida. Mientras la razón de concentración geométrica del HCPC aumenta substancialmente al disminuir su ángulo de aceptación, la cantidad total energía que éste es capaz de redirigir hacia su apertura de salida disminuye.

Puesto que un concentrador secundario del tipo HCPC que tuviese un semiángulo de aceptación igual al semiángulo horizontal subtendido por el campo de heliostato ( $42^\circ$ ) no podría proporcionar una razón de concentración geométrica significativa, no fue posible diseñar un HCPC que aceptase las contribuciones de energía de todos los heliostatos en el campo. Tras un proceso de optimización en el que se fueron variando el semiángulo de aceptación y la orientación del eje óptico del HCPC, el diseño finalmente adoptado consistió en un HCPC truncado de  $32^\circ$  de semiángulo de aceptación y eje óptico inclinado  $29^\circ$  hacia abajo con respecto al horizontal<sup>a</sup>, capaz de aceptar las contribuciones energéticas de 71 de los 93 heliostatos que componen el campo CRS-SSSPS (ver Figura 16).

---

<sup>a</sup> La inclinación hacia abajo del HCPC fue creada para distribuir por igual el flujo solar que entra/entrante entre las paredes reflectivas/reflectantes del concentrador.

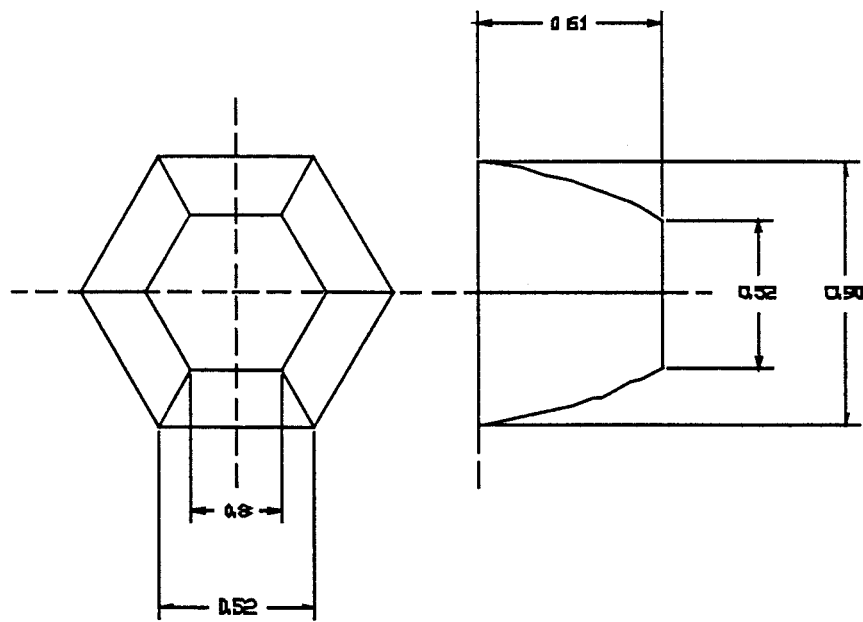


Figura 4 Vista global del diseño del concentrador geométrico secundario HCPC (todas las dimensiones en metros).

Este HCPC estaba formado por seis superficies reflectivas de geometría translacional<sup>a</sup> idénticas, orientadas y unidas de forma que constituyesen una cavidad hexagonal. En la Figura 17 se muestra la geometría de este reconcentrador y se indican sus dimensiones más relevantes.

<sup>a</sup> Una superficie de barrido de traslación es la generada al trasladar una curva planar en la dirección normal a su plano contenido<sup>49</sup>.

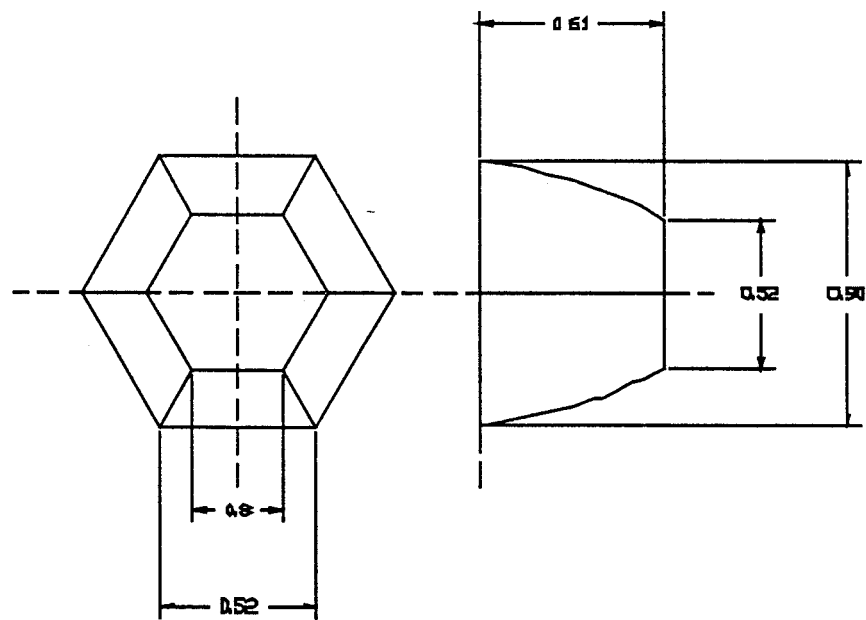


Figura 5 Vista global del diseño del concentrador geométrico secundario HCPC (todas las dimensiones en metros).

Por su parte, en la Figura 18 se muestra un detalle de la sección transversal obtenida al cortar el HCPC por un plano que contenga a su eje geométrico y sea perpendicular a cualquiera de los lados de sus bases hexagonales.

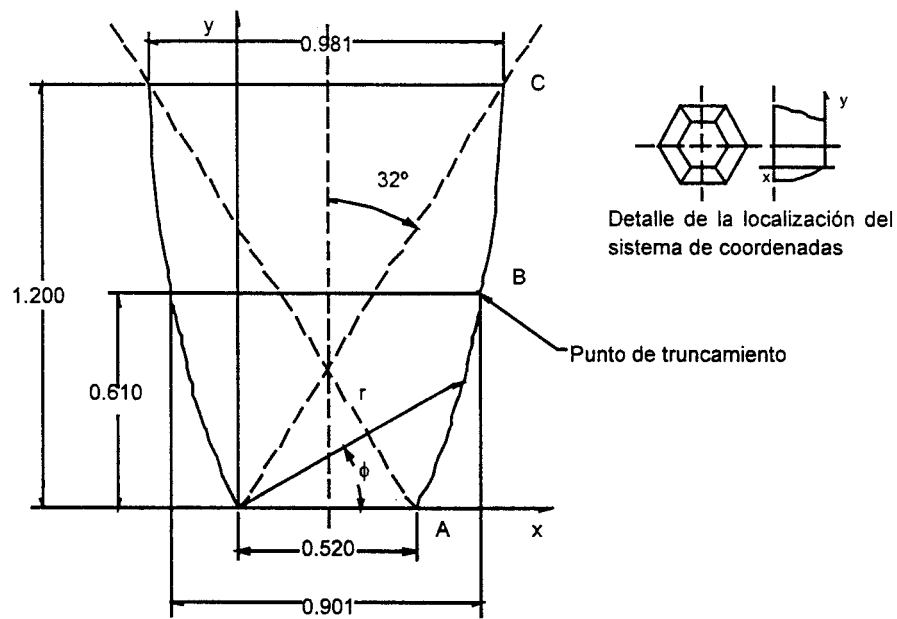


Figura 6 Sección transversal del diseño geométrico del HCPC (todas las dimensiones en metros).

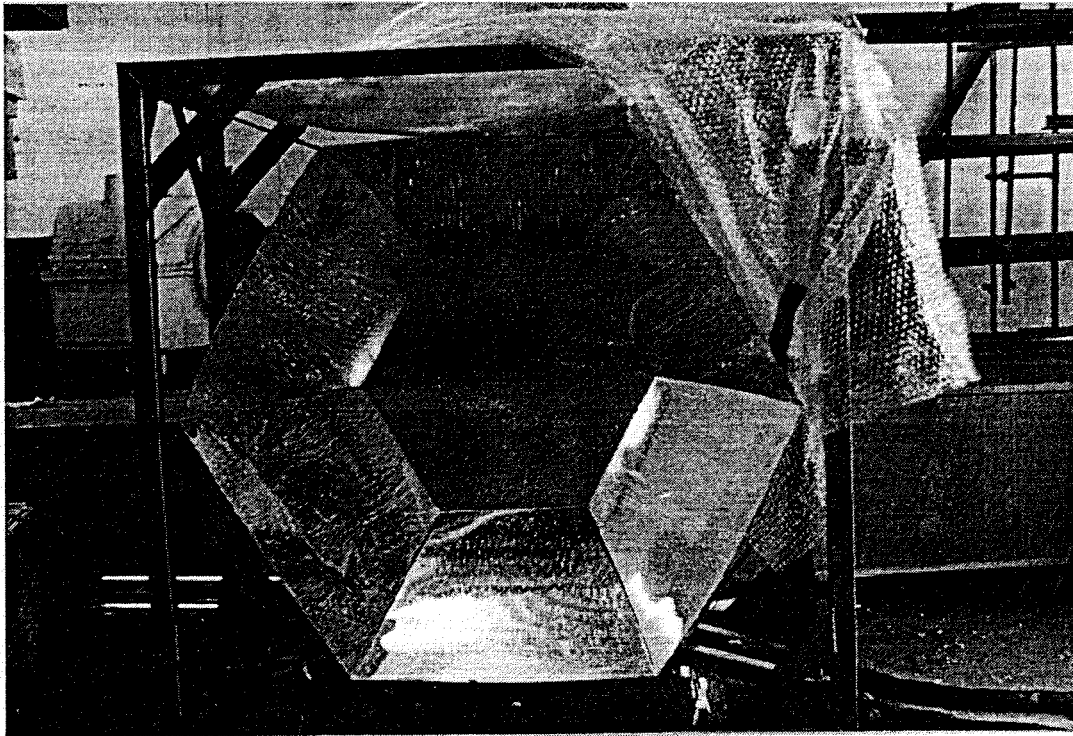
Esta última figura pone de relieve el carácter de concentrador parabólico compuesto (CPC) de este concentrador secundario. Muestra claramente que la sección transversal del HCPC es la de un concentrador parabólico compuesto truncado en su entrada. Según la notación empleada en la figura, la ecuación en polares que define la sección transversal del diseño geométrico del HCPC viene dada por:

$$r(\phi) = \frac{0.795}{1 + \sin(32^\circ + \phi)} \quad \forall \phi \in [0, 40.7^\circ] \quad (4-1)$$

donde  $r(\phi)$  es el módulo (en metros) del vector de posición,  $\vec{r}(\phi)$ . Al igual que para cualquier otro CPC, esta es la ecuación de una sección de una parábola con foco en el

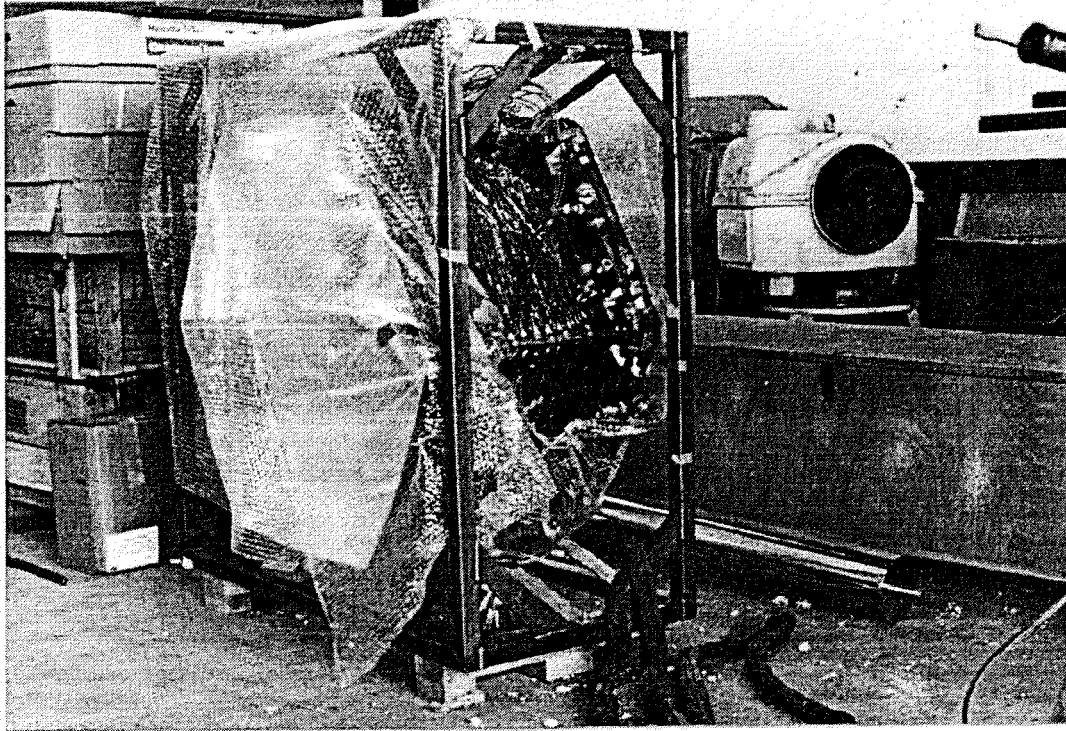
origen de coordenadas y eje de simetría inclinado  $32^\circ$  en sentido contrario a las agujas del reloj con respecto al eje de ordenadas.

En cuanto al diseño mecánico, las superficies del concentrador eran de bronce con sus superficies delanteras (la expuesta a la radiación solar) pulidas y cubiertas con níquel, plata, y un recubrimiento especial diseñado para aumentar la reflectividad. La reflectividad nominal de dichas superficies estaba estimada entorno al 96 - 97 %, estando diseñadas para resistir temperaturas de hasta  $300^\circ\text{C}$ .



**Figura 7** Vista frontal del concentrador secundario HCPC antes de ser montado en lo alto/encima de la torre del campo de helióstato SSPS-CRS.

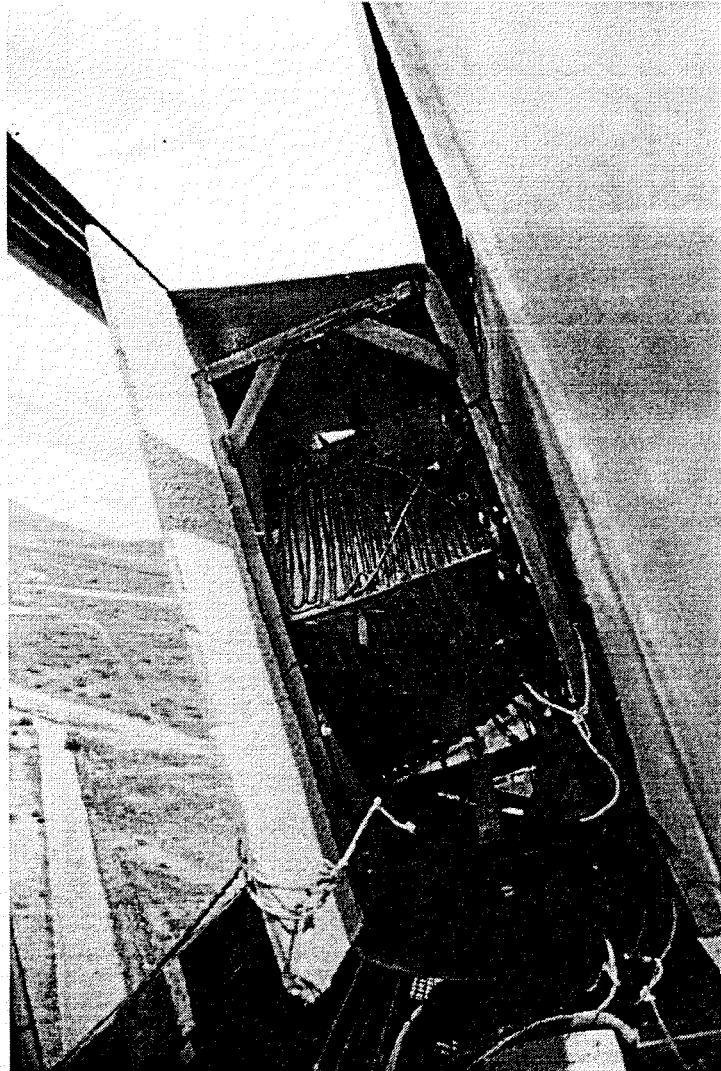
Las Figuras 19 y 20 muestran una vista frontal y lateral del HCPC respectivamente. En ellas se puede apreciar la terminación especular de sus superficies frontales.



**Figura 8** Vista lateral del concentrador secundario HCPC antes de ser montado en lo alto/encima de la torre del campo de helióstato SSPS-CRS.

Con objeto de mantener la temperatura de las superficies del concentrador dentro de unos límites aceptables, ideó un circuito de refrigeración compuesto básicamente de tubos de cobre que iban soldados a la parte trasera de dichas superficies y por los que se hacía circular agua, que entraba en el circuito a temperatura ambiente. Como se esperaba que, en todas las superficies, fuese la zona más cercana a la salida del HCPC la que estuviese sujeta a los valores más altos de flujo solar, en todas ellas se situó en ese extremo la entrada del agua de refrigeración.

En la Figura 21 se muestra una vista lateral del HCPC colocado en su emplazamiento definitivo en lo alto de la torre del campo de heliostatos CRS-SSPS. En ella son claramente visibles las tuberías de cobre del sistema de refrigeración del HCPC.



**Figura 9** Vista lateral del concentrador secundario HCPC en su posición de funcionamiento, sobre la torre del campo de helióstato SSPS-CRS.

## 4.2 Objetivos del test.

Los objetivos iniciales de la campaña de prueba en relación con el concentrador secundario HCPC fueron:

1. Evaluar el comportamiento óptico, térmico y mecánico del HCPC.
2. Comprobar la validez del programa de análisis de energía de los sistemas concentradores de luz reflectante presentados en esta tesis comparando las estimaciones de software con los valores medidos/comprobados.

Sin embargo, estos objetivos eran demasiado ambiciosos. Para alcanzarlos se necesita la capacidad de obtener y/o medir, al menos, la siguiente información:

1. Tiempo solar,
2. Irradiación solar directa,
3. Temperatura ambiente,
4. Velocidad y dirección del viento en el lugar/sitio del HCPC.
5. Reflectividad media de los heliostatos SSPS-CRS.
6. Número y posición de los heliostatos SSPS-CRS en seguimiento (es decir, los requeridos en la apertura de entrada del concentrador),
7. Geometría actual, posición, y orientación con respecto al campo de heliostato SSPS-CRS del HCPC,
8. Calidad óptica y distribuciones de reflectividad de las paredes reflectantes del HCPC,
9. Temperaturas de entrada y salida, y el curso del flujo del agua refrigerante del HCPC,



10. Distribuciones direccionales del flujo en las aperturas de entrada y salida del HCPC,

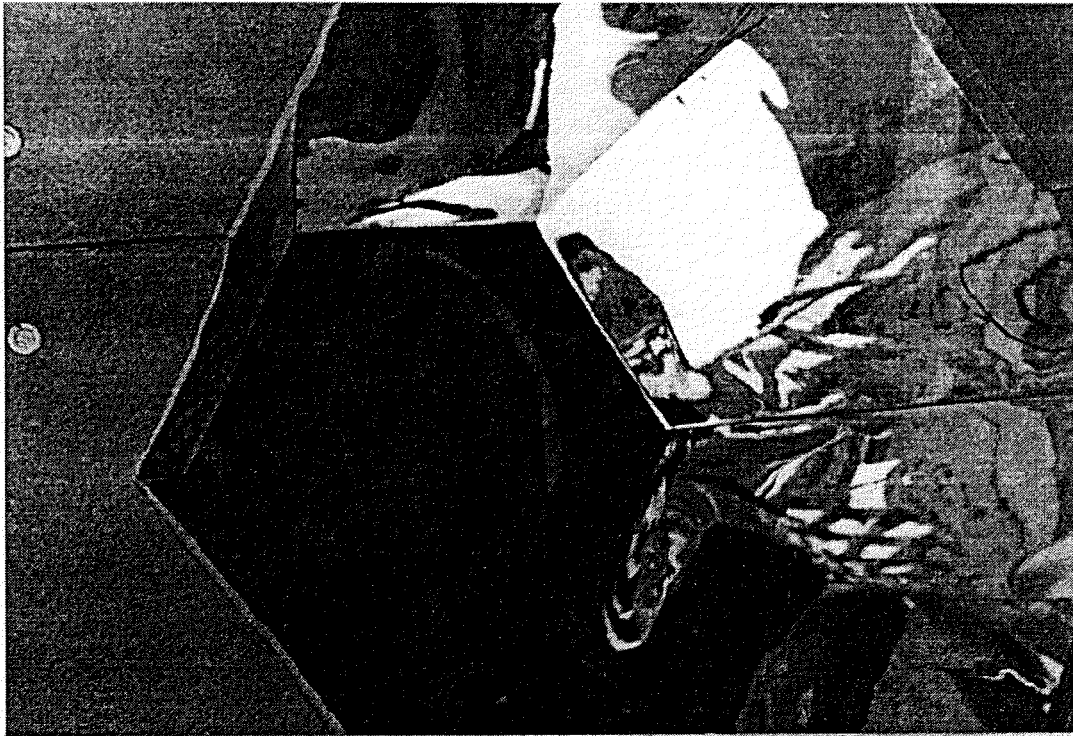
11. Distribuciones de temperatura y esfuerzo/carga en las paredes del HCPC.

Debido a la falta de un equipo adecuado y/o de recursos de financiación, no se pudieron medir con detalle ni la geometría real del concentrador secundario HCPC ni la calidad óptica y distribuciones de reflectividad de su reflectividad. Además, las distribuciones de esfuerzo/carga de las superficies del HCPC no pudieron ser medidas. Por último, debido al corto periodo de tiempo asignado para diseñar, desarrollar y construir los instrumentos para medir el alto flujo tuvieron que medir las distribuciones del flujo en las aperturas de entrada y salida del HCPC, aunque estos instrumentos estaban diseñados para medir sólo el flujo incidente total, es decir, no daban información sobre la distribución angular del flujo.

La imposibilidad de medir la geometría real del HCPC y la calidad óptica y distribuciones de reflectividad de sus paredes reflectante fue especialmente importante, ya que era evidente sólo a simple vista que la geometría real del HCPC era diferente de su diseño geométrico y que la calidad óptica y reflectividad de las paredes reflectantes del HCPC eran mucho más bajas de lo que se esperaba.

Las discrepancias relativamente grandes entre el diseño y el HCPC construido en realidad se debieron a errores de manufactura/construcción. Primero, los bordes de entrada y salida del hexágono no fueron realizados y ni montados con suficiente precisión. Segundo, las técnicas utilizadas para atar las bobinas refrigerantes a las

superficies del HCPC (soldadura blanda y soldadura) les produjeron una ondulación, degradando su calidad óptica (ver Figura 10). Finalmente, la capa protectora y que aumentaba la reflectividad diseñada para proteger las superficies del concentrador de tipo espejo no estaban puestas/fijadas apropiadamente.



**Figura 10 Imagen de cerca de algunas de las superficies reflectantes del HCPC mostrando la ondulación producida por las bobinas refrigeradoras soldadas detrás.**

Esto dio lugar a una pobre adhesión de la capa a las superficies, y una subsecuente corrosión de las superficies del HCPC después de estar expuestas a la lluvia.

Bajo estas circunstancias los objetivos iniciales se reemplazaron por estos:

1. Caracterizar cualitativamente el comportamiento energético del concentrador secundario HCPC,
2. Comprobar la validez del programa de análisis de energía de los sistemas concentradores de luz reflectante presentado en esta tesis comparando el comportamiento cualitativo predicho/pronosticado en este programa con el actual.

Se cumplió el primer objetivo al considerar el concentrador secundario HCPC como una caja negra y al intentar establecer relaciones cualitativas entre el flujo de entrada y salida. En esta tarea, la falta de información sobre la distribución direccional de la incidencia del flujo sobre el hexágono de entrada del concentrador está parcialmente compensada por la información sobre los helióstatos requeridos por el concentrador.

Se logró el segundo objetivo al simular el grupo/conjunto hecho de helióstatos en seguimiento y el concentrador secundario HCPC, y al comparar los esquemas/patrones de entrada y salida predichos (no los valores reales) con los medidos.

### **4.3 Los tests.**

Para alcanzar/lograr/conseguir los objetivos finales de comprobación, se necesitó sólo la siguiente información:

1. Fecha y tiempo solar,
2. Irradiación solar directa,
3. Reflectividad media de los helióstatos de los SSPS-CRS,
4. Número y localización de los helióstatos de los SSPS-CRS requeridos por el HCPC,
5. Posición y orientación con respecto al campo de helióstatos del SSPS-CRS del HCPC,
6. Distribuciones totales de flujo en las aperturas de entrada y salida del HCPC.

La fecha, la hora solar, y la irradiación solar directa fueron dadas para cada prueba por la estación climatológica Plataforma Solar. La reflectividad media de los helióstatos del SSPS-CRS fue estimada una vez al día calculando la reflectividad media de un grupo representativo de helióstatos e insertando este valor en una fórmula empírica.

A su vez, la reflectividad media de cada uno de los helióstatos seleccionados fue calculada como la media pesada/compensada/ponderada de los valores de varias medidas de reflectividad tomadas en lugares determinados empíricamente.

La posición y orientación del HCPC con respecto al campo de helióstato del SSPS-CRS se determinaron antes de comenzar/empezar la campaña de prueba mediante un reconocimiento telemétrico. Se calcularon las coordenadas reales del campo de helióstato del SSPS-CRS de los vértices del hexágono de entrada del HCPC y se estableció la localización y orientación de los ejes geométricos del HCPC. La Tabla IX

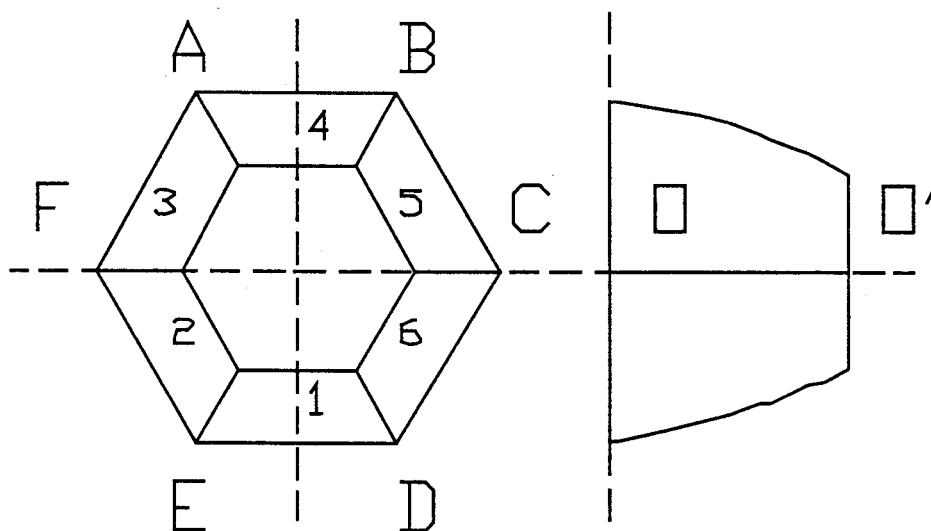
lista las coordenadas de los vértices del hexágono de entrada del HCPC (puntos A a F) y del centro de los hexágonos de entrada y salida del HCPC (puntos O y O' respectivamente). En esta tabla, a los vértices del hexágono de entrada del HCPC se les da el mismo nombre que en la Figura 23.

Tabla IV

Coordenadas de los vértices del hexágono de entrada del HCPC y los centros de los hexágonos de entrada y salida del HCPC

Puntos	x (metros)	y (metros)	z (metros)
A	0.205	1.706	43.192
B	-0.315	1.683	43.178
C	-0.578	1.490	42.777
D	-0.312	1.280	42.385
E	0.203	1.294	42.384
F	0.471	1.491	42.790
O	-0.061	1.517	42.798
O'	-0.050	0.952	43.064

Según estas informaciones, la altura real del HCPC es 2.8 cm mayor de lo esperado (0.638 m en lugar de 0.610 m). Además, su eje óptico no está completamente alineado en dirección norte-sur ni inclinado  $29^\circ$  hacia abajo, como debiera, sino orientado  $1.1^\circ$  hacia el oeste; e inclinado  $27.6^\circ$  hacia abajo.



**Figura 11** Esquema del HCPC con sus vértices, superficies, y puntos finales de ejes geométricos nominados según la notación usada para las medidas telemétricas y reflectivas.

Aunque la intención primera fue la de medir a diario la reflectividad de las superficies de tipo espejo del HCPC, las mediciones de la reflectividad se realizaron sólo una vez, justo antes de comenzar los tests. Hubo dos razones para ello: primero, era muy difícil acceder a las superficies de tipo espejo del HCPC una vez que el concentrador secundario estuviera colocado en su sitio definitivo de funcionamiento. Lo que es más importante, no fue posible tomar medidas de la reflectividad de las

superficies del HCPC sin dañarlas, ya que, como se dijo anteriormente, su capa protectora se había deteriorado.

Se usó un Reflectómetro Espectral Solar fabricado por la compañía norteamericana Company Device and Services para medir la reflectividad de las superficies HCPC. Aunque éste no sea el reflectómetro más corrientemente usado para medir la reflectividad de los heliostatos de los SSPS-CRS - de hecho es menos exacto que éste - este aparato fue seleccionado porque es el único de los dos que hay disponibles en la Plataforma Solar que puede medir sobre superficies curvas.

Se tomaron tres medidas de reflectividad sobre cada una de las seis superficies de tipo espejo del HCPC. Todos los puntos de medición estaban localizados en la mitad del área de las superficies, donde había menos deterioro de la capa protectora.

La Tabla X lista los resultados de estas mediciones. Las superficies del HCPC son numeradas como en la Figura 23. Como muestra la tabla, los valores de reflectividad de las medidas tomadas en la superficie 3 son mucho más inferiores que los del resto; esto es debido a la corrosión de su superficie causada por una fuga/salida/escape/pérdida de agua en el sistema de refrigeración del HCPC.

**Tabla V**  
**Medidas de reflectividad del HCPC (%)**

Superficie	posición A	posición B	posición C
1	75	69	76
2	79	77	76
3	53	59	61
4	86	84	89
5	81	85	89
6	80	77	83

De esta manera, según los resultados de las mediciones de la reflectividad, la verdadera reflectividad media de las superficies del HCPC fue de 77%, mucho más inferiores de los esperados valores de 96 a 97%

Finalmente, para medir el incidente de flujo solar en las aperturas de entrada y salida del HCPC se diseñaron, desarrollaron y crearon dos aparatos medidores de alto flujo (HFDs): las llamadas barras HFD A y B. Se colocó la barra A frente el hexágono de entrada del HCPC y se utilizó para medir la incidencia de distribución del flujo sobre la apertura de entrada del HFD, mientras que la barra B fue colocada detrás del



hexágono de salida del HCPC y fue utilizado para medir la distribución del flujo en esa salida.

Básicamente, cada aparato consistió de una barra metálica vertical que contenía/conteniendo diez calorímetros circulares metálicos enfriados/refrigerados por agua que actúan como sensores de altos flujos solares. Los calorímetros fueron distanciados por igual en la dirección vertical a lo largo del eje de simetría de la barra. La barra fue atada mediante unas bobinas/rollos a un marco metálico de tal manera que pudiera moverse paralelo a sí mismo en la dirección perpendicular al eje de simetría. Un sistema de transmisión, alimentado por un motor por pasos y controlado por un ordenador, aseguraron la posición exacta de la barra en esta dirección.

Para medir la distribución del flujo en un área limitada por el marco metálico, la barra se movía de izquierda a derecha, parando un segundo en cada uno de los espacios prefijados y distanciados por igual. En estos sitios se tomó lectura de los sensores de la barra, generando por lo tanto un grupo de 100 (10 x 10) valores de medidas.

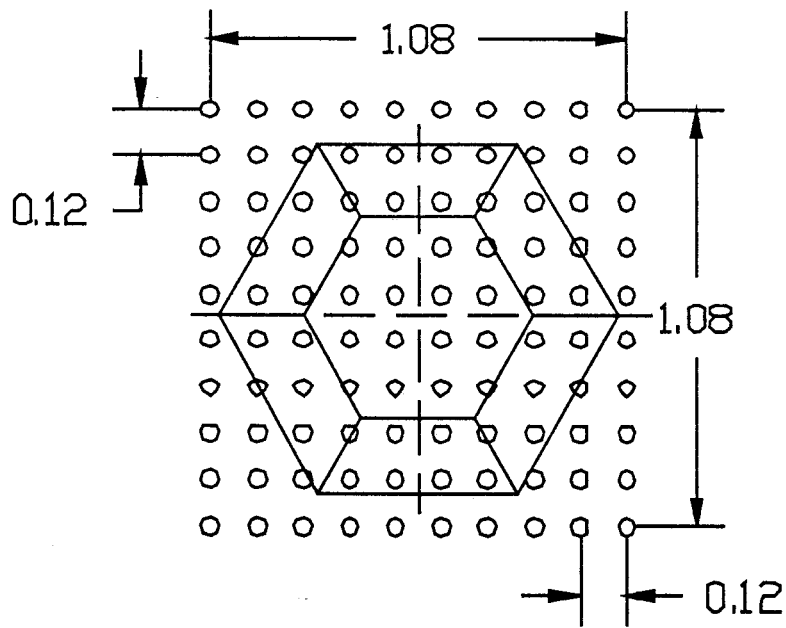


Figura 12 Localización de los puntos en los que se midió la distribución del flujo entrante (todas las dimensiones en metros).

La distancia vertical entre los centros de dos sensores consecutivos fue de 0.12 m para la barra A del HFD (igual a la distancia entre dos posiciones/puntos/sitios consecutivos de parada de esta barra) y de 0.09 m para la barra B del HFD (también, igual que la distancia entre dos posiciones consecutivas de parada de esta barra). La Figura 24 muestra la situación de los puntos en los que se midió el flujo de entrada, es decir, aquellos donde se fue leyendo la barra HFD. La Figura 25 muestra la localización de los puntos donde se midió el flujo de salida, es decir, donde se leyó la barra B del HFD.

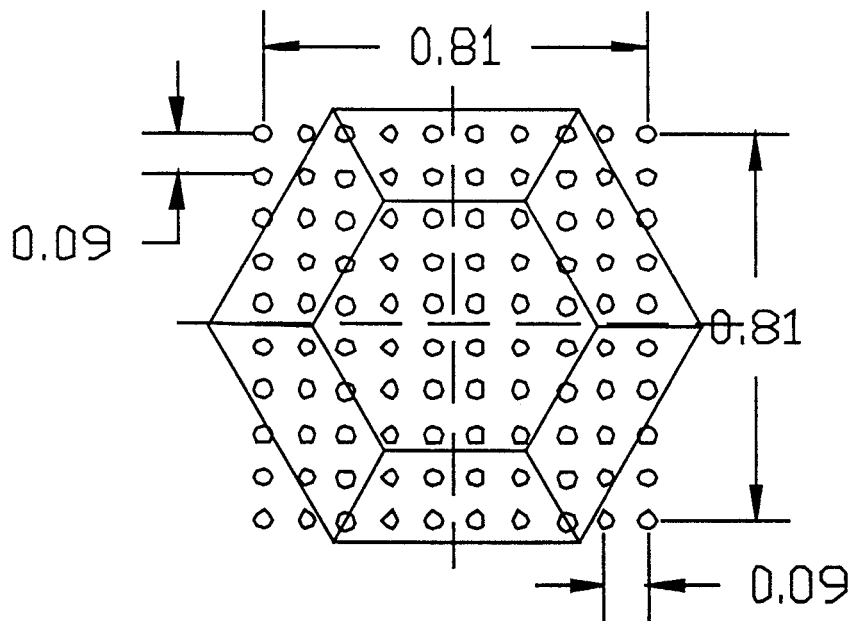


Figura 13 Localización de los puntos en los que se leyó la distribución del flujo de salida (todas las dimensiones en metros).

Todos los calorímetros utilizados fueron del tipo “model 1000-4” fabricados por Thermogage, una compañía de los Estados Unidos. La barra A usó 8 calorímetros de hasta  $3.4 \text{ MW/m}^2$  y dos de hasta  $1.4 \text{ MW/m}^2$ , con los dos calorímetros de bajo alcance colocados en los extremos. La barra B del HFD usó 10 calorímetros de hasta  $5.7 \text{ MW/m}^2$ . La diferencia entre el alcance/la distancia/el intervalo de los calorímetros de las dos barras se justifica porque se esperaba/suponía que la barra A del HFD estuviera sujeta a flujos inferiores.

Según las especificaciones del fabricante, las lecturas del radiómetro tuvieron un error relativo de medición de un  $\pm 3\%$ . La experiencia anterior con aparatos de medición de alto flujo en la Plataforma Solar indica que el error relativo de medición de

los cálculos el computo de energía total obtenida de la información del HFD se pueden estimar en un  $\pm 5\%$ <sup>50</sup>.

Como la sombra de la barra A distorsionaba la distribución de flujo en la salida del HCPC, las distribuciones de flujo de entrada y salida no fueron nunca medidas simultáneamente. En general la distribución de flujo de entrada era medida primero. De cualquier modo, la diferencia de tiempo entre las mediciones de distribución de los flujos de salida y entrada no excedieron nunca más de dos minutos.

La campaña de comprobación tuvo lugar en Octubre de 1990. Se realizaron un total de 37 pruebas. Debido al deterioro de las superficies de tipo espejo del concentrador secundario, fue imposible saber cuanto flujo podía soportar el concentrador. Por lo tanto, se decidió comenzar las pruebas del concentrador con unos niveles muy bajos de energía incidente, aumentando la energía incidente paso a paso hasta que el daño de las superficies del concentrador aconsejara dejar/parar los tests.

En la Figura 26 se muestran los niveles de energía incidente que corresponden a cada uno de los 37 tests realizados. Esta figura muestra que, excepto en algunos casos, cada test fue realizado a un nivel de energía incidente más alto que el precedente. La energía incidente máxima con la que se comprobó el concentrador fue de 418 kW.

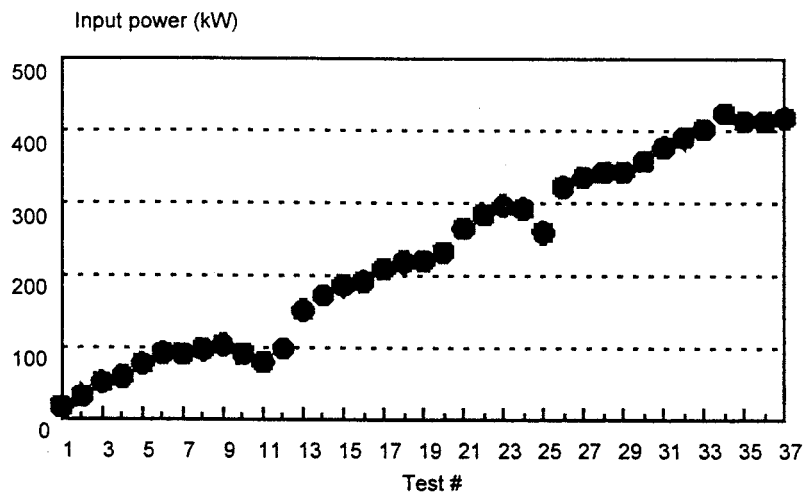


Figura 14 Niveles de energía incidente correspondiente a los 37 tests.

#### 4.4 Resultados de los tests.

Tanto la distribución de flujo, la energía total, como el flujo medio en las aperturas del hexágono de entrada y salida en el HCP se estimaron de la información recogida durante cada test.

Las distribuciones de flujo se estimaron de las lecturas correspondientes barras de HFD. La energía total que entraba en el concentrador fue calculada integrando la distribución de flujo de entrada sobre/con el área hexagonal de la entrada del concentrador.

Sin embargo, la energía total que salía del concentrador fue calculada simplemente integrando la distribución de flujo de salida sobre el área rectangular barrida por la barra del HFD situada detrás de la salida, ya que toda la energía incidente en esa barra debe provenir del concentrador. Finalmente, el flujo medio de entrada (salida) fue calculado como el cociente de la energía total de entrada (salida) y el área de apertura de entrada (salida).

En el Anexo B se presentan los resultados de estos cálculos, así como los datos no evaluados/comprobados de los cuales fueron derivados.

#### **4.5 Discusión de los resultados de las pruebas.**

Una conclusión importante derivada de las pruebas es que cuando el número de heliostatos dirigidos al concentrador secundario es pequeño o bien los heliostatos están colocados asimétricamente con respecto al eje del concentrador, la distribución de flujo en la salida del concentrador tiende a ser muy irregular. De hecho, para las pruebas realizadas, la distribución de flujo de salida no fue nunca completamente uniforme, aunque esta uniformidad aumentaba a medida que el número de heliostatos dirigidos al concentrador aumentaba, y los heliostatos fueron situados más simétricamente con respecto al eje del concentrador. Se puede apreciar este fenómeno al observar, por ejemplo, las distribuciones de flujo correspondientes a las pruebas 2, 12, 17, y 32. Para mayor comodidad han sido copiadas aquí.

**Experimento No. 02 - Datos Básicos**

Fecha: 10/15/990

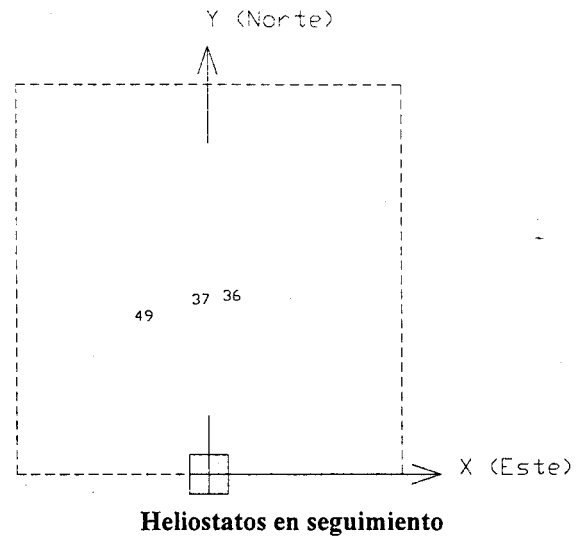
Hora Solar: 12:18

Irradiancia Directa: 932 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 87 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.06, 1.52, 42.77

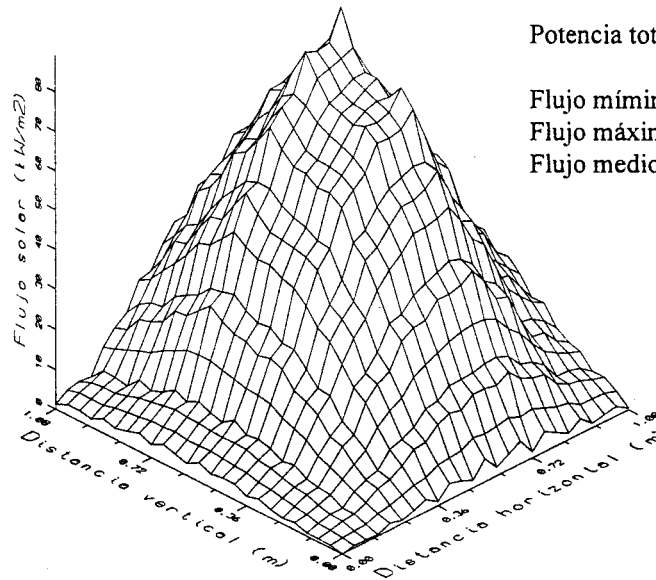
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	1.4	3.2	12.9	22.5	31.4	37.1	40.5	26.2	17.1	12.1
Rad. 2	2.1	5.0	19.4	34.0	47.1	55.5	60.3	41.6	27.5	18.9
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	3.5	9.1	31.2	54.5	72.4	83.7	89.3	65.7	43.8	29.8
Rad. 5	3.0	7.8	26.7	47.3	62.6	71.7	76.6	56.8	36.6	24.7
Rad. 6	3.5	8.3	25.6	46.2	62.8	72.6	77.9	56.6	34.3	22.8
Rad. 7	2.6	6.5	19.0	35.0	48.4	55.9	60.2	43.3	24.4	16.1
Rad. 8	1.5	4.5	12.5	23.6	33.3	37.3	40.2	29.2	15.1	9.6
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	0.2	0.3	0.8	1.2	1.5	1.7	1.7	1.3	0.9	0.6

**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	0.2	0.2	3.2	2.1	2.4	2.4	2.6	2.1	0.8	2.1
Rad. 2	1.6	1.9	4.3	4.1	3.8	3.0	4.1	3.2	4.3	1.9
Rad. 3	2.2	2.8	3.9	214.4	251.4	234.3	269.6	17.1	5.8	2.2
Rad. 4	3.5	4.0	26.8	149.4	115.3	94.6	142.1	129.6	9.6	5.2
Rad. 5	4.5	5.1	118.5	91.6	76.8	82.5	125.2	143.7	7.5	6.0
Rad. 6	4.7	6.2	114.8	75.6	86.8	77.9	135.2	158.5	9.7	5.6
Rad. 7	3.1	4.8	3.1	97.3	100.8	123.4	136.0	84.4	6.0	4.0
Rad. 8	0.2	1.1	3.0	40.0	53.6	64.1	57.5	6.9	4.4	1.3
Rad. 9	0.2	0.5	2.1	2.1	2.1	1.9	2.1	1.6	1.9	0.5
Rad. 10	1.4	0.2	0.5	0.5	1.0	0.5	0.5	0.7	0.2	0.2

### Experimento No. 02 - Distribuciones de flujo estimadas



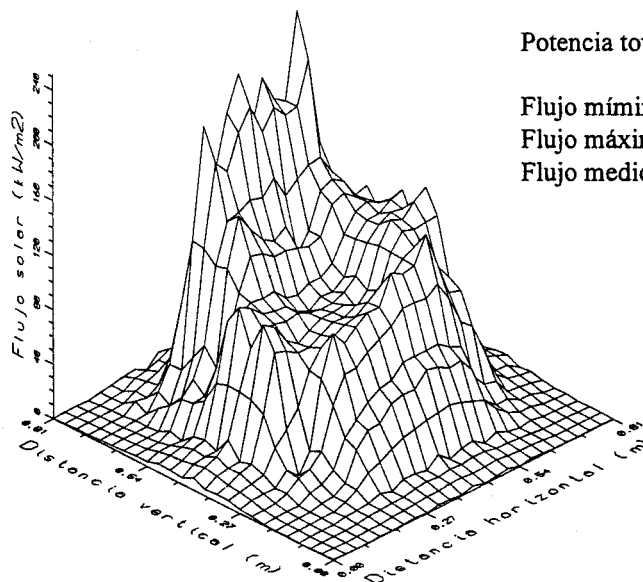
Potencia total: 32.1 kW

Flujo mínimo: 2.3 kW/m<sup>2</sup>

Flujo máximo: 89.3 kW/m<sup>2</sup>

Flujo medio: 45.5 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Potencia total: 31.4 kW

Flujo mínimo: 0.6 kW/m<sup>2</sup>

Flujo máximo: 251.8 kW/m<sup>2</sup>

Flujo medio: 134.3 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



**Experimento No. 12 - Datos Básicos**

Fecha: 10/30/990

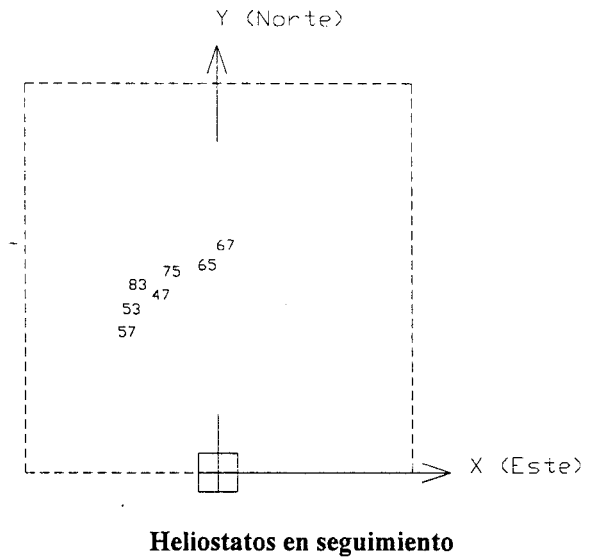
Hora Solar: 11:50

Irradiancia Directa: 964 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 86%

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.06, 1.52, 42.77

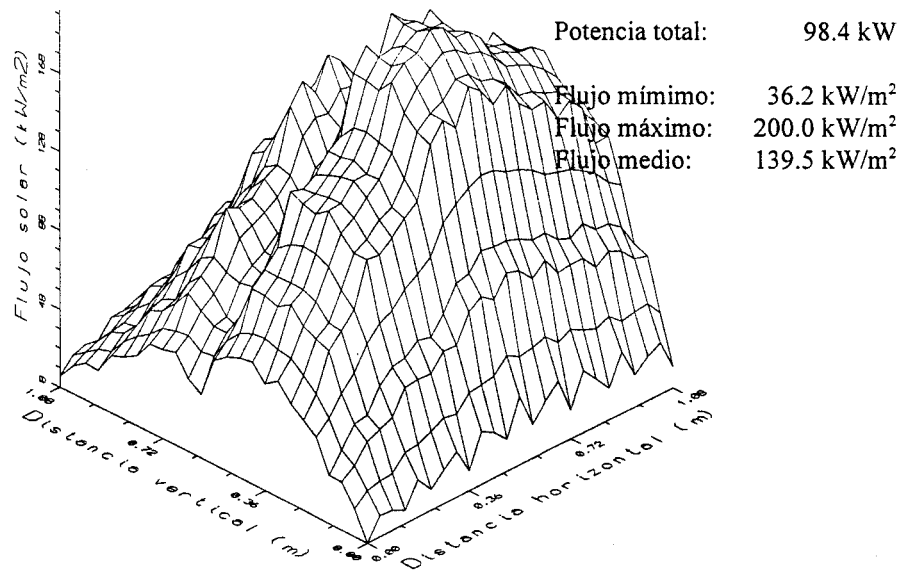
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	13.6	20.7	30.7	29.8	44.7	45.9	41.9	36.3	35.2	19.8
Rad. 2	25.1	38.0	53.6	53.3	76.8	78.5	73.3	63.5	62.2	38.2
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	53.5	82.1	112.1	114.1	157.3	164.2	155.0	136.8	134.5	93.9
Rad. 5	38.0	59.7	80.6	81.6	111.8	119.8	112.0	99.6	97.0	70.6
Rad. 6	65.7	103.2	139.9	145.8	195.4	205.5	194.0	172.0	169.0	128.1
Rad. 7	62.1	100.3	135.7	142.6	190.3	201.2	189.1	169.0	165.8	128.5
Rad. 8	53.0	90.7	124.2	131.7	175.2	186.9	174.5	157.2	153.4	120.6
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	8.0	12.4	16.8	18.1	21.4	22.2	22.7	21.5	21.5	18.8

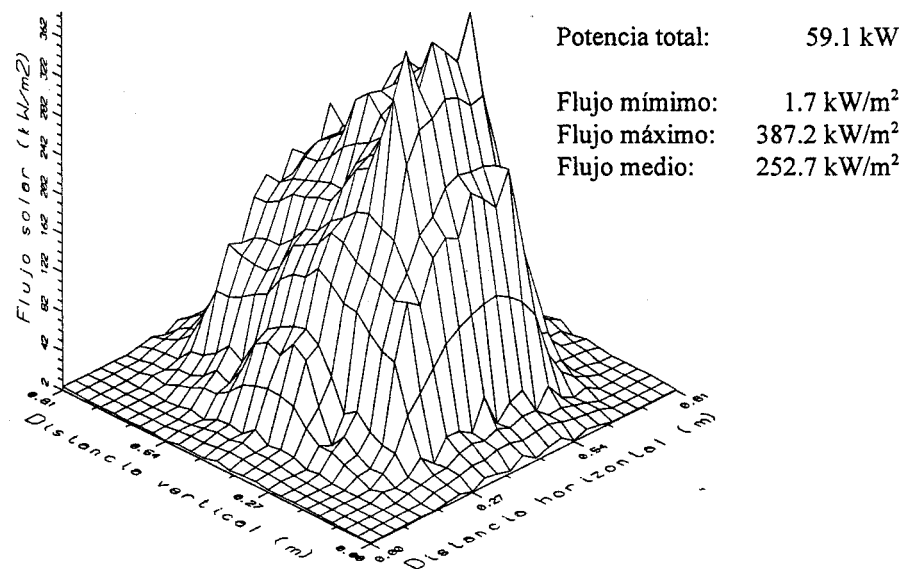
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	13.6	20.7	30.7	29.8	44.7	45.9	41.9	36.3	35.2	19.8
Rad. 2	25.1	38.0	53.6	53.3	76.8	78.5	73.3	63.5	62.2	38.2
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	53.5	82.1	112.1	114.1	157.3	164.2	155.0	136.8	134.5	93.9
Rad. 5	38.0	59.7	80.6	81.6	111.8	119.8	112.0	99.6	97.0	70.6
Rad. 6	65.7	103.2	139.9	145.8	195.4	205.5	194.0	172.0	169.0	128.1
Rad. 7	62.1	100.3	135.7	142.6	190.3	201.2	189.1	169.0	165.8	128.5
Rad. 8	53.0	90.7	124.2	131.7	175.2	186.9	174.5	157.2	153.4	120.6
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	8.0	12.4	16.8	18.1	21.4	22.2	22.7	21.5	21.5	18.8

## Experimento No. 12 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 17 - Datos Básicos**

Fecha: 10/30/990

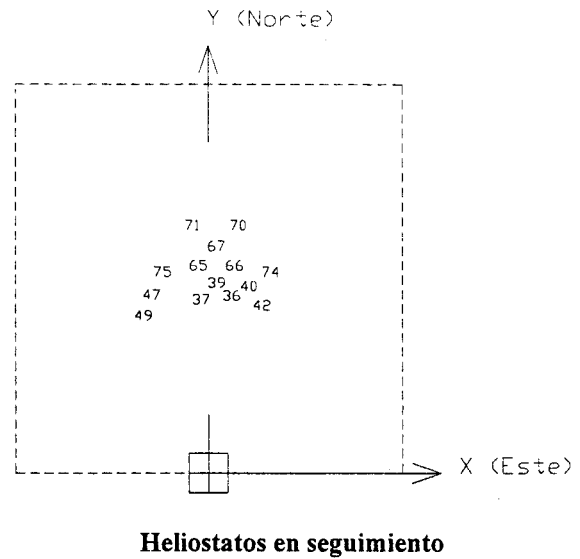
Hora Solar: 13:15

Irradiancia Directa: 975 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 86 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33

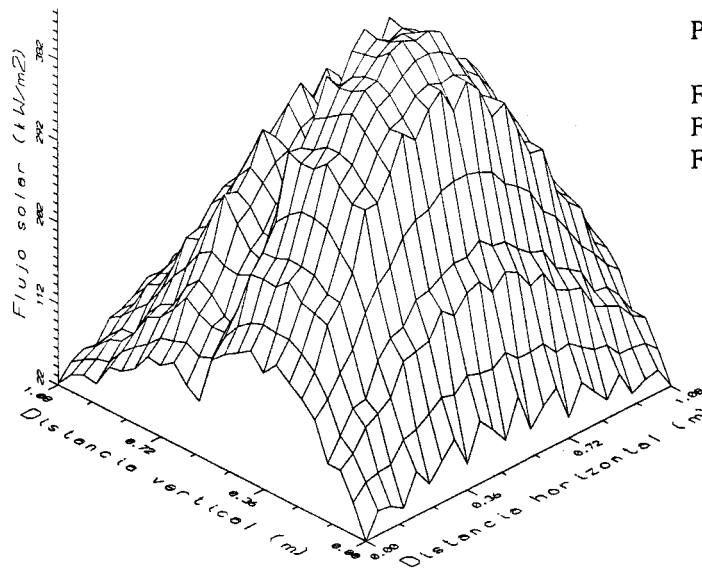
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	22.8	42.3	68.9	82.5	94.8	99.0	88.7	75.5	59.8	43.6
Rad. 2	41.2	74.6	118.4	139.9	160.5	165.0	147.1	122.3	96.9	67.1
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	99.7	174.1	259.4	303.4	340.0	342.8	303.6	251.1	193.9	128.0
Rad. 5	75.9	128.6	189.4	217.6	244.4	244.6	212.7	175.7	135.7	87.8
Rad. 6	145.9	243.6	350.2	405.0	443.6	442.6	388.2	319.4	243.4	158.9
Rad. 7	148.0	243.3	347.2	403.5	438.9	435.7	381.9	312.0	234.5	152.1
Rad. 8	140.2	228.2	327.0	383.8	415.9	412.2	361.0	292.0	215.0	139.0
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	21.5	31.0	44.1	49.5	47.3	45.2	43.3	36.9	29.6	22.6

**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	7.8	9.7	11.0	9.1	10.5	8.0	7.0	6.2	7.0	7.8
Rad. 2	8.5	11.2	13.1	13.4	13.1	13.4	11.5	9.5	6.8	8.2
Rad. 3	8.6	10.9	15.1	628.2	495.0	555.8	595.4	24.9	5.6	7.0
Rad. 4	7.2	9.9	178.1	450.8	475.0	419.5	404.6	218.1	7.8	4.0
Rad. 5	11.4	14.5	633.8	844.3	679.7	623.5	641.0	595.3	24.5	6.3
Rad. 6	11.2	13.2	771.0	948.2	883.8	747.7	790.5	677.1	19.7	8.8
Rad. 7	8.5	11.1	25.2	832.3	1107.6	1031.4	893.3	141.4	9.7	8.0
Rad. 8	7.1	11.0	12.7	509.7	697.7	780.9	616.4	24.0	8.2	6.6
Rad. 9	7.0	8.9	9.7	12.5	11.9	10.6	8.9	7.6	7.8	5.7
Rad. 10	8.1	10.7	9.7	9.1	10.2	8.6	7.3	7.3	5.7	4.2

### Experimento No. 17 - Distribuciones de flujo estimadas



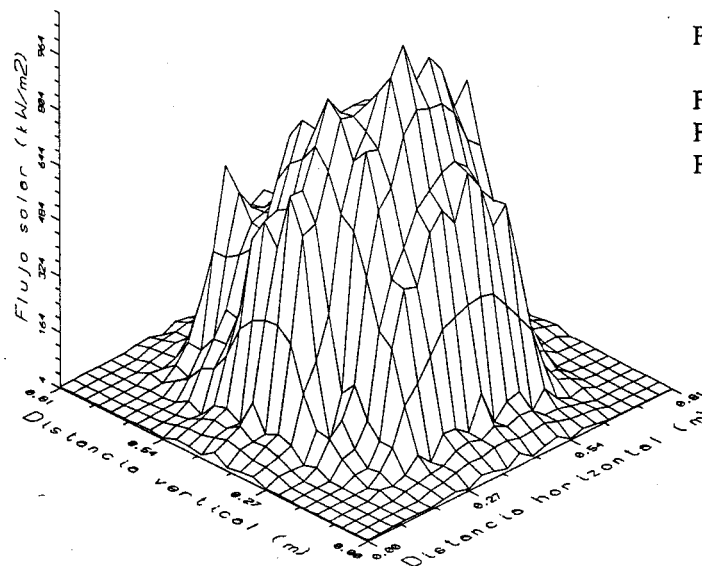
Potencia total: 209.1 kW

Flujo mínimo: 71.7 kW/m<sup>2</sup>

Flujo máximo: 437.2 kW/m<sup>2</sup>

Flujo medio: 297.5 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Potencia total: 166.7 kW

Flujo mínimo: 7.2 kW/m<sup>2</sup>

Flujo máximo: 1085.2 kW/m<sup>2</sup>

Flujo medio: 713.0 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 32 - Datos Básicos**

Fecha: 10/31/990

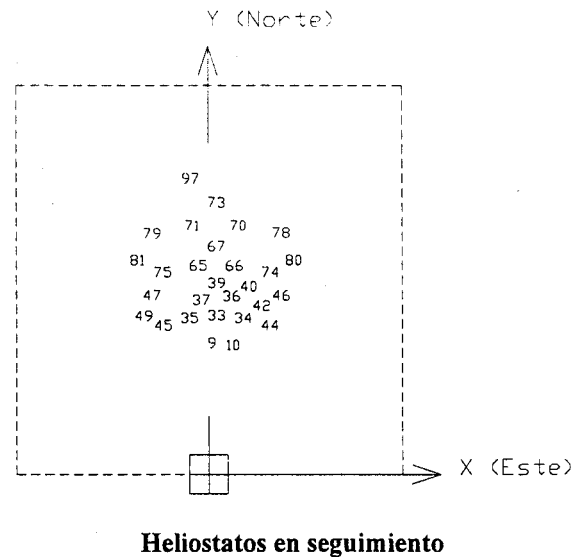
Hora Solar: 14:17

Irradiancia Directa: 920 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 85 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33

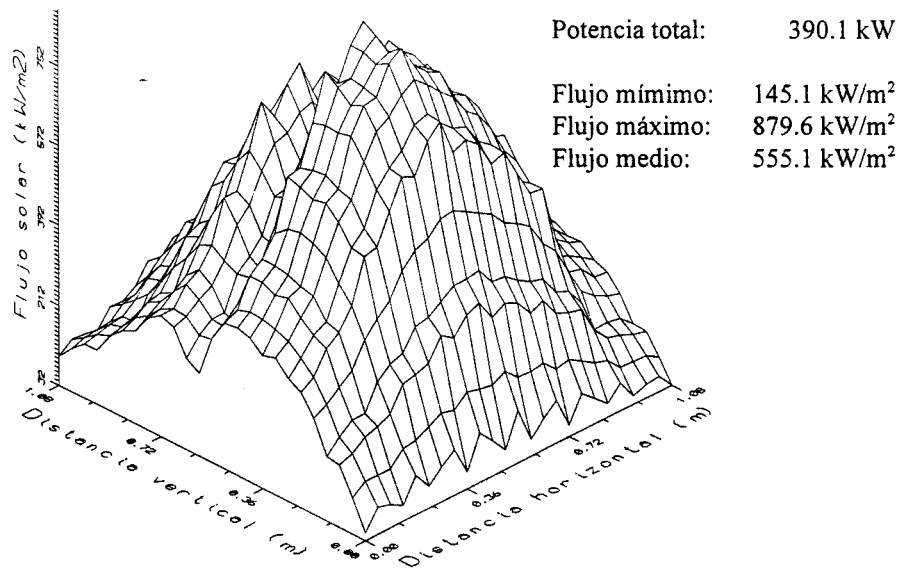
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Rad. 1	96.6	104.8	144.6	201.5	217.6	227.4	199.1	161.4	114.7	79.4
Rad. 2	149.8	165.7	235.3	321.7	341.9	344.5	306.0	247.1	166.9	116.9
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	304.8	365.4	506.5	669.4	730.1	677.3	583.5	483.9	292.1	223.6
Rad. 5	207.6	254.8	350.6	459.4	508.2	463.9	398.3	327.1	191.0	151.5
Rad. 6	360.0	470.2	638.9	828.1	916.9	834.5	725.7	592.4	325.6	273.0
Rad. 7	329.9	437.5	603.4	775.4	868.9	780.8	684.0	558.1	293.5	249.6
Rad. 8	291.3	383.4	540.7	669.9	766.1	682.9	608.3	495.3	250.3	214.3
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	48.7	57.6	72.7	69.0	62.1	56.4	57.2	54.2	43.7	31.5

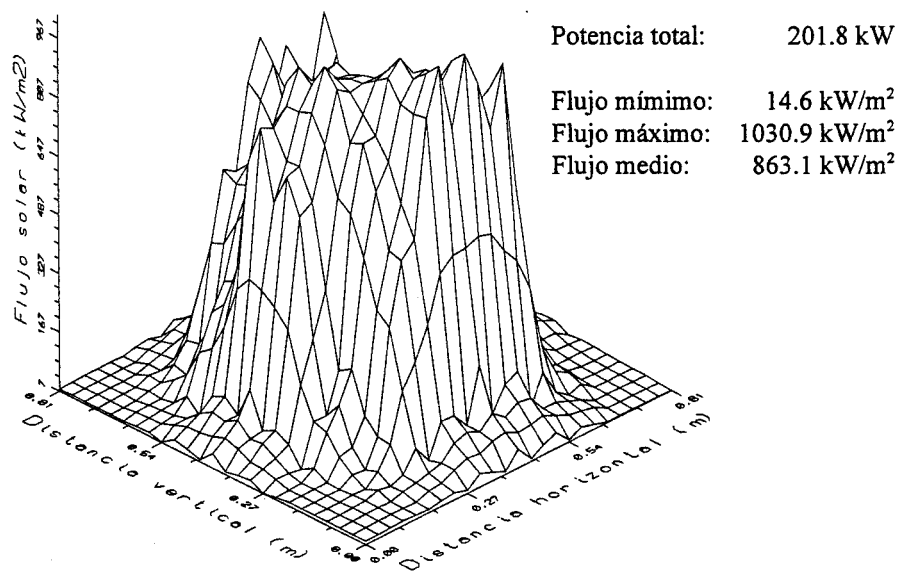
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Rad. 1	13.2	15.1	14.2	14.8	15.9	13.4	12.9	11.8	12.9	15.3
Rad. 2	13.9	16.7	18.6	24.1	30.4	30.4	25.5	18.0	14.5	17.2
Rad. 3	13.4	17.1	31.3	585.0	958.1	875.1	905.1	51.3	17.1	16.8
Rad. 4	9.0	14.5	292.2	531.1	621.0	507.1	461.6	250.2	18.6	14.8
Rad. 5	9.0	40.5	908.2	955.7	920.0	831.6	836.8	569.6	81.6	29.0
Rad. 6	11.2	25.3	787.0	993.7	904.8	805.6	810.0	693.9	116.6	27.1
Rad. 7	7.7	9.4	112.5	820.6	1008.2	887.9	857.3	112.8	22.9	17.7
Rad. 8	17.9	17.1	15.7	571.6	1134.2	1114.8	1010.6	27.9	18.2	19.0
Rad. 9	17.1	22.5	20.1	23.6	19.0	15.5	16.5	17.6	15.7	14.4
Rad. 10	16.5	18.6	16.0	15.2	10.5	9.7	12.6	9.4	9.1	7.0

### Experimento No. 32 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

Este fenómeno representa un difícil reto al intentar utilizar un concentrador secundario no reflector de imágenes para la luz reflejada de un campo de heliostatos. Las distribuciones tan irregulares que resultan cuando pocos heliostatos son dirigidos al concentrador es probable que produzcan unas tensiones térmicas inaceptables sobre cualquier receptor colocado detrás de la salida del concentrador. De hecho, en el caso particular del HCPC el cual ha sido comprobado, las distribuciones más altas de flujo imposibilitaron probar el concentrador junto con el receptor volumétrico de la ventana de cuarzo, ya que la ventana de cuarzo no podía soportar las tensiones asimétricas.

De esta forma, si los concentradores no reflectores de imágenes van a ser utilizados como concentradores secundarios, se tendrán que desarrollar estrategias innovadoras, las cuales enfatizan la importancia de los modelos computacionales en este campo.

## **5. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROGRAMA**

Los resultados experimentales obtenidos durante la prueba del concentrador secundario del HCPC han sido utilizados para comprobar en cierta manera/de alguna forma la validación del programa de ordenador para el análisis de energía de los sistemas concentradores de luz reflectante introducidos en el Capítulo 2.

Debido a la falta de información de diversos datos esenciales del sistema probado no es posible obtener una validación completa del programa basada sólo en los resultados experimentales. Como se desconocen la geometría real y las propiedades ópticas del concentrador secundario del HCPC así como la distribución de flujo direccional producida por el campo de Heliostato en la entrada de la apertura del concentrador, el número de parámetros a estimar en cualquier simulacro del conjunto hecho de Heliostatos en seguimiento y el HCPC es tan grande que es inútil hacer cualquier tipo de comparación detallada entre la información medida y las estimaciones del software.

Lo mejor que uno puede hacer en estas circunstancias es comprobar la coherencia del modelo de software, verificando que el comportamiento cualitativo pronosticado por el programa no difiere substancialmente del comportamiento observado en realidad.



Este tipo de comprobación cualitativa es la que se ha llevado a cabo. Lo que es importante en este tipo de verificación es comparar los modelos/patrones y no los valores reales: por lo tanto, no se ha realizado ningún esfuerzo para producir unas estimaciones numéricas absolutas. El sistema concentrador ha sido modelado y el programa ha sido puesto en marcha para obtener información sobre la “forma” de la distribución de flujo solar en la salida del concentrador secundario bajo distintas configuraciones del sistema concentrador (diferente grupo de Heliostatos en seguimiento, y diferente hora solar).

Para simular, usando el programa de análisis de energía, el sistema concentrador formado por el concentrador secundario y el grupo de Heliostatos SSPS-CRS dirigidos se utilizaron las siguientes técnicas:

Primero, se definió un modelo básico que consistía sólo de un Heliostato y un concentrador secundario. En este modelo el Heliostato jugaba el papel de la apertura de entrada (es decir, los rayos primarios trazados en el sistema concentrador “originados” en la superficie del Heliostato). La suposición hecha fue que la radiación en cualquier punto de las superficies de los Heliostatos puede ser definida como la radiación del sol en espiral con/replegada a/enrollada a una función que explica todos los errores ópticos y de seguimiento del Heliostato.

La distribución de la radiación fue además aproximada mediante una distribución de tipo rectangular “pill - box” de la forma:

$$L(r, \theta, \phi) = \begin{cases} L & \forall \theta \in [0, \theta_h] \\ 0 & \text{everywhere else} \end{cases} \quad (5 - 1)$$

donde  $L$  se tomó como la radiación real del sol multiplicada por la reflectividad del Heliostato, y  $\theta_h$  como 4.9 mrad.

Los rayos que obedecen la distribución de probabilidad asociada con esta radiación fueron generados para cualquier punto en el Heliostato usando dos derivadas  $R_\theta$  y  $R_\phi$  y calculando la dirección del rayo como:

$$\theta = \arcsin(\sin \theta_h \sqrt{R_\theta}) \quad (5 - 2)$$

$$\phi = 2\pi R_\phi \quad (5 - 3)$$

La constante se desvía/deriva, después, donde se ha calculado utilizando un generador de número al azar no congruente propuesto por Press et al. (1988).

El concentrador secundario fue modelado como un grupo compuesto de seis paredes reflectantes elípticas (las superficies de tipo espejo del concentrador) y una

superficie de control (superficie de reflectividad cero) colocada en la apertura de salida del concentrador y normal al eje del concentrador.

Se asumió que las superficies reflectantes del concentrador secundario estaban libres de cualquier error óptico (es decir, los rayos reflectados por ellas estaban calculados utilizando la Ley de Descartes ), y que todas tenían una reflectividad equivalente a/igual a 0.77.

A la superficie de control se le asignó las mismas dimensiones que al área barrida por la barra del HFD situada en la salida del concentrador, y dividida en elementos 10 x 10 de igual área. Una matriz de 10 x 10 elementos contenía la información de la distribución del número de rayos que llegaban a los diferentes elementos de la superficie.

Se realizó una ejecución de ordenador diferente para cada Heliostato y hora solar elegida. En cada ejecución, se “lanzaron” 10000 rayos primarios. Se determinó finalmente la “forma” del flujo solar en la salida del concentrador secundario para una combinación particular de hora solar y grupo de Heliostato añadiendo las matrices obtenidas, para esa hora solar en particular, para los distintos Heliostatos del grupo, y normalizando la matriz resultante con respecto al máximo número de rayos en un elemento de la matriz.

Se simularon cuatro configuraciones diferentes de esa forma, correspondiendo a las pruebas 2, 12, 17, y 32. En las próximas cuatro hojas se muestran las formas/configuraciones de flujo resultantes junto con las formas de flujo obtenidas de las mediciones. Hay una significativa concordancia entre las formas/configuraciones generales de estas distribuciones.

Test 02- Comparación de los resultados de las pruebas versus las estimaciones del software.

Flujo en la salida del concentrador (distancias en metros; flujo solar en  $\text{kW/m}^2$ ).

Estimación del software del flujo a la salida del concentrador (distancias en metros; flujo solar normalizado con respecto a su valor máximo).

Test 12- Comparación de los resultados de las pruebas versus las estimaciones del Software.

Flujo en la salida del concentrador (distancias en metros; flujo solar en  $\text{kW/m}^2$ ).

Estimación de software del flujo en la salida del concentrador (distancia en metros; flujo solar normalizado con respecto a su valor máximo).

Test 17- Comparación de los resultados de las pruebas versus las estimaciones de software.

Flujo en la salida del concentrador (distancias en metros; flujo solar en kW/m<sup>2</sup>).

Estimación de software del flujo en la salida del concentrador (distancias en metros; flujo solar normalizado con respecto a su valor máximo).

Test 32- Comparación de los resultados de las pruebas versus las estimaciones del software.

Flujo en la salida del concentrador (distancias en metros; flujo solar en kW/m<sup>2</sup>)

Estimación de software del flujo en la salida del concentrador (distancias en metros; flujo solar normalizado con respecto a su valor máximo).

## 6. CONCLUSIONES.

Se pueden sacar las siguientes conclusiones del trabajo presentado en esta tesis:

1. La concentración de radiación solar no es necesaria para alcanzar altas temperaturas o altas eficacias totales de conversión (luz a trabajo). En principio es posible alcanzar altas temperaturas sin concentrar la luz solar, siempre que la superficie del absorbedor tenga unas propiedades ópticas fuertemente anisotrópicas.
2. Para otro tipo de funcionamiento de superficies a altas temperaturas se necesita una alta concentración. En el caso importante de los sistemas de recepción centrales estas altas temperaturas implican el uso de concentradores secundarios.
3. Se ha propuesto un programa- o más bien, el meollo del programa- que posibilita analizar sistemas de concentración de geometría arbitraria.
4. Ya que este programa maneja la multireflexión es especialmente útil en el análisis de concentradores secundarios en configuraciones reales del receptor central, con unos tipos y colocación de helióstatos arbitrarios.
5. El programa permite a su eventual/posible usuario "hacerlo a medida" con una facilidad relativa según las necesidades específicas del usuario. Normalmente, esto se logra con sólo añadir módulos nuevos, es decir, sin necesidad de reprogramar las rutinas existentes.
6. Se diseñó, construyó e instaló un concentrador secundario en la planta CRS en España.

7. Se realizaron varias docenas de pruebas utilizando este concentrador.
8. Las pruebas indicaron algunos problemas relacionados con las tensiones causadas por distribuciones máximas muy fuertes.
9. Se encontró/alcanzó un acuerdo cualitativo aproximado entre los resultados de las pruebas y los cálculos del ordenador.
10. En particular, los problemáticos fuertes flujos con los que se encontró al funcionar con pocos helióstatos fueron cualitativamente pronosticados por el modelo.
11. Se halló/alcanzó un acuerdo cualitativo en todos los casos, y en particular en las configuraciones de helióstatos muy asimétricas.
12. La prueba demostró la necesidad de desarrollar/crear algún tipo de procedimiento funcional para dirigir la estrategia, diseñado para evitar o mitigar los posibles efectos perjudiciales de las distribuciones de flujo muy asimétricas producidas en la salida del concentrador.

Los retos que se han encontrado aquí, y el entendimiento de donde se encuentran las verdaderas limitaciones de las geometrías no concentradas, parecen indicar que el esfuerzo de hacer a la medida las propiedades ópticas de las superficies del colector ha merecido la pena. En particular, algunas de las ventajas conseguidas con los concentradores pueden ser obtenidas con superficies con una absorción angular máxima/más fuerte en la dirección del vector del sol.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

1. Ammannsberger, K., and Wiedmann, U. 1980. *System Optimization and Operational Simulation of Solar Farm Plants Applied to a Plant with Diesel Waste Heat Utilization*. En Conference Proceedings Systemes Solaires Thermodynamiques, p. 137, Marsella (Francia).
2. Ammannsberger, K. And Bittner, I. 1982. *System Optimization, Simulation and Comparison with First Experimental Results of Solar Thermal Plants (Distributed Collector Systems)*. En Proceedings of ASME Winter Annual Meeting, Phoenix/AZ. American Society of Mechanical Engineers, New York (USA).
3. Maynard, D.P., and Gajana, B.C. 1980. *Analytical Foundation / Computer Model for Dish-Brayton Power System*. JPL 5105-9, Pasadena/CA. Jet Propulsion Laboratory (USA).
4. Dellin, T., Fisk, M.J., and Yang, C.L. 1981. *A User's Manual for DELSOL2 - A Computer Code for Calculating the Optical System Design for Central Receiver Plants*. SAND81-837, Sandia National Laboratories, Livermore/CA (USA).
5. Vittitoe, C.N., Biggs, F., and Lighthill, R.E. 1978. *HELIOS: A computer code for Modeling the Solar Thermal Test Facility-A user's Guide*. SAND76-0346. Sandia National Laboratories, Albuquerque/NM.



6. Vittitoe, C.N., and Biggs, F. 1981. *A User's Guide to HELIOS-A Computer Program for Modeling the Optical Behavior of Reflecting Solar Concentrators, Appendices Concerning HELIOS - Code Details*. SAND81-1562 (Part III) and SAND84-1180 (Part I). Sandia National Laboratories, Albuquerque/NM.
7. Kiera, M. 1986. *Description of the Computing Code System HFCAL* (in German). GAST-AIS-BT-200000-075, Bergish-Gladbach, Interatom GmbH.
8. Lipps, F.W., And Vant-Hull, L.I. 1978. *A Cellwise method for the optimization of large central receiver systems*. Solar Energy, Volume 20, pp. 505-516.
9. Pitman, C.L., and Vant-Hull, L.L. 1989. *The University of Houston Solar Central Receiver Code System: Concepts, Updates and Start-up Kits*. SAND88-7029, Houston/TX, University of Houston.
10. Laurence, C.L., and Lipps, F.W.: 1980. *A User's Manual for the University of Houston Computer Code - RC. Cellwise Option for the Central Receiver Project*. SAND/0763-3, Houston/TX, University of Houston.
11. Bosnjakovic, F. 1979. *Solar collectors as energy converters. Studies in Heat Transfer*. Hemisphere Publishing Corporation.
12. Jeter, S.M. 1981. *Maximum conversion efficiency for the utilization of direct solar radiation*. Solar Energy, Volume 26, pp. 231-236.

13. Gómez, C., and Ruiz, V. 1982. *Energía de la radiación del cuerpo negro.. Aplicación. Su captación.* I Congreso ibérico de Energía Solar.
14. Kabelac, S. 1991. *A new look at the maximum conversion efficiency of black-body radiation.* Solar energy, Volume 46, pp. 231-236
15. Labelac, S. and Drake, F.D. 1992. *The entropy of terrestrial solar radiation.* Solar Energy, Volumen 48, pp. 239-248.
16. Gómez, C. 1986. *Caracterización exergética de la conversión fototérmica. Aplicación a la geometría y al funcionamiento de concentradores solares cilindroparabólicos.* Doctoral Dissertation. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos, Madrid.
17. Rabl, A. 1985. *Active solar collectors and their applications.* Oxford University Press, New York.
18. Modest, M.F. 1993. *Radiative heat transfer.* McGraw-Hill, Inc., New York
19. Winter, C.J., Sizmann, R.L. and Vant-Hull, L.L. 1991. *Solar Power Plants. Fundamental. Technology. System Economics.* Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, pp. 263-270.

20. Boyd, R.W. 1983. *Radiometry and the Detection of Optical Radiation*. John Wiley & Sons, New York, pp. 14-17.
21. ISO 31/6-1980. *Quantities and units of light and related electromagnetic radiations*. Units of measurement. ISO standard Handbook. Volume 2, pp. 109-121,1982.
22. Hollands, K.G.T. 1963. *Directional Selectivity, emittance, and absorptance properties of vee corrugated specular surfaces*. Solar Energy, Volume 7, pp. 282-283.
23. Perlmutter, M. and Howell, J.R. 1963. *A strongly directional emitting and absorbing surface*. ASME Journal of Heat Transfer, Volume 85, pp. 282-283.
24. Welford, W.T., and Winston, R. 1978. *The optics of nonimaging concentrators. Light and solar energy*. Academic Press, New York.
25. Braun, G.G. 1979. *DOE solar thermal power systems programs. Solar Industrial Heat Conference Proceedings*. October 31- November 2, 1979, San Francisco. SERI/TP-333-429, pp.2.
26. Howell, J., Bannerot,R.B., and Vliet, G.C. 1982. *Solar-thermal energy systems*. McGraw-Hill, Inc., New York.

- 
27. Duffie, J.A., and Beckman, W.A. 1981. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons. New York
28. Winston, R. 1970. *Light collection within the framework of geometrical optics*. Journal of the Optical Society of America, Volume 60, pp. 245-247.
29. Goetzberger, A., Wittwer, V., Heidler, K., Stahl, W., Wilson, H.R., and Zastrow, A. 1983. *Solarenergieumwandlung auf der Basis von Fluoreszenzkollektoren*. Statusseminar sonnenergie 1983. BMFT Bonn.
30. Batchelder, J.S., Zewail, H., and Cole, T. (1979). *Luminiscent solar concentrators. 1: Theory of operation and techniques for performance evaluation*. Applied Optics, Volume 18, pp. 3090-3110.
31. Winston, R. 1974. *Principles of solar concentrators of a novel design*. Solar energy, Volume 16, pp. 85-95.
32. Winston, R., and Hinterberger, H. 1975. *Principles of cylindrical concentrators for solar energy*. Solar energy, Volume 17, pp. 255-258.
33. Rabl, A., and Winston, R. 1976. *Ideal concentrators for finite sources and restricted exit angles*. Applied Optics, Volume 15, pp. 255-258.

34. Hottel, H., and Sarofin, A.F. 1976. *Radiative transfer*. McGraw-Hill, Inc., New York.
35. Gurnee, E.F. 1977. *Comparison of elliptic and parabolic nonimaging concentrators*. Solar Energy, Volume 19, pp. 323-324.
36. Winston, R., and Welford, W.T. 1980. *Design of nonimaging concentrators as second stages in tandem with imaging-forming first-stage concentrators*. Applied Optics, Volume 19, pp. 347-351.
37. Blanco, m. 1988. *Optical analysis of secondary solar concentrators*. Master's Thesis. University of Lowell, pp. 46-86.
38. Born, M., and Wolf, E. 1980. Principles of Optics. *Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Sixth Edition. Pergamon Press, pp. 120-124.
39. Martin J.G., and Blanco, m. 1988. *Radiation heat transfer*. In Hand Book of Applied Thermal Desing, Part 1, Chapter 6. Eric Guyer (Ed.). McGraw-Hill Book Company, Washington, pp. 85-101.
40. Levi, L. 1968. *Applied Optics*. A guide to optical system esign/ Volume 1. John Wiley & Sons, New York, pp. 58—72

41. Korsch, d. 1991. *Reflective Optics*. Academic Press, pp. 7-4.
42. Siegel, R., and Howell, J.R. 1981. *Thermal radiation heat transfer. Second Edition*. Hemisphere Publishing Corporation. Washington, pp. 365-270
43. Kalo, M.H., and whitlock, P.A. 1986. *Monte Carlo Methods. Volume I. basics*. Wiley-Interscience, John Wiley & Son, new York, pp. 40-86.
44. Arvo, J., and kirk, D. 1989. *A survey of Ray Tracing, acceleration techniques*. In *An Introduction to Ray Tracing Glassner (Ed.)*, Chapter 6. Academic Press, San Diego, pp. 46-86.
45. Pritzcow, w. 1990. *Pressure loaded volumetric ceramic receiver*. Institute for Structures and Desing DLR. Pfaffenwaldring 38/40. D-7000 Stuttgart 80.
46. Grasse, W. 1995. *SSPS results of test and operation 1981-1984*. IEA-SSPS Operating Agent DFVLR, Cologne, Germany.
47. Van Wijk, J. 1978. *Ray tracing objects defined by sweeping planar cubic splines*. Delft University of Technology. ACM Transactions on Graphics.

- 
48. Blanco, M., And Silva, M. 1986. *Evaluation and qualification of the HFD bar measurements during the ASR high flux experiment*. Proceedings of the Third Internacional Workshop on Solar Thermal Receiver Systems, Volume 1: design, construction and Operation, Springer-Verlag, Constanz (Germany).

## **ANEXO A**

**PRUEBA DE QUE  $f(\lambda)$  TIENE A LO SUMO UN CERO EN  
EL INTERVALO  $(0, +\infty)$**



Se desea probar que la función  $f(\lambda)$  definida como:

$$f(\lambda) = M_{bb,\lambda}(T_s, \lambda) + (p-1) M_{bb,\lambda}(T_a, \lambda) - p M_{bb,\lambda}(T_{abs}, \lambda) \quad (A - 1)$$

donde

$$M_{bb,\lambda}(T, \lambda) = \frac{c_1 n^{-2} \lambda^{-5}}{\frac{c_2}{e^{nT\lambda}} - 1} \quad (A - 2)$$

y

$$p = \frac{\Omega_v}{\Omega_s} \quad (A - 3)$$

tiene a lo máximo un cero dentro del intervalo de longitudes de onda  $(0, +\infty)$ , supuesto que se verifican las siguientes desigualdades:

$$T_s > T_{abs} \geq T_a \quad (A - 4)$$

$$p \geq 1 \quad (A - 5)$$

Usando la Ecuación A - 2 la función  $f(\lambda)$  puede escribirse en la forma:

$$f(x) = c_1 n^{-2} x^5 \left[ \frac{1}{e^{ax} - 1} + \frac{p-1}{e^{ax} - 1} - \frac{p}{e^{bx} - 1} \right] \quad (\text{A - 6})$$

donde se han introducido los parámetros:

$$a = \frac{c_2}{n T_a}; \quad b = \frac{c_2}{n T_{abs}}; \quad c = \frac{c_2}{n T_s} \quad (\text{A - 7})$$

y la nueva variable:

$$x = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{A - 8})$$

Cuando  $\lambda$  va de cero a infinito,  $x$  va de infinito a cero, por lo que la relación funcional expresada por la Ecuación A - 8 el intervalo abierto de longitudes de onda  $(0, +\infty)$  en el intervalo abierto  $(+\infty, 0)$  de valores de  $x$ . Probar que  $f(\lambda)$  tiene a lo sumo un cero dentro del intervalo  $(0, +\infty)$  cuando se verifican las desigualdades A - 4 y A - 5 es equivalente a probar que  $f(x)$  tiene a lo sumo un cero dentro del intervalo  $(0, +\infty)$  cuando se verifican las siguientes desigualdades:

$$a \geq b > c > 0 \quad (\text{A - 9})$$

y

$$p \geq 1 \quad (\text{A - 10})$$

Para el propósito que se persigue conviene expresar  $f(x)$  como:

$$f(x) = g(x) [h(x) - p] \quad (\text{A - 11})$$

donde

$$g(x) = c_1 n^{-2} x^5 \frac{(e^{ax} - e^{bx})}{(e^{ax} - 1)(e^{bx} - 1)} \quad (\text{A - 12})$$

y

$$h(x) = \frac{(e^{bx} - 1)(e^{ax} - e^{cx})}{(e^{cx} - 1)(e^{ax} - e^{bx})} \quad (\text{A - 13})$$

Puesto que  $g(x)$  y  $h(x)$  son siempre positivas en el intervalo abierto  $(0, +\infty)$ , los ceros de  $f(x)$  en dicho intervalo se corresponden con los valores de  $x$  para los cuales  $h(x)$  es igual a  $p$ . Basta, por tanto, con demostrar que para valores positivos de  $x$  la ecuación :

$$h(x) = p \quad (\text{A - 14})$$

tiene a lo sumo una solución real. Esta demostración se llevará a cabo probando que, para valores positivos de  $x$ ,  $h(x)$  es positiva y monótona creciente.

De la Ecuación A - 13 y de las condiciones expresadas para  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $p$ , se sigue que  $h(x)$  es mayor que la unidad para todo  $x$  mayor que cero. De hecho, aplicando dos veces la regla de L'Hospital se obtiene que el límite de  $h(x)$  cuando  $x$  tiende a cero es:

$$\lim_{x \rightarrow 0} h(x) = \frac{ab-bc}{ac-bc} > 1 \quad (\text{A - 15})$$

lo que prueba que  $h(x)$  es positiva para valores positivos de  $x$ .

La derivada de  $h(x)$  es:

$$\frac{dh(x)}{dx} = \frac{e^{ax}[(a+b)e^{bx} - a] - e^{cx}[(b+c)e^{bx} - c]}{e^{ax}[(a+c)e^{cx} - a] - e^{bx}[(b+c)e^{cx} - b]} \quad (\text{A - 16})$$

Definiendo:

$$\text{num}(x) = e^{ax}[(a+b)e^{bx} - a] - e^{bx}[(b+c)e^{bx} - c] \quad (\text{A - 17})$$

$$\text{den}(x) = e^{ax}[(a+c)e^{cx} - a] - e^{bx}[(b+c)e^{cx} - b] \quad (\text{A - 18})$$

se tiene que:

$$\frac{dh(x)}{dx} = \frac{num(x)}{den(x)} \quad (A - 19)$$

Que  $num(x)$  es positiva para valores positivos de  $x$  se sigue de la veracidad de las siguientes desigualdades:

$$e^{ax} > e^{cx} > 0 \quad (A - 20)$$

$$[(a + b)e^{bx} - a] > b > 0 \quad \forall x > 0 \quad (A - 21)$$

$$[(b + c)e^{bx} - c] > b > 0 \quad \forall x > 0 \quad (A - 22)$$

$$[(a + b)e^{bx} - a] - [(b + c)e^{bx} - c] > 0 \quad \forall x > 0 \quad (A - 23)$$

De forma similar, que  $den(x)$  es positiva para valores positivos de  $x$  se sigue de la veracidad de las siguientes desigualdades

$$e^{ax} \geq e^{bx} > 0 \quad (A - 24)$$

$$[(a + c)e^{cx} - a] > c > 0 \quad \forall x > 0 \quad (A - 25)$$

$$[(b + c)e^{cx} - b] > c > 0 \quad \forall x > 0 \quad (A - 26)$$

$$[(a + c)e^{cx} - a] - [(b + c)e^{cx} - b] > 0 \quad \forall x > 0 \quad (\text{A - 27})$$

Si se resta la Ecuación A - 18 de la A - 17, después de algunas transformaciones se obtiene;

$$\text{num}(x) - \text{den}(x) = e^{bx}[(a + b)e^{ax} - b] - e^{cx}[(a + c)e^{ax} - c] \quad (\text{A - 28})$$

Que esta expresión es positiva para valores positivos de  $x$  se sigue de la veracidad de las siguientes desigualdades

$$e^{bx} > e^{cx} > 0 \quad (\text{A - 29})$$

$$[(a + b)e^{ax} - b] > a > 0 \quad \forall x > 0 \quad (\text{A - 30})$$

$$[(a + c)e^{ax} - c] > a > 0 \quad \forall x > 0 \quad (\text{A - 31})$$

$$[(a + b)e^{ax} - b] - [(a + c)e^{ax} - c] > 0 \quad \forall x > 0 \quad (\text{A - 32})$$

Las consideraciones anteriores prueban que en el intervalo abierto  $(0, +\infty)$  la derivada de  $h(x)$  respecto a  $x$  es siempre positiva, lo que demuestra que  $h(x)$  es monótona creciente en dicho intervalo.

Puesto que, de acuerdo con la Ecuación A - 15,

$$h(0) = \frac{ab - bc}{ac - bc} > 1 \quad (\text{A - 33})$$

la Ecuación A - 14 una solución real en el intervalo abierto  $(0, +\infty)$ , si y sólo si:

$$p > \frac{ab - bc}{ac - bc} \quad (\text{A - 34})$$

En estos casos, dado el carácter trascendente la ecuación

$$h(x) - p = 0 \quad (\text{A - 35})$$

la solución tendrá que determinarse por métodos numéricos. Para facilitar los cálculos, es conveniente acotar el intervalo en el que puede encontrarse la solución. Un límite superior a dicho intervalo puede obtenerse si se expresa la Ecuación A - 35 en la forma:

$$h_1(x) + h_2(x) = 0 \quad (\text{A - 36})$$

donde

$$h_1(x) = e^{ax} + (p - 1)[e^{(b+c)x} + e^{ax}] + p[e^{(a+b)x} - e^{bx}] \quad (\text{A - 37})$$

y

$$h_2(x) = e^{(a+b)x} - 2pe^{(a+c)x} \quad (\text{A - 38})$$

Puesto que  $h_1(x)$  es positiva para todo valor positivo de  $x$ , se sigue que el cero de  $h_2(x)$ , es decir la solución a la ecuación:

$$e^{(a+b)x} - 2pe^{(a+c)x} = 0 \quad (\text{A - 39})$$

constituye el límite superior buscado. Esta solución y, por tanto, este límite es:

$$x_0 = \frac{\ln(2p)}{b-c} \quad (\text{A - 40})$$

En resumen, de acuerdo con las definiciones de  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $p$ , se ha demostrado que  $f(\lambda)$  tendrá un cero en el intervalo abierto  $(0, +\infty)$  si y sólo si:

$$p = \frac{\Omega_v}{\Omega_s} < \frac{T_s - T_a}{T_{abs} - T_a} \quad (\text{A - 41})$$

de lo contrario no tendrá ningún cero en dicho intervalo.



También se ha demostrado que si  $\lambda_c$  es un cero positivo de  $f(\lambda)$ , entonces ha de verificar la siguiente desigualdad:

$$\lambda_c > \frac{c_2 \left( \frac{1}{T_{abs}} - \frac{1}{T_s} \right)}{n \ln \left( \frac{\Omega_v}{\Omega_s} \right)} \quad (\text{A - 42})$$

**ANEXO B**  
**RESULTADOS EXPERIMENTALES**

**Experimento No. 01 - Datos Básicos**

Fecha: 10/15/990

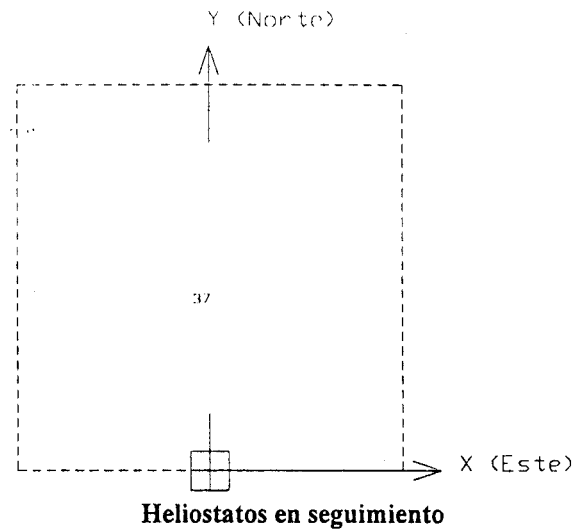
Hora Solar: 12:11

Irradiancia Directa: 945 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 87 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.06, 1.52, 42.77



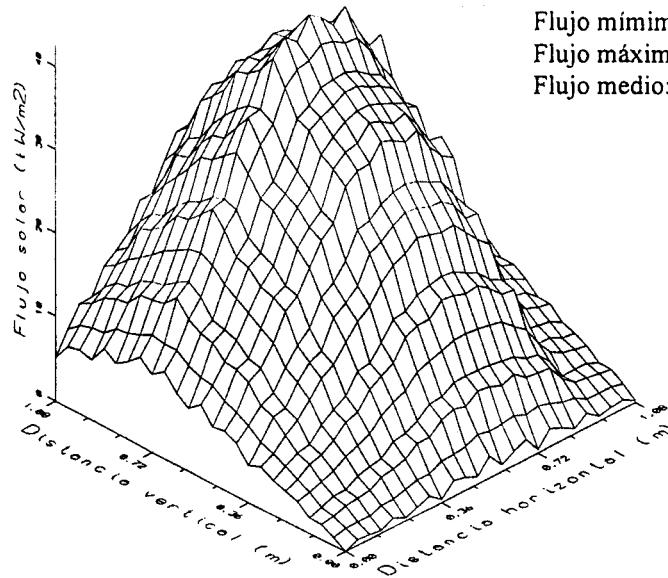
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	5.2	10.0	14.3	19.2	25.0	26.0	24.7	21.3	6.6	5.4
Rad. 2	6.8	13.5	19.4	25.6	32.8	34.2	32.5	28.6	9.3	8.0
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	9.1	18.0	25.7	34.0	42.0	43.2	41.6	37.2	13.9	12.0
Rad. 5	7.1	14.2	20.5	27.1	34.0	35.7	34.2	30.6	11.6	10.2
Rad. 6	6.5	12.4	18.4	24.6	31.7	33.8	32.6	28.8	10.4	9.2
Rad. 7	4.5	8.8	12.8	17.6	22.8	25.0	24.1	20.9	7.5	6.8
Rad. 8	3.7	5.7	8.1	11.2	15.1	16.9	16.3	14.1	5.2	4.7
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	0.2	0.4	0.4	0.6	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	0.4

**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	0.2	0.8	0.5	1.0	1.0	1.8	1.6	1.6	0.2	0.8
Rad. 2	1.5	0.8	1.9	1.3	1.9	2.1	1.9	2.1	1.0	1.0
Rad. 3	0.8	1.4	1.9	100.6	94.7	109.6	118.5	7.0	3.3	1.1
Rad. 4	1.1	1.4	1.7	37.3	35.6	44.0	73.5	49.9	4.3	2.6
Rad. 5	1.8	2.4	62.3	33.2	34.7	41.7	78.0	75.9	3.6	3.3
Rad. 6	1.7	1.4	31.5	32.7	33.0	40.1	85.3	92.4	5.6	2.6
Rad. 7	1.4	2.0	1.7	53.8	54.9	86.5	68.1	43.2	2.2	1.4
Rad. 8	0.2	0.2	1.1	21.8	34.0	37.8	31.7	3.8	2.2	1.1
Rad. 9	0.2	-0.2	0.8	1.0	1.0	0.8	0.8	1.0	0.8	0.2
Rad. 10	-0.2	1.4	1.4	0.5	1.4	0.5	0.2	0.7	-0.2	-0.2

Experimento No. 01 - Distribuciones de flujo estimadas



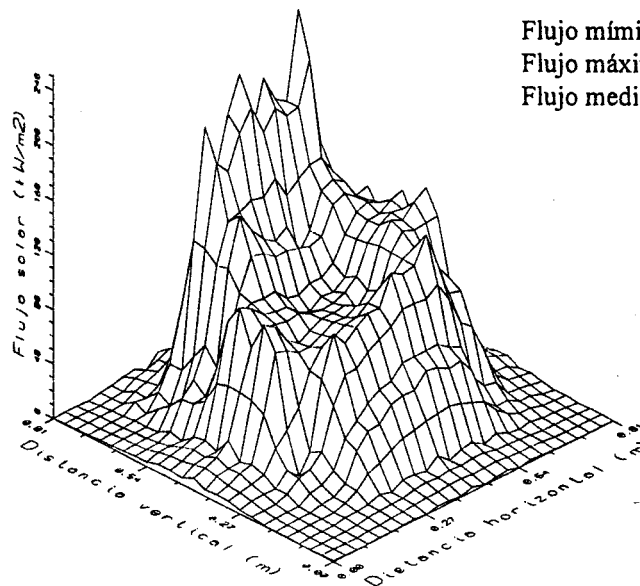
Potencia total: 17 kW

Flujo mínimo: 2.7 kW/m<sup>2</sup>

Flujo máximo: 47.7 kW/m<sup>2</sup>

Flujo medio: 24.2 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Potencia total: 15 kW

Flujo mínimo: 0.3 kW/m<sup>2</sup>

Flujo máximo: 110.9 kW/m<sup>2</sup>

Flujo medio: 63.7 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 02 - Datos Básicos**

Fecha: 10/15/990

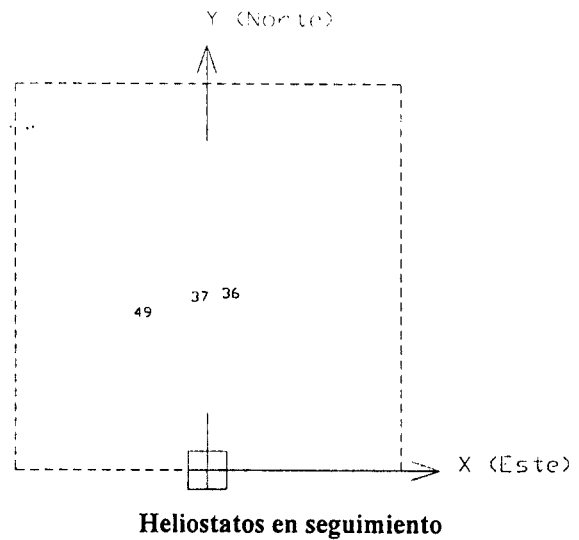
Hora Solar: 12:18

Irradiancia Directa: 932 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 87 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.06, 1.52, 42.77



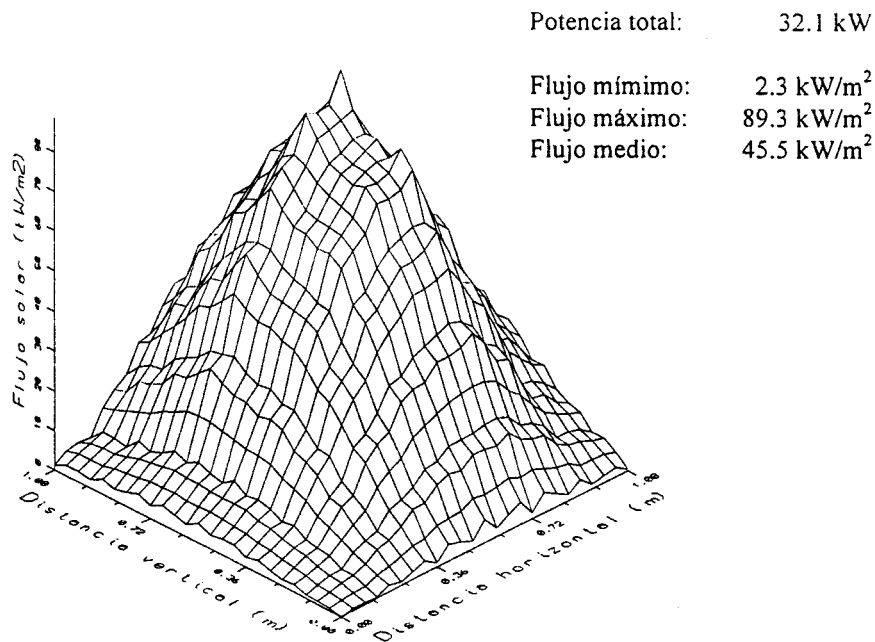
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	1.4	3.2	12.9	22.5	31.4	37.1	40.5	26.2	17.1	12.1
Rad. 2	2.1	5.0	19.4	34.0	47.1	55.5	60.3	41.6	27.5	18.9
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	3.5	9.1	31.2	54.5	72.4	83.7	89.3	65.7	43.8	29.8
Rad. 5	3.0	7.8	26.7	47.3	62.6	71.7	76.6	56.8	36.6	24.7
Rad. 6	3.5	8.3	25.6	46.2	62.8	72.6	77.9	56.6	34.3	22.8
Rad. 7	2.6	6.5	19.0	35.0	48.4	55.9	60.2	43.3	24.4	16.1
Rad. 8	1.5	4.5	12.5	23.6	33.3	37.3	40.2	29.2	15.1	9.6
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	0.2	0.3	0.8	1.2	1.5	1.7	1.7	1.3	0.9	0.6

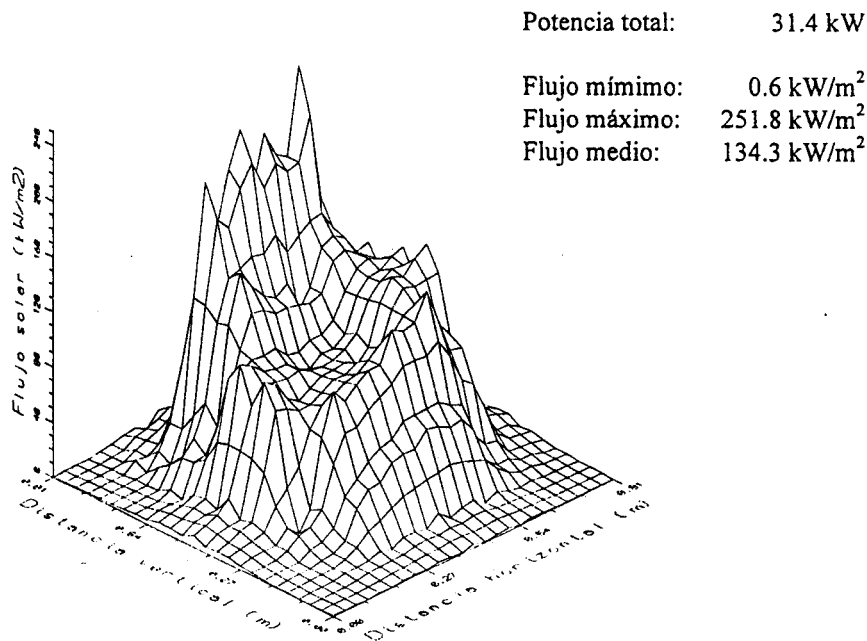
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	0.2	0.2	3.2	2.1	2.4	2.4	2.6	2.1	0.8	2.1
Rad. 2	1.6	1.9	4.3	4.1	3.8	3.0	4.1	3.2	4.3	1.9
Rad. 3	2.2	2.8	3.9	214.4	251.4	234.3	269.6	17.1	5.8	2.2
Rad. 4	3.5	4.0	26.8	149.4	115.3	94.6	142.1	129.6	9.6	5.2
Rad. 5	4.5	5.1	118.5	91.6	76.8	82.5	125.2	143.7	7.5	6.0
Rad. 6	4.7	6.2	114.8	75.6	86.8	77.9	135.2	158.5	9.7	5.6
Rad. 7	3.1	4.8	3.1	97.3	100.8	123.4	136.0	84.4	6.0	4.0
Rad. 8	0.2	1.1	3.0	40.0	53.6	64.1	57.5	6.9	4.4	1.3
Rad. 9	0.2	0.5	2.1	2.1	2.1	1.9	2.1	1.6	1.9	0.5
Rad. 10	1.4	0.2	0.5	0.5	1.0	0.5	0.5	0.7	0.2	0.2

**Experimento No. 02 - Distribuciones de flujo estimadas**



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 03 - Datos Básicos**

Fecha: 10/15/990

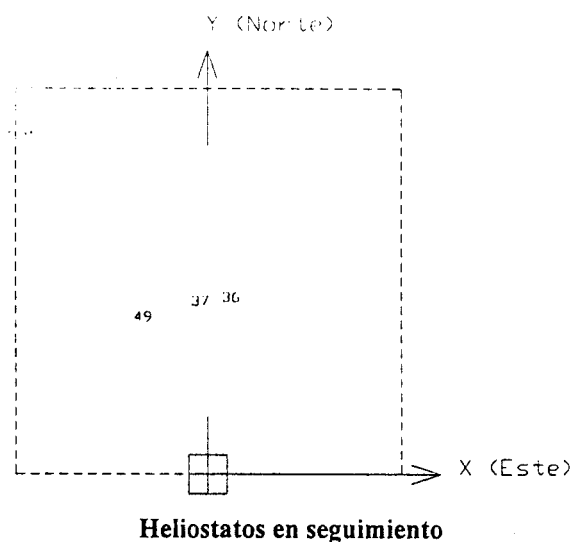
Hora Solar: 12:26

Irradiancia Directa: 945 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 87 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.06, 1.52, 42.77



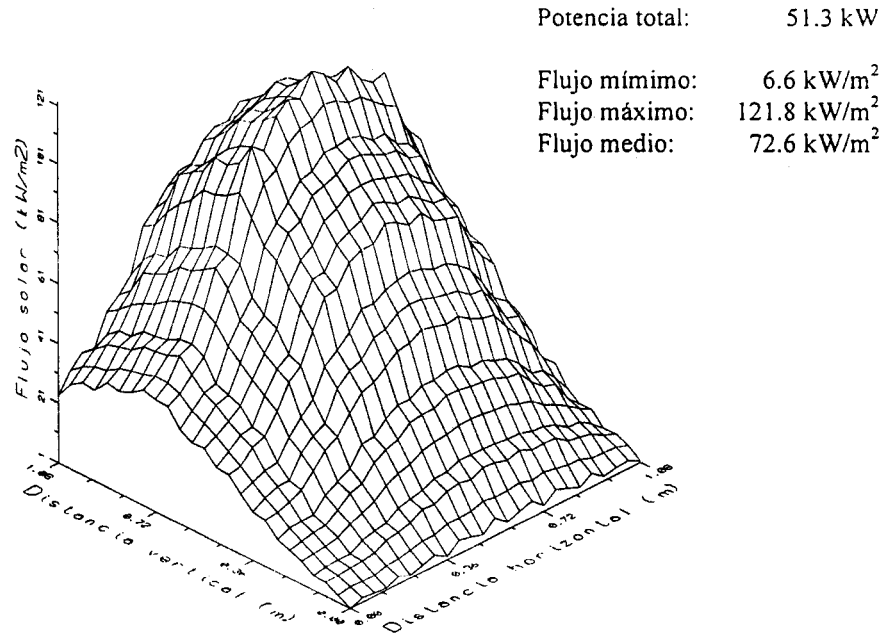
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	22.8	31.8	45.9	68.6	76.2	81.3	77.5	72.9	53.9	28.1
Rad. 2	30.3	42.1	59.7	87.7	97.3	103.0	98.3	93.1	70.4	37.7
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	38.3	50.6	72.7	106.5	117.2	123.2	117.4	110.9	85.8	45.2
Rad. 5	29.5	38.4	56.2	83.7	92.5	97.8	93.2	87.6	66.3	34.2
Rad. 6	25.5	32.2	48.5	72.6	81.8	87.8	83.4	78.1	58.1	28.1
Rad. 7	17.0	20.9	32.0	47.8	55.4	59.8	56.8	52.4	38.5	17.2
Rad. 8	10.1	11.8	19.2	27.5	32.9	35.5	33.8	31.1	21.9	9.3
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	0.5	0.8	1.1	1.7	2.3	2.4	2.4	2.0	1.5	0.9

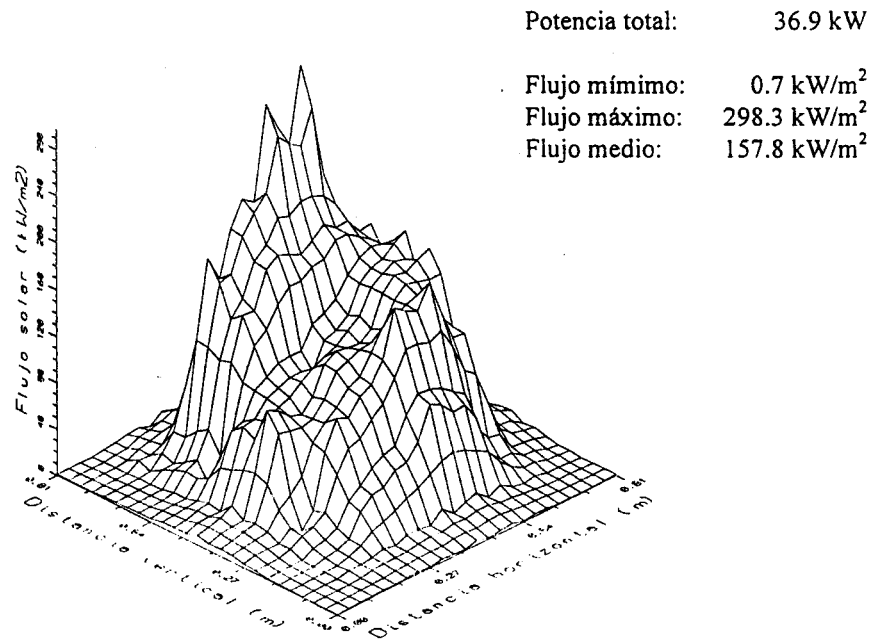
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	1.0	0.5	3.2	2.4	2.4	3.5	3.5	3.2	1.3	0.8
Rad. 2	1.0	1.3	5.4	4.9	4.9	5.7	5.4	4.3	4.3	1.3
Rad. 3	2.5	2.8	5.8	182.7	222.8	308.0	317.0	106.5	7.5	3.6
Rad. 4	3.5	4.3	3.7	138.6	175.7	162.6	171.9	166.4	11.6	6.4
Rad. 5	5.1	5.4	77.4	90.7	84.7	112.8	153.3	182.1	12.1	7.8
Rad. 6	5.9	6.7	108.6	76.7	120.7	111.9	158.2	178.9	14.4	6.7
Rad. 7	3.7	5.4	4.5	90.2	103.9	164.7	166.4	111.7	8.3	4.8
Rad. 8	0.2	0.8	4.6	40.0	51.1	98.6	78.5	10.2	5.5	1.1
Rad. 9	0.2	0.5	2.9	2.9	2.7	2.9	4.0	2.1	2.1	0.2
Rad. 10	0.2	1.4	1.0	1.3	1.0	0.7	0.7	1.0	0.2	1.4

Experimento No. 03 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



**Experimento No. 04 - Datos Básicos**

Fecha: 10/15/990

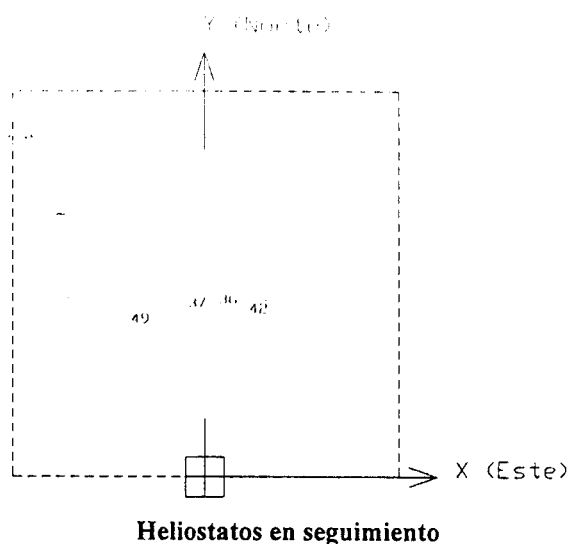
Hora Solar: 12:35

Irradiancia Directa: 932 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 87 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.06, 1.52, 42.77



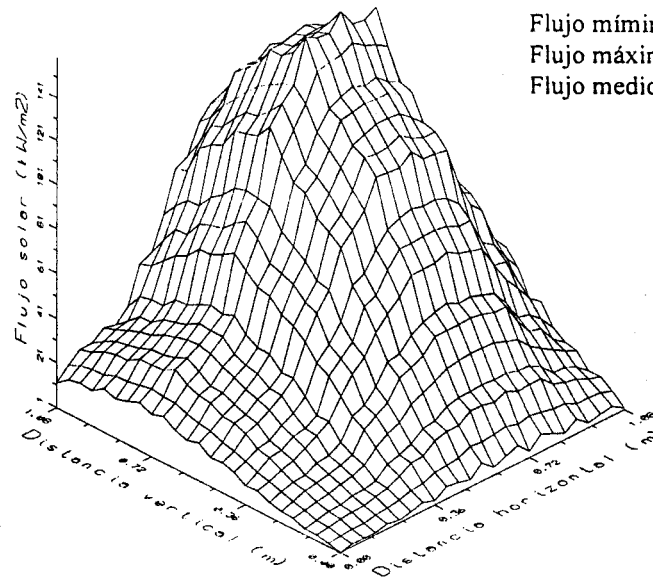
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	11.4	20.9	23.4	48.4	82.7	103.0	103.9	102.1	69.4	39.8
Rad. 2	15.7	28.6	32.7	64.4	106.1	130.3	132.0	129.6	90.4	53.1
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	19.7	36.9	43.4	84.4	131.2	158.6	160.3	157.3	109.8	65.7
Rad. 5	15.6	29.1	34.9	69.0	103.8	126.4	126.7	124.9	85.9	51.3
Rad. 6	13.4	25.3	30.2	62.3	93.1	115.1	115.7	112.5	75.1	44.2
Rad. 7	9.1	17.0	21.1	44.5	65.1	80.8	80.6	77.8	50.7	28.8
Rad. 8	5.6	10.3	12.7	27.5	40.6	50.3	50.1	48.1	29.7	16.6
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad.10	0.6	1.3	1.5	2.4	3.2	3.4	3.4	2.8	2.0	1.3

**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	1.3	1.3	3.7	4.0	3.7	5.3	5.1	5.1	1.3	1.3
Rad. 2	1.3	1.6	7.9	7.4	7.4	7.4	7.4	8.2	5.7	2.1
Rad. 3	3.6	4.2	9.2	275.0	299.6	362.7	349.5	10.3	10.6	4.4
Rad. 4	6.7	7.5	7.5	228.6	267.1	198.2	192.4	115.6	14.8	8.7
Rad. 5	8.1	8.7	106.4	161.5	155.2	155.5	170.6	175.1	16.3	11.1
Rad. 6	9.1	9.4	115.4	171.5	258.1	170.9	187.8	188.1	19.4	9.4
Rad. 7	6.0	6.5	8.0	209.0	222.5	225.7	195.9	25.4	11.4	7.1
Rad. 8	1.1	1.6	8.0	84.5	97.5	129.0	107.5	8.2	8.0	1.9
Rad. 9	0.8	1.0	5.1	4.8	4.6	4.8	4.6	4.6	3.2	0.8
Rad. 10	0.5	0.5	1.5	1.5	1.3	1.5	0.7	1.3	0.5	0.2

Experimento No. 04 - Distribuciones de flujo estimadas



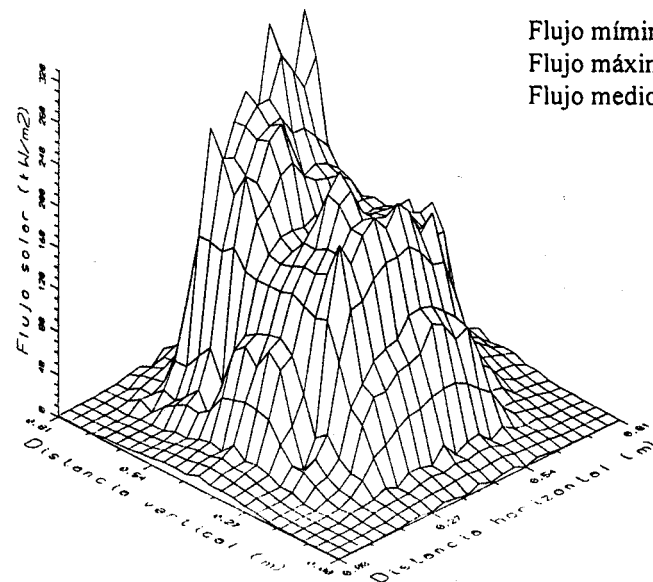
Potencia total: 59.1 kW

Flujo mínimo: 5.1 kW/m<sup>2</sup>

Flujo máximo: 160.3 kW/m<sup>2</sup>

Flujo medio: 83.9 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Potencia total: 48.3 kW

Flujo mínimo: 1.3 kW/m<sup>2</sup>

Flujo máximo: 330.9 kW/m<sup>2</sup>

Flujo medio: 206.5 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 05 - Datos Básicos**

Fecha: 10/15/990

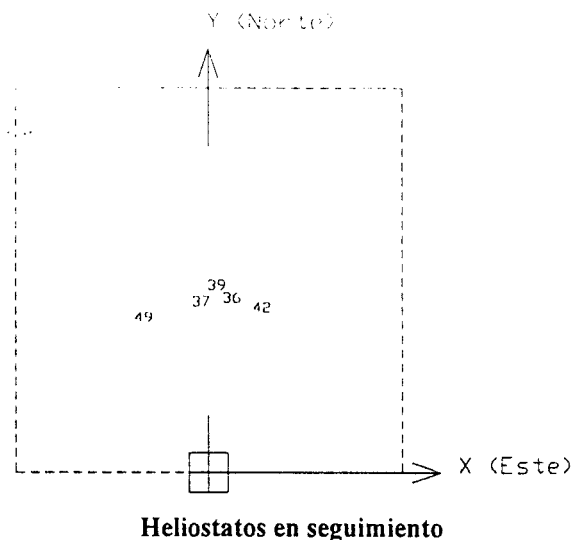
Hora Solar: 12:49

Irradiancia Directa: 930 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 87 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.06, 1.52, 42.77



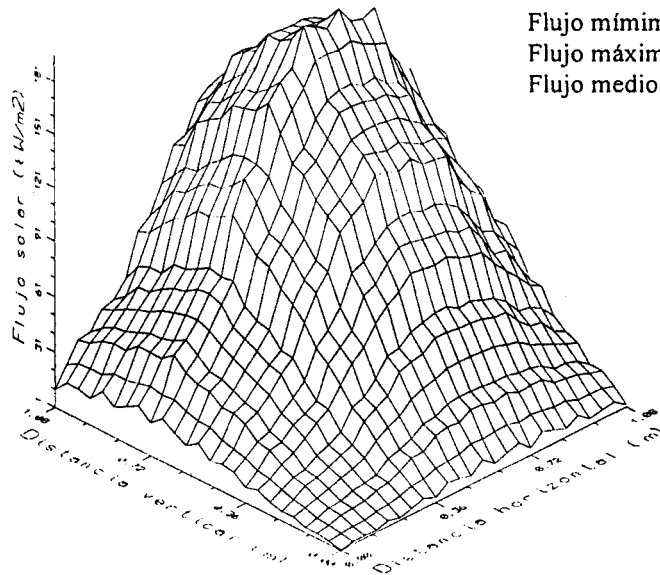
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	10.4	30.8	41.7	78.0	112.8	134.3	133.2	130.0	103.1	65.6
Rad. 2	14.2	42.1	56.0	101.3	142.4	167.4	165.7	162.4	129.8	84.7
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	19.0	54.7	72.7	125.7	171.8	199.4	196.0	190.0	149.9	99.0
Rad. 5	15.6	42.6	57.0	99.2	134.9	157.3	153.2	147.9	114.4	74.6
Rad. 6	13.8	36.8	49.6	86.4	120.6	140.5	136.2	131.2	100.1	65.0
Rad. 7	9.5	24.8	33.2	59.8	83.8	97.7	93.6	89.0	66.2	42.7
Rad. 8	5.7	14.7	20.5	36.7	52.0	59.1	56.4	53.0	37.9	24.8
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	0.8	1.6	1.8	3.7	4.7	5.0	4.7	4.4	3.3	2.1

**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

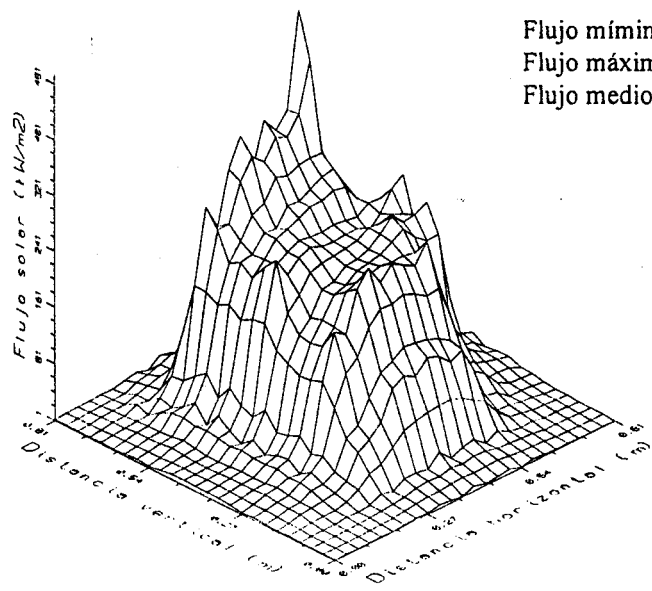
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	1.6	2.1	2.6	4.3	6.2	6.2	6.2	5.9	2.4	1.6
Rad. 2	1.9	6.8	7.6	9.0	8.5	7.9	9.0	10.4	7.6	2.7
Rad. 3	2.2	10.6	11.2	296.0	390.7	389.3	529.2	16.2	12.8	7.0
Rad. 4	3.2	14.3	14.8	224.5	243.8	267.4	292.2	175.1	15.7	10.5
Rad. 5	8.1	8.7	8.4	263.2	249.2	235.6	223.8	311.0	13.3	14.2
Rad. 6	7.3	11.5	10.6	162.7	209.9	227.3	268.1	285.2	15.9	11.5
Rad. 7	2.8	14.0	13.7	192.4	265.2	250.6	254.6	28.9	13.7	8.8
Rad. 8	1.6	10.7	12.4	65.5	135.7	144.3	130.2	10.2	9.1	2.7
Rad. 9	1.3	2.4	2.7	5.7	5.7	5.7	6.2	5.9	4.3	1.3
Rad. 10	0.7	0.7	0.5	2.6	1.5	1.8	1.5	1.5	0.7	0.5

**Experimento No. 05 - Distribuciones de flujo estimadas**



Potencia total: 77.2 kW  
 Flujo mínimo: 7.1 kW/m<sup>2</sup>  
 Flujo máximo: 196.4 kW/m<sup>2</sup>  
 Flujo medio: 109.6 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Potencia total: 58.2 kW  
 Flujo mínimo: 2.6 kW/m<sup>2</sup>  
 Flujo máximo: 493.3 kW/m<sup>2</sup>  
 Flujo medio: 248.9 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 06 - Datos Básicos**

Fecha: 10/19/990

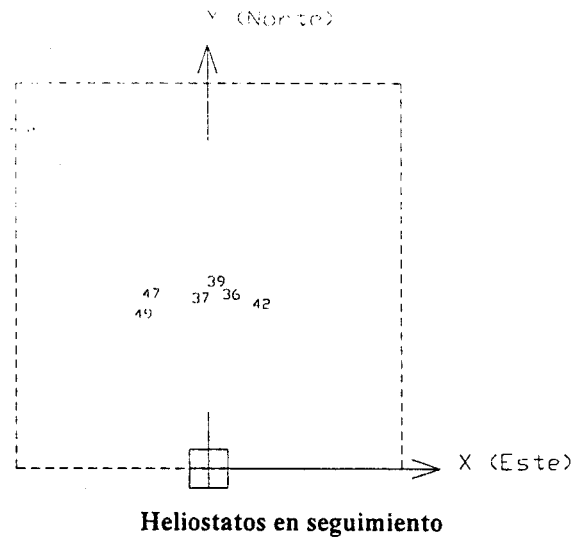
Hora Solar: 14:35

Irradiancia Directa: 960 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 87 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.06, 1.52, 42.77



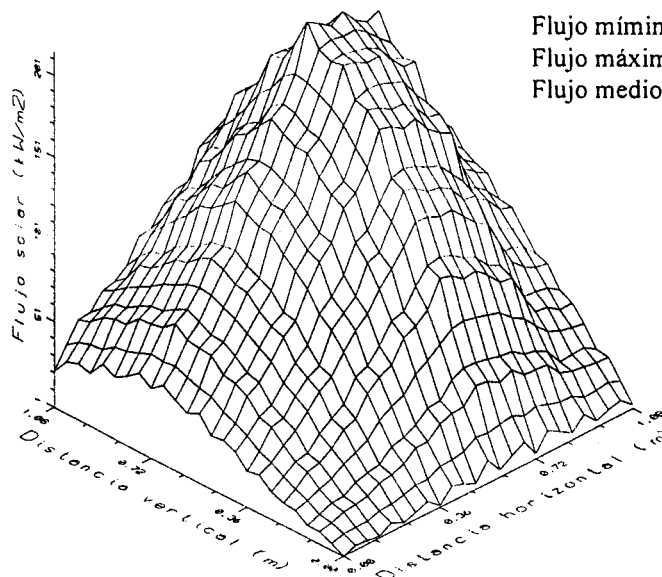
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	21.6	44.8	56.1	78.3	92.2	117.6	121.4	123.9	84.5	73.7
Rad. 2	30.3	59.3	76.1	106.7	125.6	158.2	157.7	157.8	106.5	94.7
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	41.6	77.1	100.8	142.8	172.9	218.8	211.0	204.3	132.6	115.5
Rad. 5	37.3	68.6	90.7	130.2	161.7	204.5	195.8	185.9	116.0	100.5
Rad. 6	31.5	57.9	77.4	112.6	142.9	183.3	173.1	159.9	97.4	84.8
Rad. 7	22.7	42.4	58.8	85.9	110.7	143.6	133.2	118.3	72.0	63.5
Rad. 8	14.2	27.8	40.4	60.0	78.5	103.0	94.0	80.2	49.6	44.8
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	1.1	1.4	1.9	2.4	3.0	3.6	4.0	4.0	3.6	3.2

**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	2.4	2.4	2.6	2.6	3.2	2.9	2.1	1.6	2.1	2.1
Rad. 2	2.7	2.7	2.1	4.1	4.6	5.4	4.3	2.1	3.0	2.7
Rad. 3	2.5	2.5	2.8	365.5	332.7	405.3	498.4	9.2	3.3	3.3
Rad. 4	2.3	2.0	1.7	257.5	268.9	229.7	348.0	147.4	2.9	2.3
Rad. 5	3.0	6.3	7.8	311.9	333.6	211.1	330.0	304.0	7.5	3.0
Rad. 6	3.5	5.3	6.2	256.0	241.5	281.4	259.8	285.8	6.2	3.5
Rad. 7	2.8	2.8	2.8	308.4	485.2	364.6	215.4	25.2	2.0	2.2
Rad. 8	2.7	2.2	1.6	103.9	215.6	189.9	131.0	4.4	2.2	2.2
Rad. 9	2.7	2.4	1.9	3.2	2.9	3.2	2.4	2.1	2.1	1.9
Rad. 10	1.8	1.5	1.3	2.3	1.8	1.8	1.5	1.5	1.5	1.5

Experimento No. 06 - Distribuciones de flujo estimadas



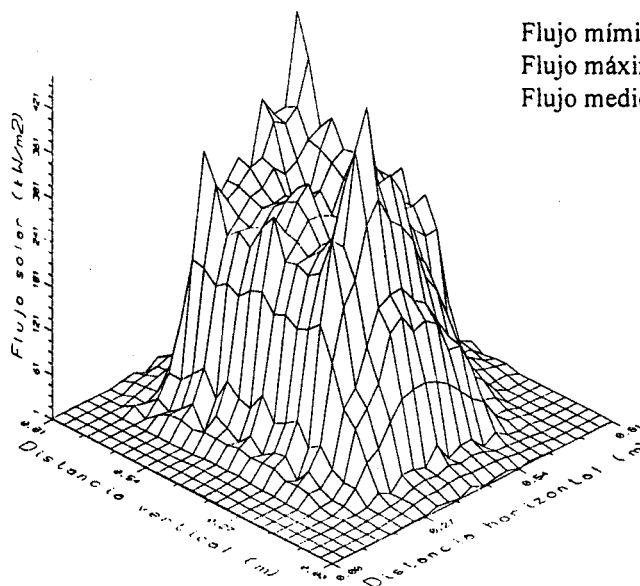
Potencia total: 92.1 kW

Flujo mínimo: 12.9 kW/m<sup>2</sup>

Flujo máximo: 215.5 kW/m<sup>2</sup>

Flujo medio: 130.9 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Potencia total: 64.3 kW

Flujo mínimo: 2.0 kW/m<sup>2</sup>

Flujo máximo: 465.5 kW/m<sup>2</sup>

Flujo medio: 275.0 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 07 - Datos Básicos**

Fecha: 10/24/990

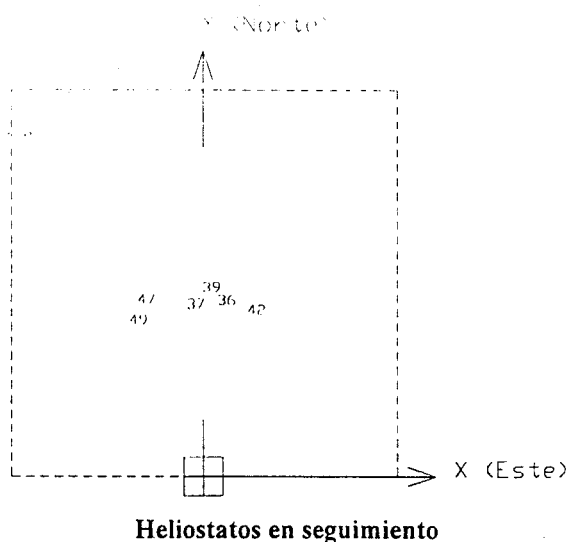
Hora Solar: 13:30

Irradiancia Directa: 900 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 87 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.06, 1.52, 42.77



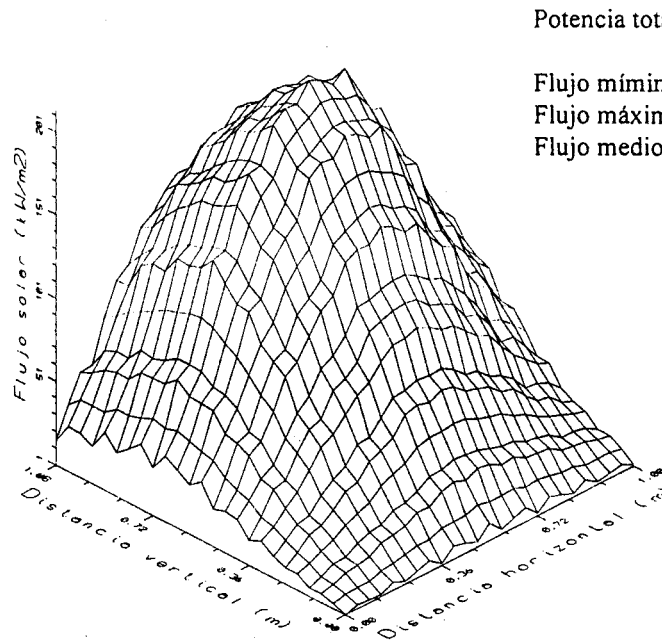
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	15.0	47.5	93.8	122.5	137.8	145.7	149.0	122.2	94.2	66.2
Rad. 2	20.6	62.2	117.9	151.4	171.9	181.6	182.7	153.1	116.7	82.5
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	28.7	78.4	137.4	175.3	205.7	215.6	210.7	177.8	131.0	92.7
Rad. 5	28.2	70.6	117.3	148.8	184.1	194.0	188.7	155.7	107.8	78.8
Rad. 6	21.4	55.9	92.3	118.8	148.8	155.3	145.1	121.1	85.2	58.2
Rad. 7	15.3	39.0	62.6	81.8	105.8	109.5	97.8	81.3	55.8	36.9
Rad. 8	9.8	23.6	37.2	49.8	67.1	68.5	57.7	47.4	31.9	20.5
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	0.8	1.3	1.7	2.1	2.4	2.4	2.3	2.1	1.7	1.6

**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

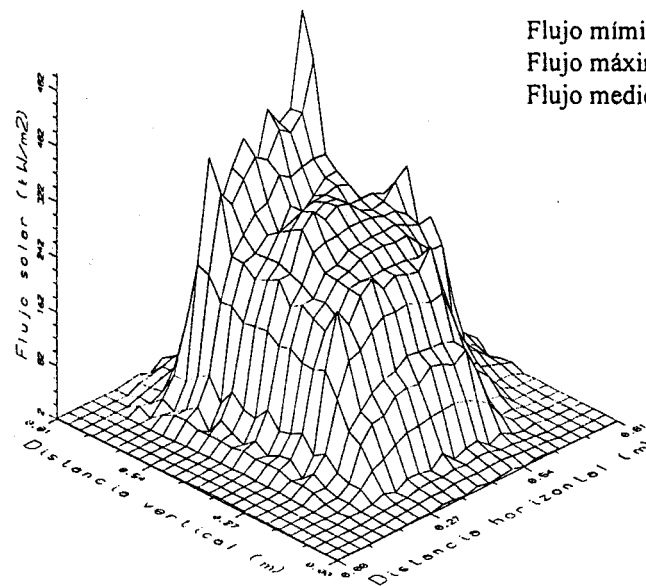
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	3.5	3.2	2.9	3.7	4.0	3.5	3.2	2.4	2.4	2.4
Rad. 2	3.2	4.1	3.5	5.2	5.2	6.0	4.6	3.0	3.2	3.0
Rad. 3	3.0	4.2	4.4	386.2	396.6	420.2	544.9	10.0	4.2	3.6
Rad. 4	3.5	4.3	3.7	234.1	244.3	258.9	298.7	146.5	11.3	2.6
Rad. 5	4.5	6.6	6.6	242.3	320.3	306.4	268.9	335.5	75.3	3.0
Rad. 6	5.6	7.0	7.6	220.6	245.7	261.9	265.7	270.5	26.2	4.1
Rad. 7	5.4	6.0	5.4	234.5	258.9	245.1	259.5	48.1	6.3	4.0
Rad. 8	4.6	4.1	3.8	93.9	122.7	139.3	140.1	3.8	3.8	3.0
Rad. 9	4.0	3.2	3.5	4.0	4.6	4.8	4.3	2.7	3.2	2.9
Rad. 10	3.1	2.8	2.8	3.4	3.1	3.4	3.4	3.1	2.6	2.3

Experimento No. 07 - Distribuciones de flujo estimadas



Potencia total: 91.3 kW  
 Flujo mínimo: 10.9 kW/m<sup>2</sup>  
 Flujo máximo: 213.9 kW/m<sup>2</sup>  
 Flujo medio: 129.5 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Potencia total: 61.5 kW  
 Flujo mínimo: 3.0 kW/m<sup>2</sup>  
 Flujo máximo: 507.7 kW/m<sup>2</sup>  
 Flujo medio: 263.0 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



**Experimento No. 08 - Datos Básicos**

Fecha: 10/24/990

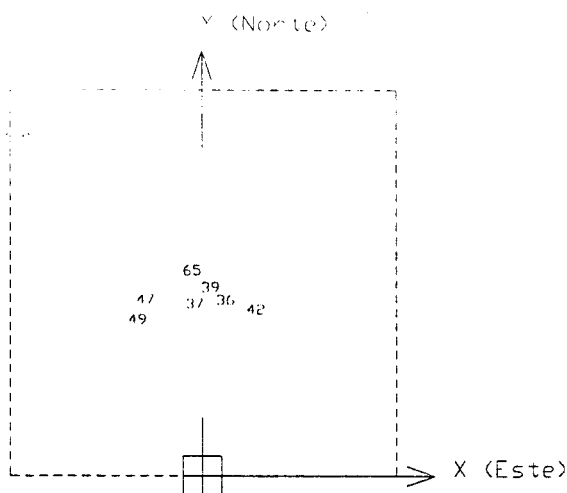
Hora Solar: 13:35

Irradiancia Directa: 890 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 87 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punt de apunte (m): -0.06, 1.52, 42.77



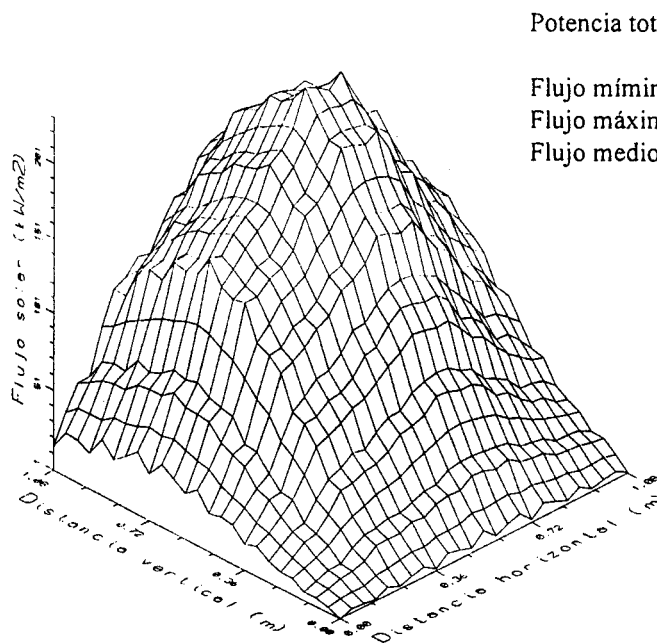
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	15.1	46.0	98.7	110.4	139.3	164.2	160.7	139.8	111.3	92.6
Rad. 2	20.9	60.7	128.0	140.7	172.6	200.9	196.9	170.9	136.2	112.7
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	30.5	76.6	153.1	166.3	199.4	234.5	230.6	195.7	153.4	122.7
Rad. 5	28.7	69.9	137.5	144.6	175.9	208.3	205.6	167.7	130.4	103.8
Rad. 6	24.0	54.3	108.0	118.1	140.6	167.7	164.7	131.1	99.3	75.8
Rad. 7	17.7	38.2	75.1	82.2	99.3	117.9	114.6	87.8	64.9	48.2
Rad. 8	11.2	23.7	46.0	49.2	60.8	73.7	69.0	51.5	37.2	27.1
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	1.1	1.5	2.2	2.4	3.0	3.1	3.0	2.6	2.2	1.7

**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

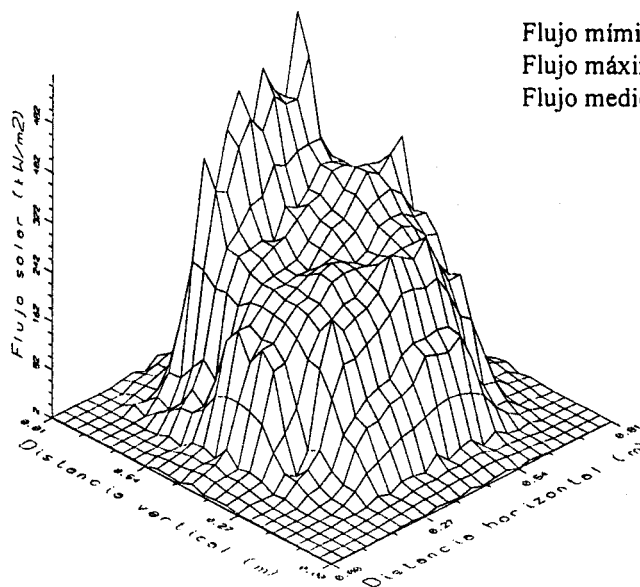
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	3.5	3.2	4.0	4.3	4.3	4.3	3.2	2.4	2.9	2.9
Rad. 2	3.2	3.2	5.7	6.0	6.5	6.5	5.2	3.0	3.2	3.0
Rad. 3	4.2	3.6	6.1	424.7	530.3	542.7	599.6	66.1	5.0	3.9
Rad. 4	3.7	3.2	45.8	269.5	256.9	293.4	346.5	304.2	6.1	2.6
Rad. 5	4.8	4.5	225.0	246.2	242.0	299.8	363.3	426.2	15.7	3.0
Rad. 6	5.9	5.6	210.2	239.2	284.3	254.2	303.8	302.7	15.0	4.7
Rad. 7	4.8	4.0	9.4	245.4	235.4	307.9	303.0	223.7	5.1	4.5
Rad. 8	4.1	3.3	6.6	97.0	118.3	173.3	177.7	17.1	4.4	3.5
Rad. 9	4.0	4.0	4.0	4.8	4.6	6.2	4.3	3.5	3.5	2.9
Rad. 10	2.8	2.8	3.9	4.2	4.4	3.9	3.4	3.1	2.6	2.1

Experimento No. 08 - Distribuciones de flujo estimadas



Potencia total: 97.2 kW  
 Flujo mínimo: 11.6 kW/m<sup>2</sup>  
 Flujo máximo: 231.7 kW/m<sup>2</sup>  
 Flujo medio: 138.1 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Potencia total: 75.3 kW  
 Flujo mínimo: 3.3 kW/m<sup>2</sup>  
 Flujo máximo: 561.7 kW/m<sup>2</sup>  
 Flujo medio: 322.1 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 09 - Datos Básicos**

Fecha: 10/24/990

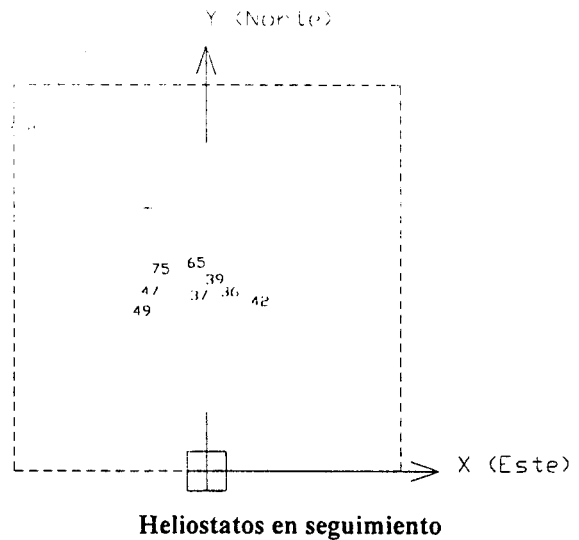
Hora Solar: 13:41

Irradiancia Directa: 870 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 87 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.06, 1.52, 42.77



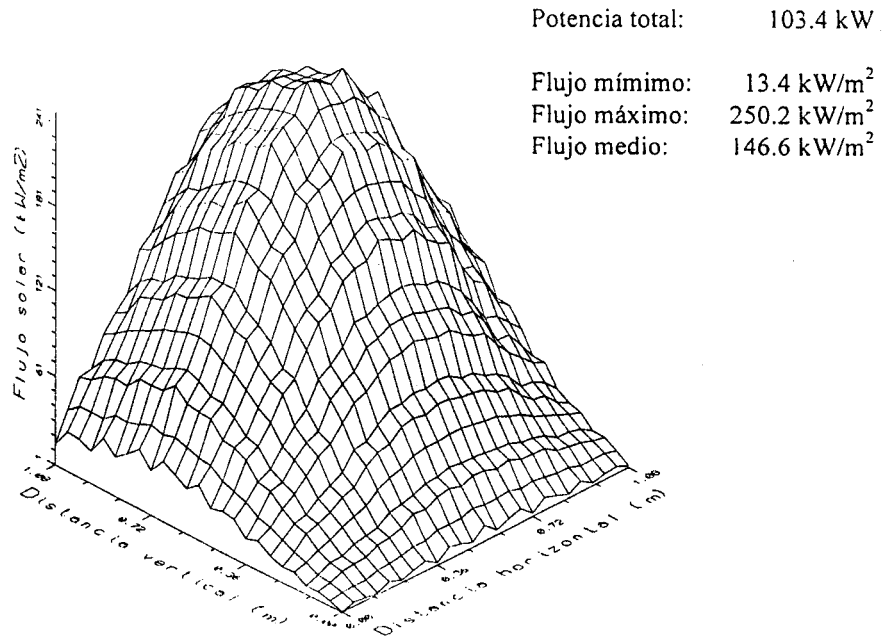
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	15.1	51.9	83.8	128.2	164.0	193.6	191.4	173.9	133.0	99.8
Rad. 2	20.8	68.6	109.0	160.0	200.4	228.8	225.8	204.6	155.5	116.2
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	31.4	87.4	132.1	186.1	228.0	252.9	247.6	220.9	163.7	118.8
Rad. 5	30.6	76.6	113.8	161.3	194.3	216.0	208.7	187.6	137.1	93.8
Rad. 6	25.6	63.2	91.6	129.8	157.1	171.3	164.4	144.2	101.7	68.7
Rad. 7	19.0	45.0	63.7	91.0	109.8	115.3	109.3	95.6	65.6	42.6
Rad. 8	11.8	29.7	39.6	57.4	68.8	69.3	64.5	55.9	38.2	23.2
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	1.1	1.5	2.2	3.0	3.4	3.5	3.4	3.1	2.5	2.0

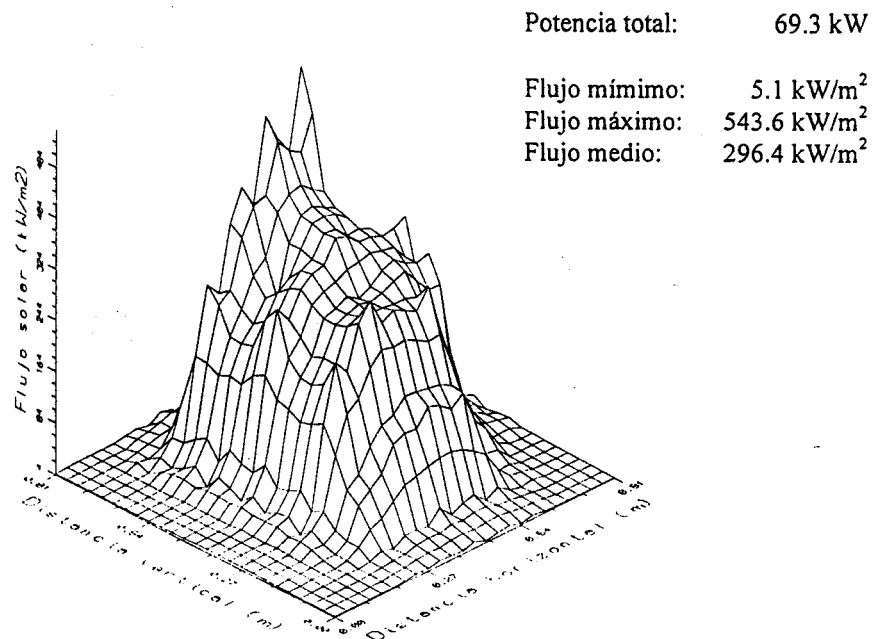
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	5.6	6.7	6.2	7.0	6.7	5.6	5.1	4.0	4.5	4.0
Rad. 2	6.5	7.9	6.8	6.5	6.5	6.5	5.7	4.6	5.2	5.4
Rad. 3	6.4	7.8	7.5	289.5	434.7	541.3	580.8	12.6	5.0	5.8
Rad. 4	7.0	9.0	7.8	209.0	242.6	362.6	348.0	189.5	4.9	4.3
Rad. 5	8.4	9.6	10.2	302.2	323.7	366.0	331.5	367.2	10.5	6.9
Rad. 6	9.4	11.8	10.0	202.5	281.4	274.3	315.3	323.0	8.8	7.3
Rad. 7	9.1	11.7	10.3	253.7	332.5	293.5	300.7	62.4	7.7	7.1
Rad. 8	7.1	8.8	7.4	84.8	147.0	173.8	168.6	6.0	6.3	5.8
Rad. 9	6.5	7.0	6.5	8.1	8.9	8.9	8.9	5.4	6.2	5.1
Rad. 10	5.7	6.0	5.2	8.1	8.4	6.5	6.8	5.7	4.7	4.4

Experimento No. 09 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 10 - Datos Básicos**

Fecha: 10/24/990

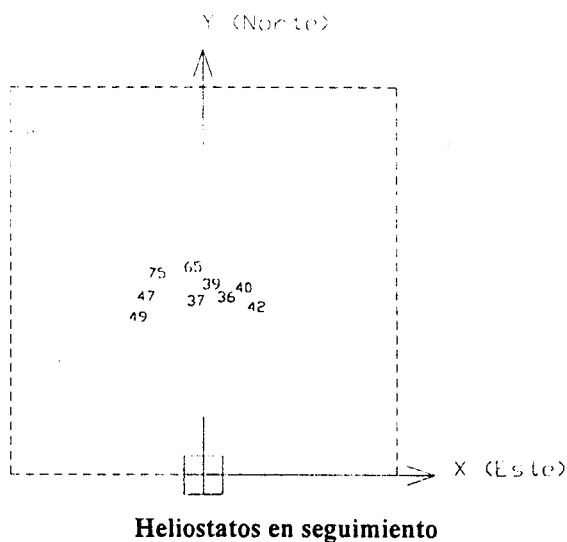
Hora Solar: 14:34

Irradiancia Directa: 820 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 86 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.06, 1.52, 42.77



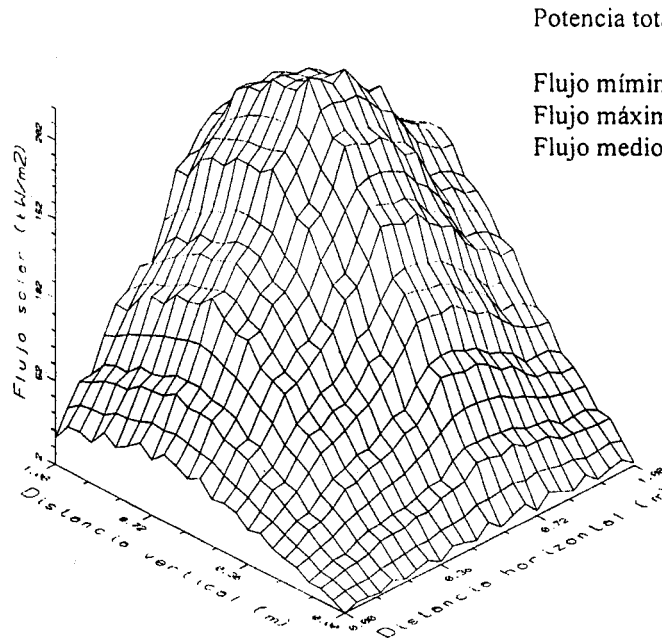
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	17.1	42.3	79.5	94.8	150.3	169.5	167.5	158.1	129.5	117.5
Rad. 2	23.9	54.8	97.9	116.4	173.6	200.8	195.9	183.0	150.3	137.9
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	34.2	69.4	115.1	134.0	184.0	224.8	216.1	196.4	162.6	149.7
Rad. 5	33.5	64.4	101.1	117.1	154.4	194.7	185.9	166.3	131.5	121.5
Rad. 6	28.7	53.5	82.7	94.4	123.4	161.7	154.1	135.8	109.1	98.3
Rad. 7	22.3	39.9	60.7	68.1	85.5	117.2	111.4	96.1	74.6	66.7
Rad. 8	15.6	27.3	41.1	45.8	54.3	79.0	74.6	62.2	47.0	41.9
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	1.5	2.2	2.8	3.1	4.0	4.3	4.4	4.0	3.3	3.0

**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

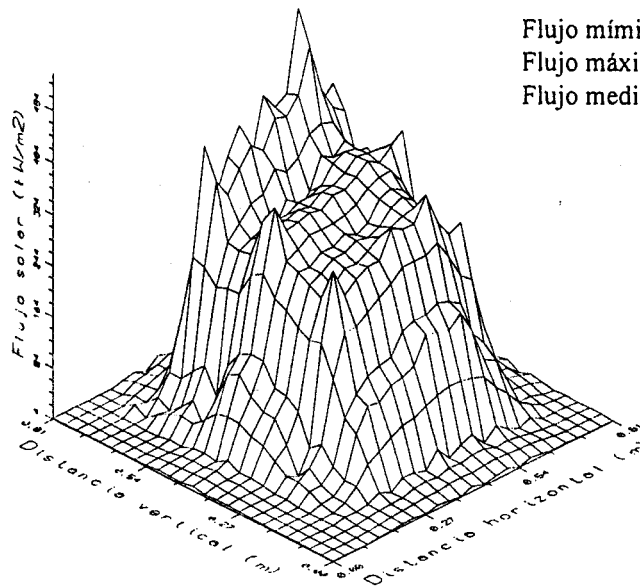
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	5.1	4.5	5.1	5.9	4.8	5.6	4.5	4.0	3.7	4.5
Rad. 2	5.7	5.2	6.3	6.5	5.7	6.8	5.7	4.9	4.3	4.9
Rad. 3	5.8	5.3	6.4	430.3	444.8	472.0	571.5	452.7	5.3	5.6
Rad. 4	6.4	5.2	7.2	268.3	267.7	274.7	340.1	336.3	9.6	4.6
Rad. 5	6.9	6.3	134.3	376.9	333.0	342.1	365.1	416.2	20.2	4.8
Rad. 6	7.3	6.4	83.8	284.0	289.7	287.9	338.4	299.7	19.7	5.9
Rad. 7	7.7	6.3	10.3	311.3	293.0	337.1	356.6	300.7	7.4	6.0
Rad. 8	6.0	5.2	8.2	129.9	145.6	201.2	205.1	98.6	6.0	4.9
Rad. 9	7.0	5.1	6.5	6.2	5.4	7.3	6.5	5.1	5.1	4.6
Rad. 10	4.7	3.9	6.5	5.5	4.4	5.7	4.9	4.7	4.2	3.9

Experimento No. 10 - Distribuciones de flujo estimadas



Potencia total: 91.3 kW  
 Flujo mínimo: 13.2 kW/m<sup>2</sup>  
 Flujo máximo: 221.7 kW/m<sup>2</sup>  
 Flujo medio: 129.5 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Potencia total: 82.7 kW  
 Flujo mínimo: 5.2 kW/m<sup>2</sup>  
 Flujo máximo: 540.6 kW/m<sup>2</sup>  
 Flujo medio: 353.7 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 11 - Datos Básicos**

Fecha: 10/25/990

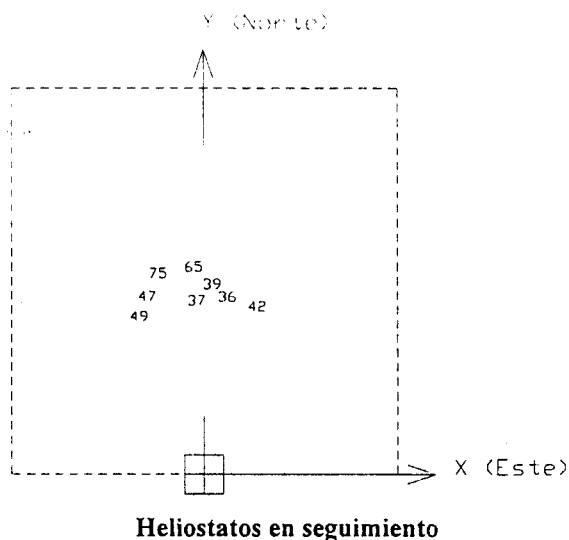
Hora Solar: 14:31

Irradiancia Directa: 770 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 87 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.06, 1.52, 42.77



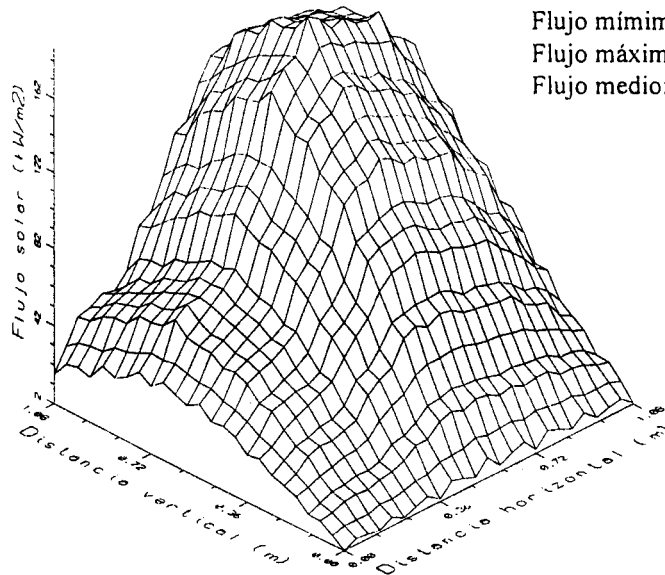
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	16.5	40.9	42.6	74.8	113.3	143.5	137.8	136.5	123.1	88.2
Rad. 2	23.3	53.1	55.5	92.4	139.7	168.9	161.2	159.2	142.9	101.3
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	36.2	69.7	72.2	114.2	169.5	190.9	178.5	174.3	153.1	107.0
Rad. 5	34.7	60.1	65.7	99.8	149.5	163.0	149.7	139.9	122.2	86.3
Rad. 6	33.1	56.8	59.3	90.0	129.8	139.6	127.7	124.2	104.3	70.5
Rad. 7	26.5	44.3	46.1	68.8	98.0	101.4	91.3	89.2	72.8	48.0
Rad. 8	19.5	31.7	32.2	49.4	68.6	67.9	60.1	58.3	46.7	30.5
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	1.5	1.9	2.1	2.8	3.6	3.6	3.5	3.5	2.9	2.2

**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	4.3	3.2	3.5	3.5	2.9	2.9	2.9	1.8	1.8	2.6
Rad. 2	4.3	3.2	4.1	4.3	4.9	4.9	4.9	2.7	2.4	3.5
Rad. 3	3.9	3.0	4.7	331.9	347.8	387.4	479.9	7.5	3.6	3.6
Rad. 4	3.7	2.6	4.9	190.9	189.2	223.6	289.9	121.7	7.2	2.3
Rad. 5	4.8	3.6	104.9	199.6	191.5	290.1	299.8	296.1	18.1	3.3
Rad. 6	5.9	4.7	74.7	200.8	202.8	236.8	292.9	262.8	17.4	4.1
Rad. 7	5.1	3.4	7.4	232.8	222.2	247.7	249.7	47.8	4.5	4.0
Rad. 8	4.1	3.0	4.9	98.4	109.1	151.2	146.5	3.3	3.3	3.0
Rad. 9	3.8	3.2	3.8	3.8	3.5	4.0	3.5	2.1	2.1	2.7
Rad. 10	3.6	3.1	3.4	2.8	2.3	2.8	2.6	1.5	2.1	2.1

Experimento No. 11 - Distribuciones de flujo estimadas



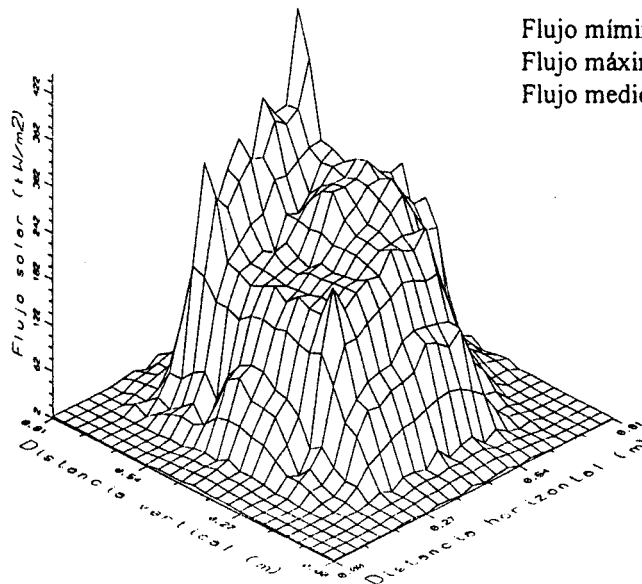
Potencia total: 79.2 kW

Flujo mínimo: 14.4 kW/m<sup>2</sup>

Flujo máximo: 188.5 kW/m<sup>2</sup>

Flujo medio: 112.4 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Potencia total: 56.6 kW

Flujo mínimo: 2.1 kW/m<sup>2</sup>

Flujo máximo: 447.6 kW/m<sup>2</sup>

Flujo medio: 242.1 kW/m<sup>2</sup>

Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



**Experimento No. 12 - Datos Básicos**

Fecha: 10/30/990

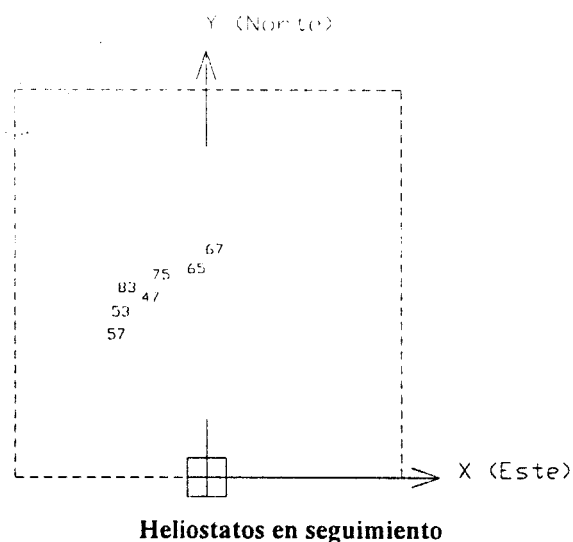
Hora Solar: 11:50

Irradiancia Directa: 964 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 86%

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.06, 1.52, 42.77



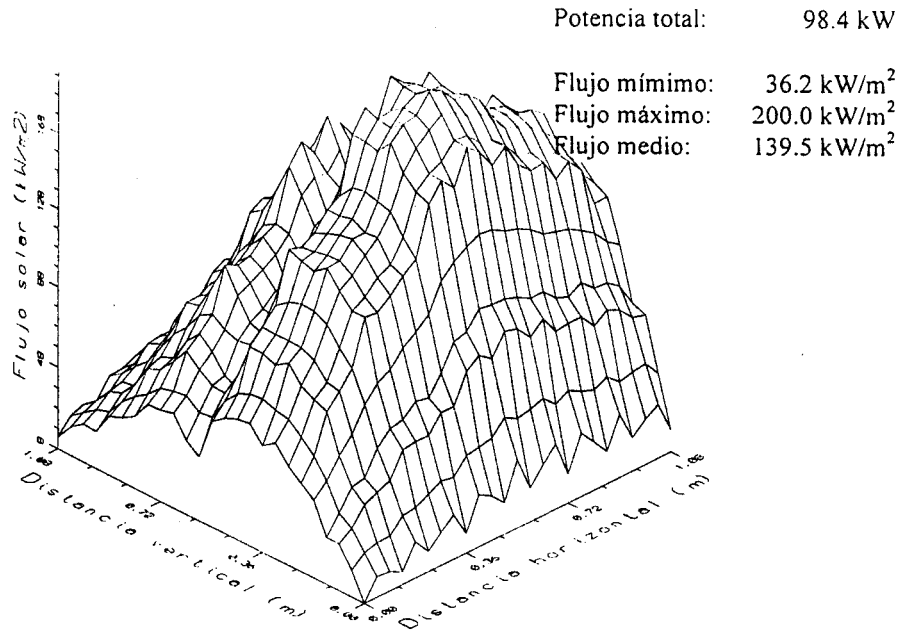
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	13.6	20.7	30.7	29.8	44.7	45.9	41.9	36.3	35.2	19.8
Rad. 2	25.1	38.0	53.6	53.3	76.8	78.5	73.3	63.5	62.2	38.2
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	53.5	82.1	112.1	114.1	157.3	164.2	155.0	136.8	134.5	93.9
Rad. 5	38.0	59.7	80.6	81.6	111.8	119.8	112.0	99.6	97.0	70.6
Rad. 6	65.7	103.2	139.9	145.8	195.4	205.5	194.0	172.0	169.0	128.1
Rad. 7	62.1	100.3	135.7	142.6	190.3	201.2	189.1	169.0	165.8	128.5
Rad. 8	53.0	90.7	124.2	131.7	175.2	186.9	174.5	157.2	153.4	120.6
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	8.0	12.4	16.8	18.1	21.4	22.2	22.7	21.5	21.5	18.8

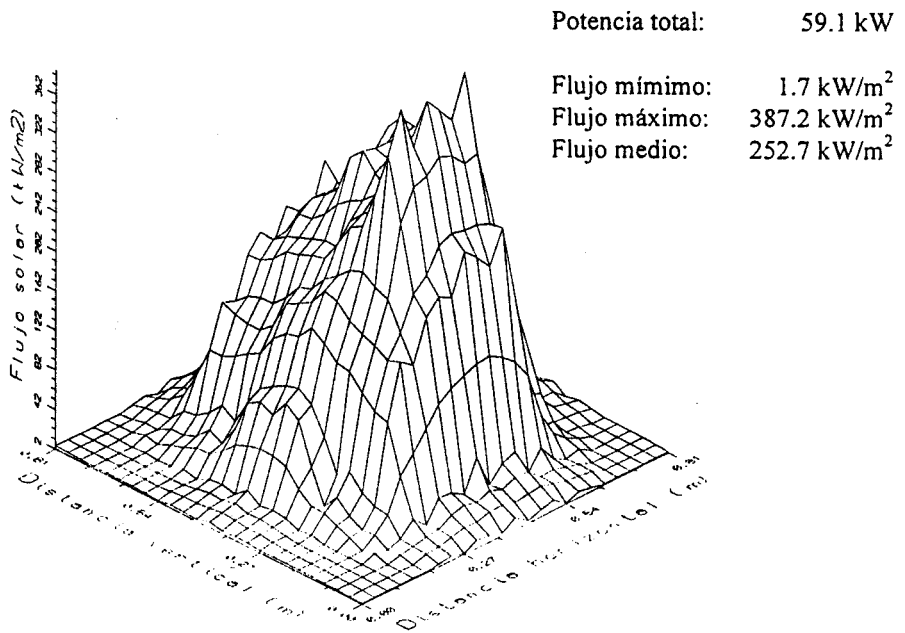
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	13.6	20.7	30.7	29.8	44.7	45.9	41.9	36.3	35.2	19.8
Rad. 2	25.1	38.0	53.6	53.3	76.8	78.5	73.3	63.5	62.2	38.2
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	53.5	82.1	112.1	114.1	157.3	164.2	155.0	136.8	134.5	93.9
Rad. 5	38.0	59.7	80.6	81.6	111.8	119.8	112.0	99.6	97.0	70.6
Rad. 6	65.7	103.2	139.9	145.8	195.4	205.5	194.0	172.0	169.0	128.1
Rad. 7	62.1	100.3	135.7	142.6	190.3	201.2	189.1	169.0	165.8	128.5
Rad. 8	53.0	90.7	124.2	131.7	175.2	186.9	174.5	157.2	153.4	120.6
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	8.0	12.4	16.8	18.1	21.4	22.2	22.7	21.5	21.5	18.8

Experimento No. 12 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 13 - Datos Básicos**

Fecha: 10/30/990

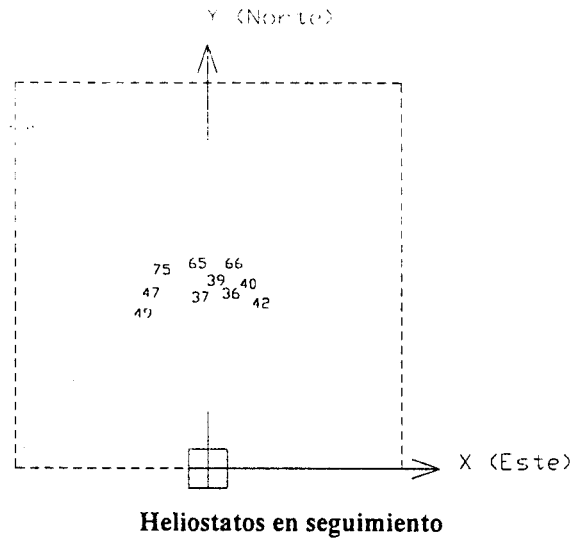
Hora Solar: 12:51

Irradiancia Directa: 970 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 86 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.06, 1.52, 42.77



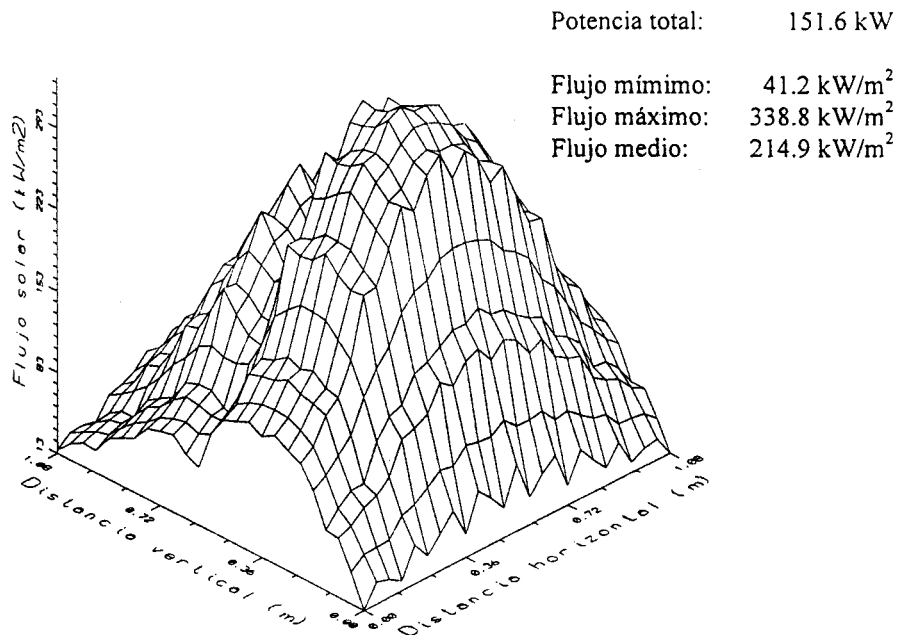
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	16.3	22.1	44.3	58.2	65.7	62.3	57.7	45.1	21.1	14.4
Rad. 2	31.0	40.6	77.5	99.8	112.7	107.3	98.9	78.6	40.4	26.1
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	76.8	99.9	176.4	221.3	249.9	243.2	221.1	180.5	105.8	68.5
Rad. 5	59.2	76.3	132.0	165.0	183.0	180.3	160.8	130.9	81.4	52.6
Rad. 6	114.4	151.4	247.5	305.1	340.5	330.6	298.5	241.5	156.2	102.5
Rad. 7	116.5	154.9	248.7	306.1	340.7	330.3	296.6	238.4	157.7	104.2
Rad. 8	110.3	149.5	236.7	291.8	323.8	315.1	281.6	223.3	150.7	98.2
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	13.6	17.3	27.8	32.7	32.9	31.4	30.0	24.7	18.6	13.4

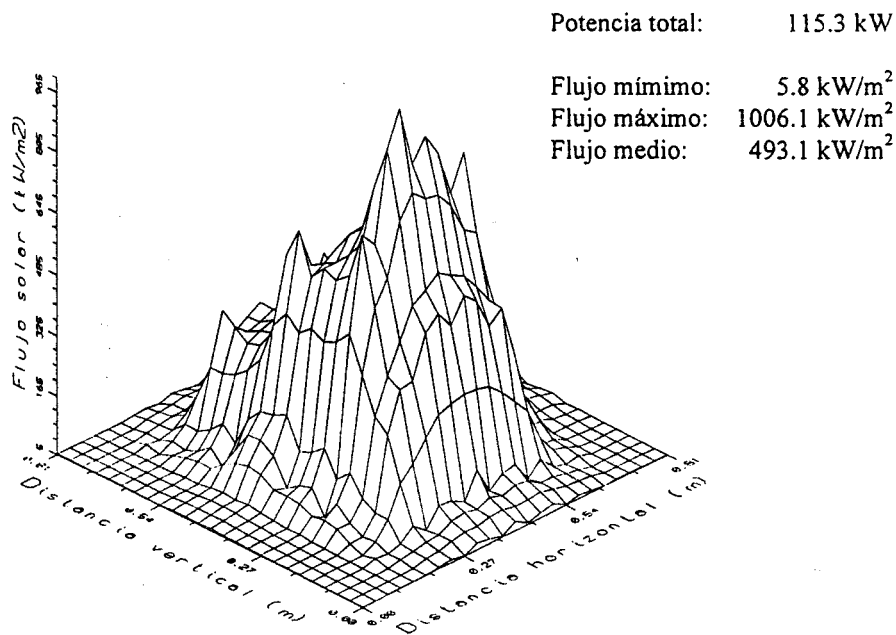
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	6.4	5.9	5.9	7.2	6.7	6.7	6.2	4.5	5.1	6.4
Rad. 2	6.3	7.1	6.3	9.5	9.5	11.2	8.5	9.0	6.0	6.8
Rad. 3	6.1	7.5	7.5	364.4	334.7	339.4	376.7	10.9	6.1	6.7
Rad. 4	5.5	8.1	8.1	299.5	292.8	294.6	281.7	162.9	13.1	4.6
Rad. 5	7.8	16.3	145.8	678.2	510.3	473.7	386.9	422.9	42.3	7.2
Rad. 6	9.1	11.8	18.3	598.6	644.9	572.0	489.6	453.0	35.4	8.2
Rad. 7	8.5	8.8	9.4	722.6	1037.4	917.7	802.8	107.7	12.6	8.3
Rad. 8	6.3	7.1	7.7	380.9	542.1	554.8	467.1	8.2	8.2	6.9
Rad. 9	5.7	5.7	6.2	8.7	9.5	10.0	9.5	5.7	8.1	6.2
Rad. 10	6.0	5.5	5.2	7.0	7.0	8.1	7.6	5.7	6.8	4.7

**Experimento No. 13 - Distribuciones de flujo estimadas**



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 14 - Datos Básicos**

Fecha: 10/30/990

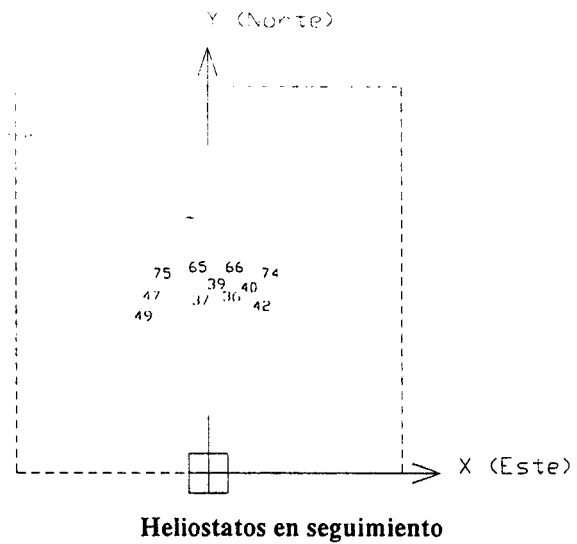
Hora Solar: 12:56

Irradiancia Directa: 970 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 86 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



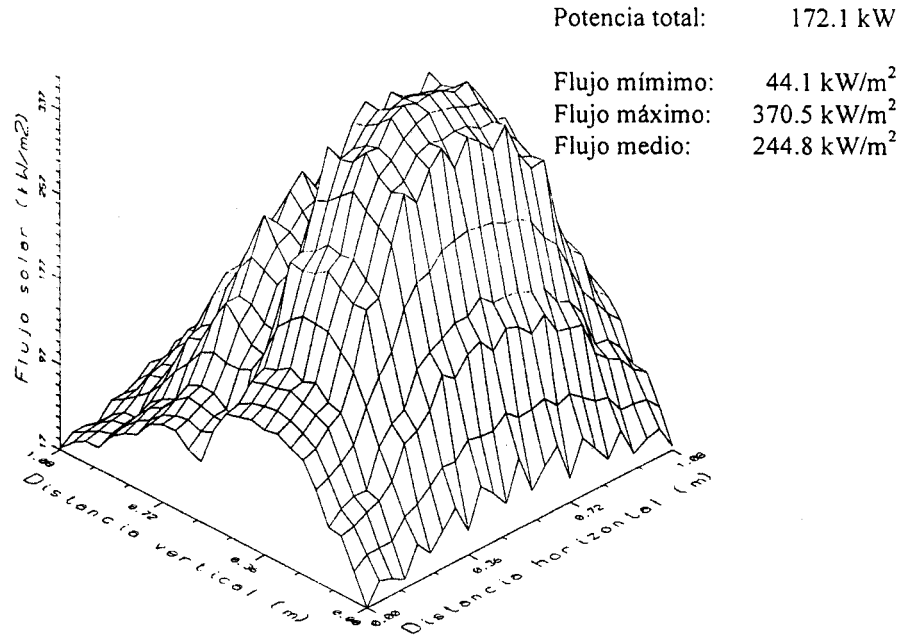
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	18.1	23.2	38.8	49.6	58.1	57.6	59.3	48.1	35.4	21.0
Rad. 2	35.0	43.1	71.8	94.7	109.2	107.0	108.8	90.7	63.5	38.4
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	89.0	106.5	175.9	236.5	264.9	259.9	261.9	226.7	150.8	93.9
Rad. 5	68.8	81.4	132.6	180.5	200.2	196.0	195.1	169.5	112.9	71.9
Rad. 6	129.6	153.7	249.8	338.5	368.7	363.9	360.5	313.6	208.8	135.1
Rad. 7	131.5	155.4	251.7	343.5	371.8	368.8	362.1	314.1	208.2	136.2
Rad. 8	122.7	145.8	239.8	330.9	357.9	355.6	346.7	301.0	194.2	129.5
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	16.6	20.3	32.5	38.2	38.8	38.9	38.1	33.3	26.3	20.2

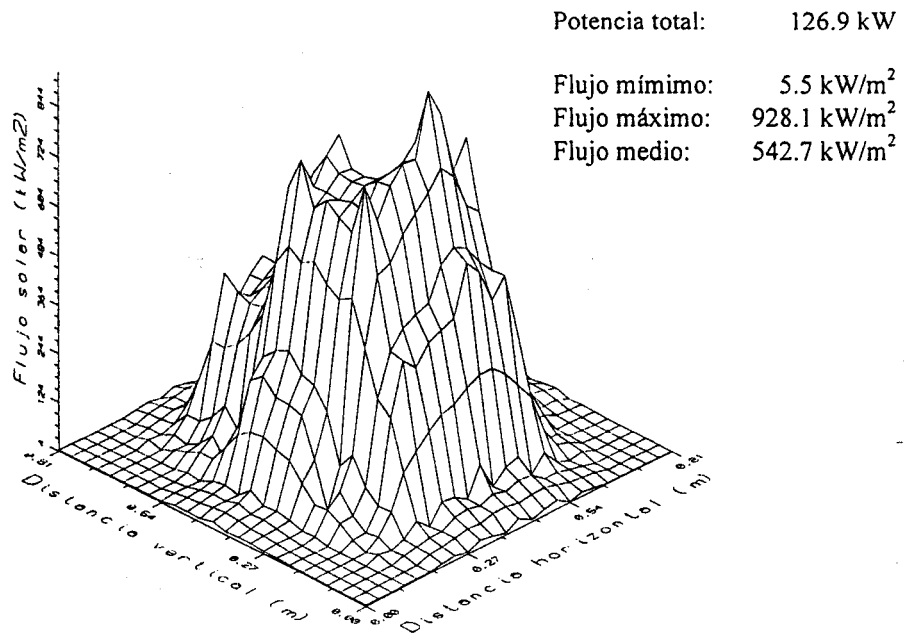
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	6.7	4.8	6.2	8.0	5.6	5.9	5.6	4.5	5.1	5.3
Rad. 2	7.9	5.4	7.6	11.2	10.6	10.1	9.0	10.1	6.3	6.3
Rad. 3	7.8	6.1	9.2	421.3	424.9	385.4	413.4	12.0	4.7	5.6
Rad. 4	7.5	5.8	10.2	361.4	370.5	308.3	310.0	152.4	11.6	3.5
Rad. 5	11.7	8.7	295.5	791.4	818.0	524.5	476.1	419.3	33.8	5.1
Rad. 6	11.2	8.5	241.2	711.1	707.2	634.9	548.4	454.4	31.5	7.0
Rad. 7	10.5	7.7	13.1	780.2	795.7	954.9	771.0	104.5	10.3	6.8
Rad. 8	7.1	5.5	8.8	418.8	435.9	594.9	505.8	8.2	6.6	5.5
Rad. 9	6.5	5.4	7.8	9.5	8.1	9.5	7.6	5.1	6.2	4.8
Rad. 10	7.8	6.3	6.5	7.8	6.3	7.0	5.5	4.4	4.7	3.6

Experimento No. 14 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 15 - Datos Básicos**

Fecha: 10/30/990

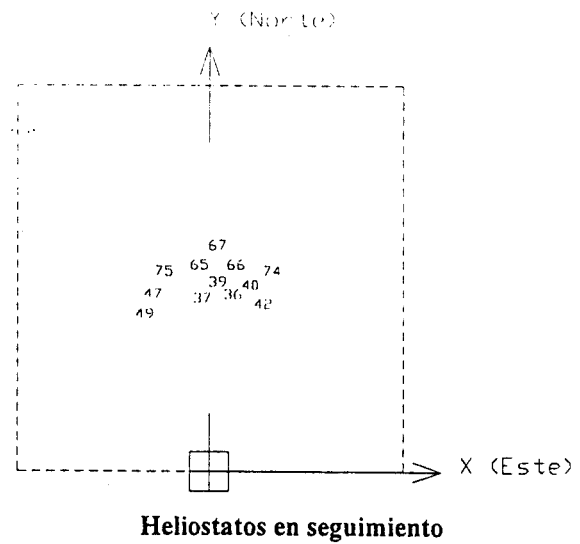
Hora Solar: 13:03

Irradiancia Directa: 975 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 86 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



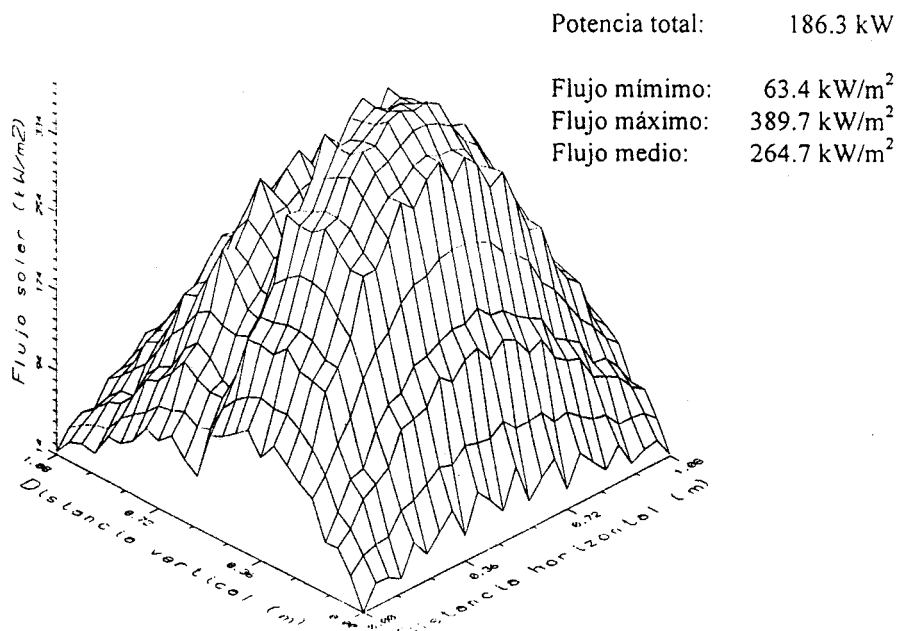
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	17.0	36.9	62.8	81.1	83.5	90.5	83.8	60.5	37.7	23.7
Rad. 2	31.7	66.9	109.8	137.2	142.1	148.3	139.4	101.5	65.5	41.2
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	78.9	154.9	239.6	289.1	304.1	306.9	284.9	216.5	150.4	93.7
Rad. 5	59.0	113.4	171.7	206.5	217.1	217.3	198.0	152.8	110.7	67.7
Rad. 6	113.2	217.0	315.5	373.8	396.5	393.8	354.8	275.8	200.0	122.9
Rad. 7	113.7	215.8	310.7	367.1	391.2	385.7	344.5	266.5	194.7	119.0
Rad. 8	107.0	202.6	289.4	340.9	368.3	359.8	321.6	246.3	178.8	107.6
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	14.1	23.1	35.9	39.3	37.7	34.7	33.0	28.1	21.5	15.8

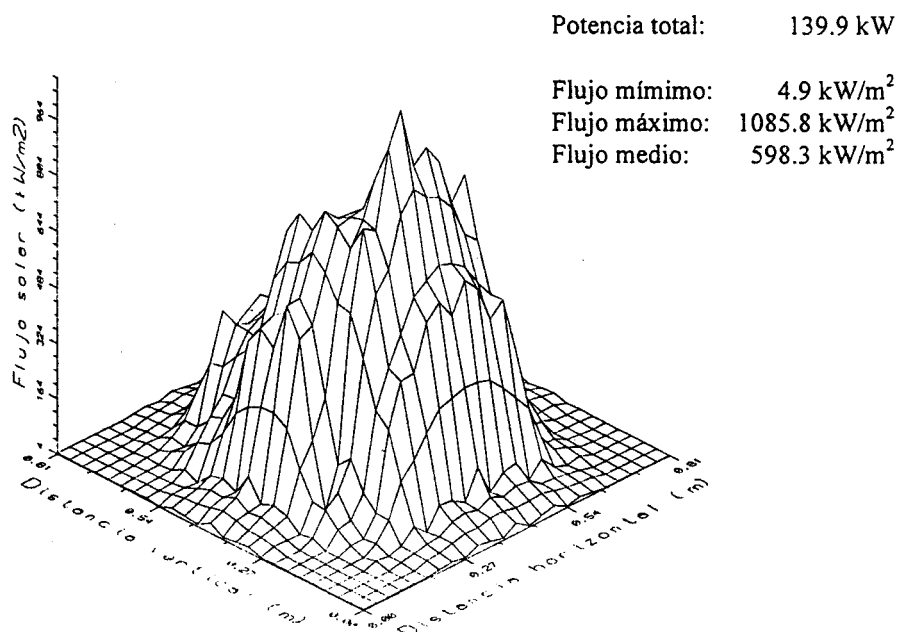
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	6.4	7.0	7.5	9.1	7.5	6.2	6.2	4.8	5.9	5.9
Rad. 2	6.5	8.5	9.0	11.2	11.2	11.2	9.5	5.4	4.6	6.5
Rad. 3	7.2	8.6	12.3	388.5	381.8	423.0	427.5	14.0	4.2	6.1
Rad. 4	5.2	8.1	161.7	332.5	428.0	361.7	314.7	153.2	6.1	4.3
Rad. 5	9.0	18.1	509.7	768.7	618.3	536.9	494.0	447.1	18.4	6.6
Rad. 6	8.8	13.5	634.9	807.6	742.7	604.5	608.9	504.4	12.6	8.5
Rad. 7	9.1	10.3	24.0	801.4	123.1	960.1	810.0	120.8	8.5	8.0
Rad. 8	7.4	8.2	9.1	434.8	623.3	651.5	532.9	10.7	6.9	6.9
Rad. 9	6.2	6.5	6.5	10.0	9.5	8.7	8.1	5.4	6.2	5.9
Rad. 10	7.0	6.8	7.3	8.9	7.6	6.3	6.8	5.5	4.9	4.4

Experimento No. 15 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



**Experimento No. 16 Datos Básicos**

Fecha: 10-30-90

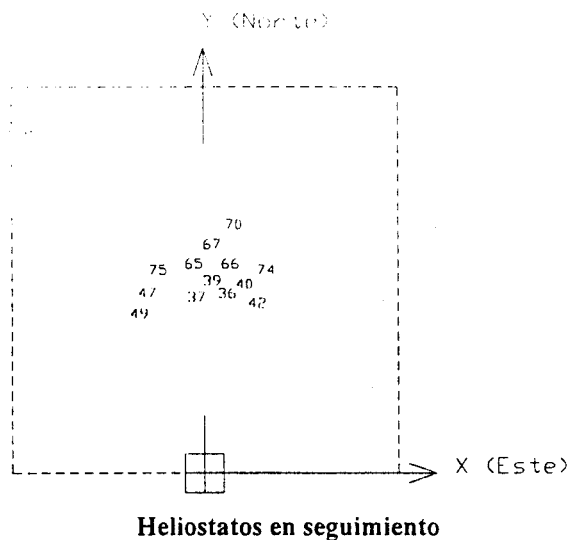
Hora Solar: 13:09

Irradiancia Directa: 975 Wm<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 86 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



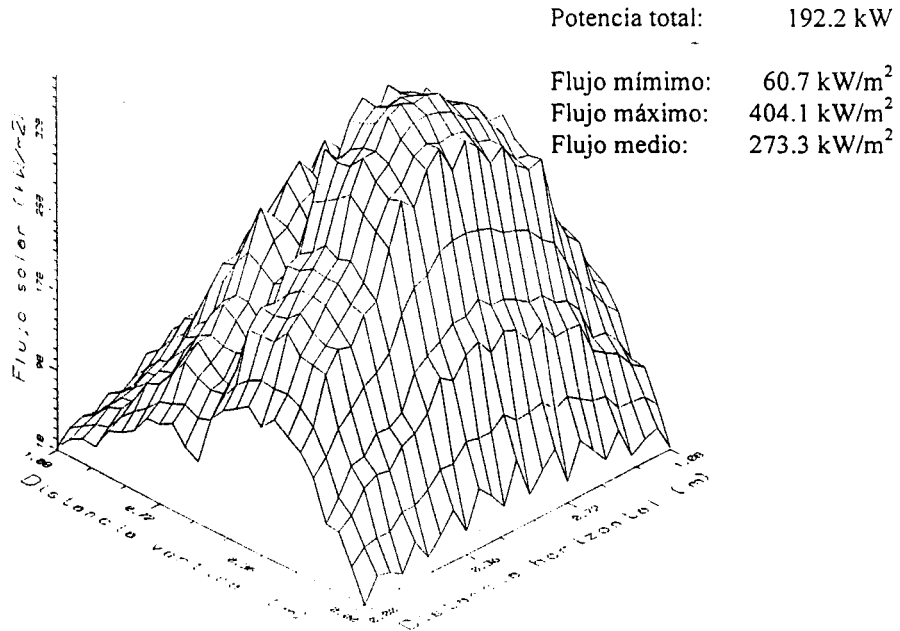
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	21.3	34.8	42.0	64.8	74.4	78.3	73.2	64.6	46.9	29.5
Rad. 2	38.9	64.9	76.5	114.5	130.6	137.4	127.0	113.9	80.8	51.5
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	96.4	161.6	185.8	263.8	296.7	306.4	282.7	255.5	180.8	115.5
Rad. 5	73.4	123.5	138.4	194.1	216.9	219.6	205.6	186.7	131.1	85.8
Rad. 6	142.2	236.7	261.3	364.9	404.6	404.6	374.3	344.2	243.4	158.7
Rad. 7	145.9	241.7	262.5	367.1	405.8	401.2	371.3	343.8	239.9	158.9
Rad. 8	140.2	231.3	249.5	350.6	388.4	382.6	352.7	327.3	225.0	151.2
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	18.2	26.4	31.0	42.0	41.1	39.3	38.8	35.1	26.0	20.1

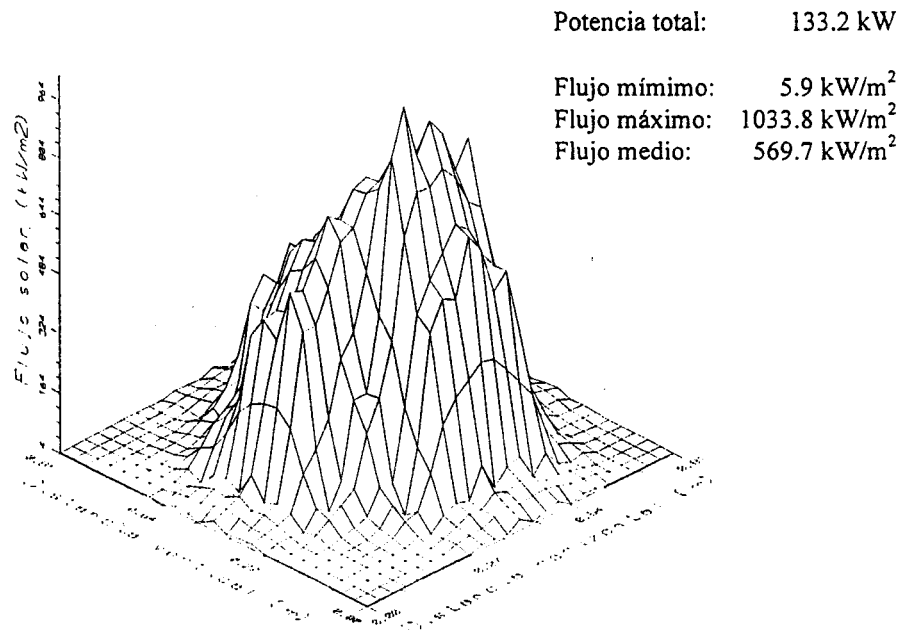
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	5.1	6.4	8.3	5.6	7.5	6.4	6.2	5.6	5.9	7.0
Rad. 2	5.7	7.9	9.5	7.4	11.7	12.0	10.1	7.1	6.0	7.6
Rad. 3	6.1	7.8	13.1	13.1	416.8	465.0	474.8	22.7	5.3	6.4
Rad. 4	4.6	6.1	155.9	191.5	440.3	380.7	329.6	202.3	7.2	4.0
Rad. 5	7.5	10.5	499.7	641.9	645.3	562.4	520.3	556.6	23.5	6.0
Rad. 6	7.6	9.4	637.2	743.9	803.2	654.7	665.3	597.1	18.9	8.8
Rad. 7	6.5	8.8	22.9	304.1	1068.1	979.8	860.4	144.3	9.1	8.0
Rad. 8	6.6	7.4	9.1	9.9	594.6	740.5	568.9	24.8	7.7	6.3
Rad. 9	6.2	5.7	6.2	5.7	9.7	9.7	7.8	6.5	6.5	5.7
Rad. 10	4.9	7.0	6.3	5.2	7.6	7.6	6.0	6.8	5.2	4.2

**Experimento No. 16 - Distribuciones de flujo estimadas**



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 17 - Datos Básicos**

Fecha: 10/30/990

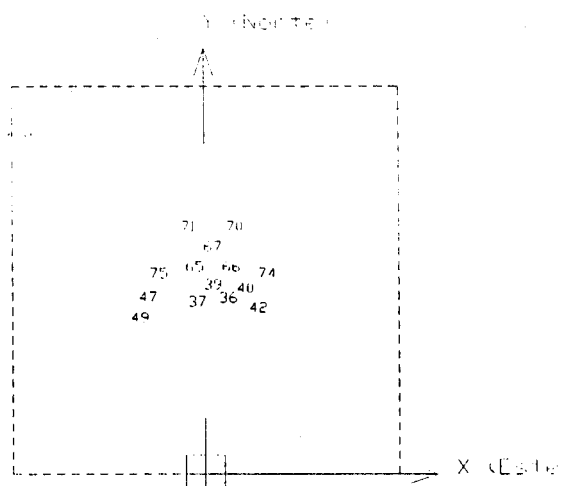
Hora Solar: 13:15

Irradiancia Directa: 975 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 86 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



**Heliostatos en seguimiento**

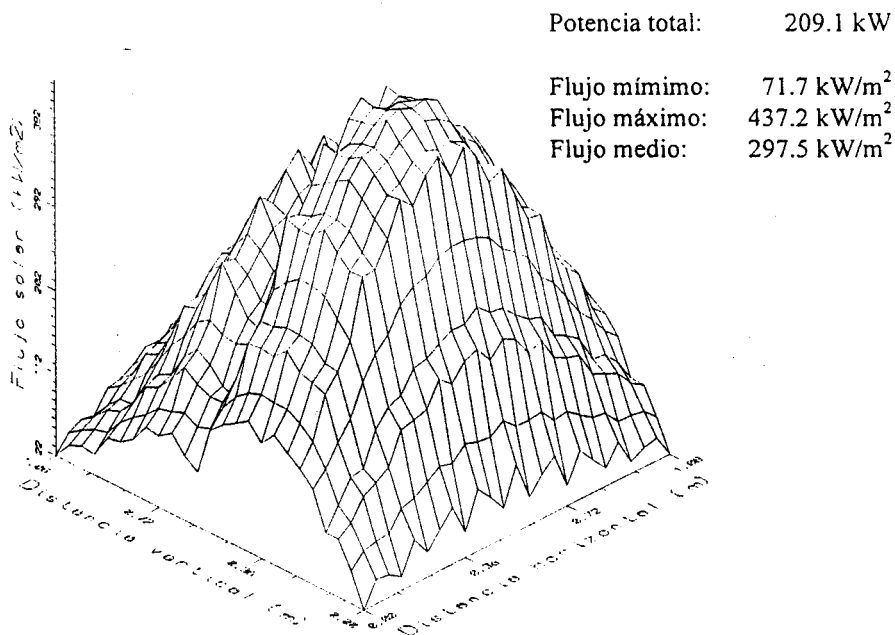
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	22.8	42.3	68.9	82.5	94.8	99.0	88.7	75.5	59.8	43.6
Rad. 2	41.2	74.6	118.4	139.9	160.5	165.0	147.1	122.3	96.9	67.1
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	99.7	174.1	259.4	303.4	340.0	342.8	303.6	251.1	193.9	128.0
Rad. 5	75.9	128.6	189.4	217.6	244.4	244.6	212.7	175.7	135.7	87.8
Rad. 6	145.9	243.6	350.2	405.0	443.6	442.6	388.2	319.4	243.4	158.9
Rad. 7	148.0	243.3	347.2	403.5	438.9	435.7	381.9	312.0	234.5	152.1
Rad. 8	140.2	228.2	327.0	383.8	415.9	412.2	361.0	292.0	215.0	139.0
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	21.5	31.0	44.1	49.5	47.3	45.2	43.3	36.9	29.6	22.6

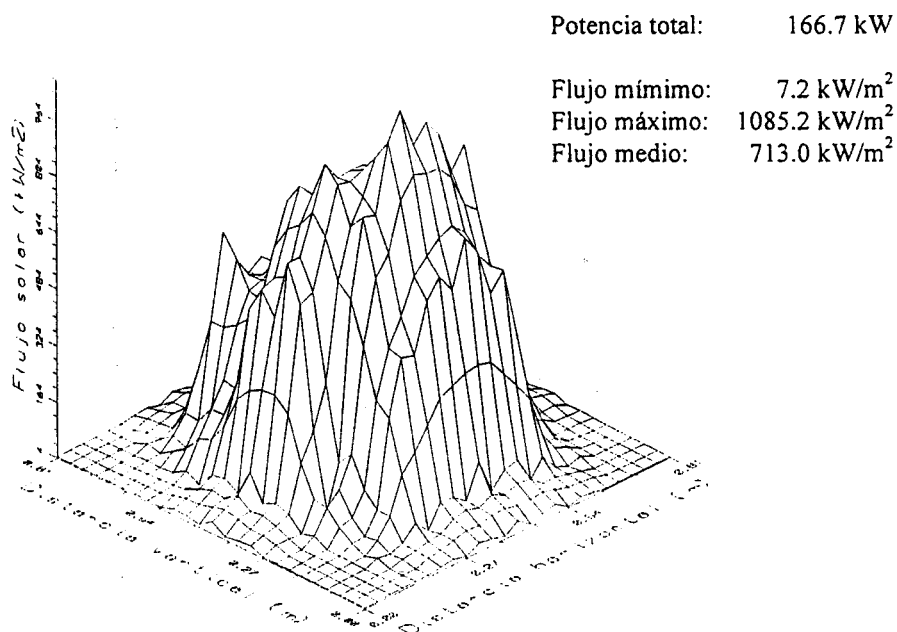
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	7.8	9.7	11.0	9.1	10.5	8.0	7.0	6.2	7.0	7.8
Rad. 2	8.5	11.2	13.1	13.4	13.1	13.4	11.5	9.5	6.8	8.2
Rad. 3	8.6	10.9	15.1	628.2	495.0	555.8	595.4	24.9	5.6	7.0
Rad. 4	7.2	9.9	178.1	450.8	475.0	419.5	404.6	218.1	7.8	4.0
Rad. 5	11.4	14.5	633.8	844.3	679.7	623.5	641.0	595.3	24.5	6.3
Rad. 6	11.2	13.2	771.0	948.2	883.8	747.7	790.5	677.1	19.7	8.8
Rad. 7	8.5	11.1	25.2	832.3	1107.6	1031.4	893.3	141.4	9.7	8.0
Rad. 8	7.1	11.0	12.7	509.7	697.7	780.9	616.4	24.0	8.2	6.6
Rad. 9	7.0	8.9	9.7	12.5	11.9	10.6	8.9	7.6	7.8	5.7
Rad. 10	8.1	10.7	9.7	9.1	10.2	8.6	7.3	7.3	5.7	4.2

Experimento No. 17 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 18 - Datos Básicos**

Fecha: 10/30/990

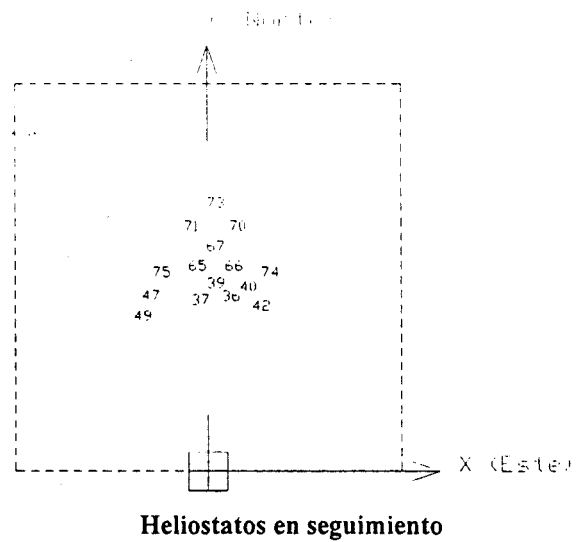
Hora Solar: 13:20

Irradiancia Directa: 975 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 86 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



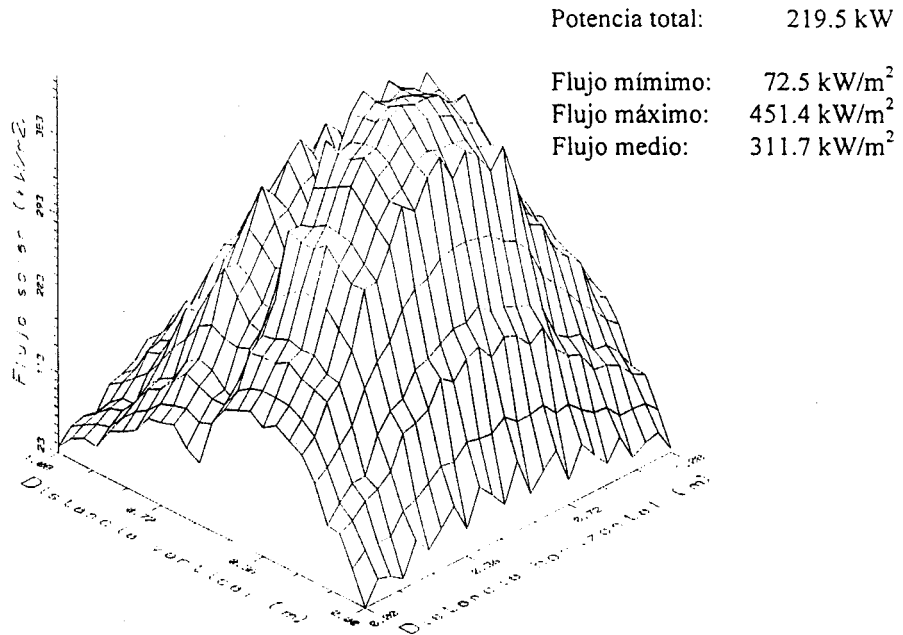
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	30.0	43.5	74.3	93.8	106.9	109.4	110.0	83.8	72.5	53.2
Rad. 2	49.4	72.8	120.4	154.1	175.3	179.0	177.6	133.2	110.8	78.6
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	114.9	165.8	259.1	324.4	361.3	364.0	354.3	261.9	212.1	147.3
Rad. 5	87.0	124.6	189.4	231.8	259.5	260.1	249.0	182.3	149.1	102.1
Rad. 6	166.0	231.5	345.6	419.7	461.0	456.9	440.6	323.0	262.5	181.2
Rad. 7	167.4	230.4	340.8	413.7	453.2	445.8	426.9	310.5	254.7	174.8
Rad. 8	159.7	217.5	321.4	388.7	427.1	417.6	399.1	286.0	236.6	160.8
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	23.1	28.7	47.3	53.8	52.1	50.0	50.0	42.1	33.8	26.8

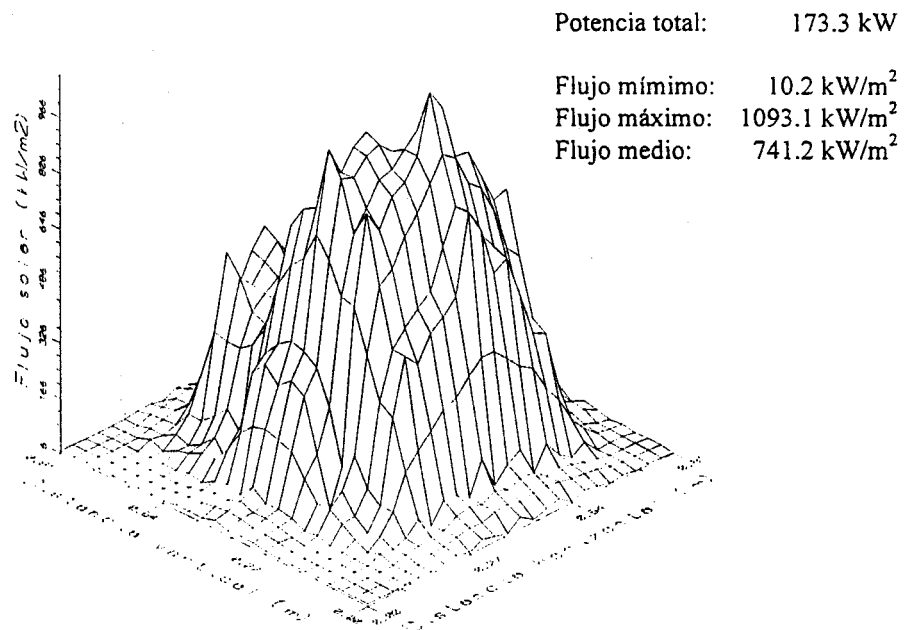
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	13.7	9.7	12.1	10.5	8.6	10.2	8.3	7.0	8.0	8.6
Rad. 2	15.9	11.7	13.7	14.5	13.7	15.3	12.8	9.5	9.0	9.8
Rad. 3	15.1	11.2	13.4	562.3	598.2	509.6	557.0	449.3	7.5	8.1
Rad. 4	12.8	9.0	15.7	379.5	400.8	380.7	383.0	388.3	14.8	5.5
Rad. 5	17.5	13.0	397.5	772.0	760.8	640.7	622.3	660.7	39.6	8.1
Rad. 6	17.4	13.8	374.7	997.2	986.6	843.7	759.8	771.6	41.3	11.8
Rad. 7	15.7	11.4	18.9	837.2	869.6	1121.1	865.8	734.4	12.3	8.8
Rad. 8	13.5	11.0	11.8	512.5	559.7	870.8	637.2	376.7	9.6	8.5
Rad. 9	13.6	9.7	14.1	14.4	11.9	13.0	11.1	9.7	9.5	8.1
Rad. 10	13.9	11.0	12.0	11.5	8.1	9.7	9.1	8.1	7.3	5.5

Experimento No. 18 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 19 - Datos Básicos**

Fecha: 10/30/990

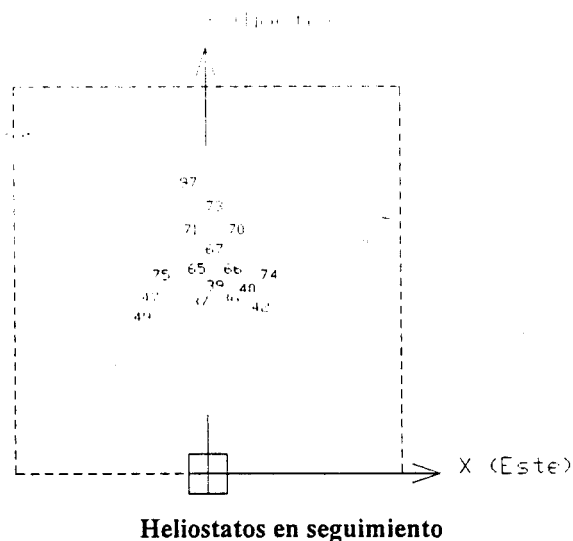
Hora Solar: 13:27

Irradiancia Directa: 975 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 86 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



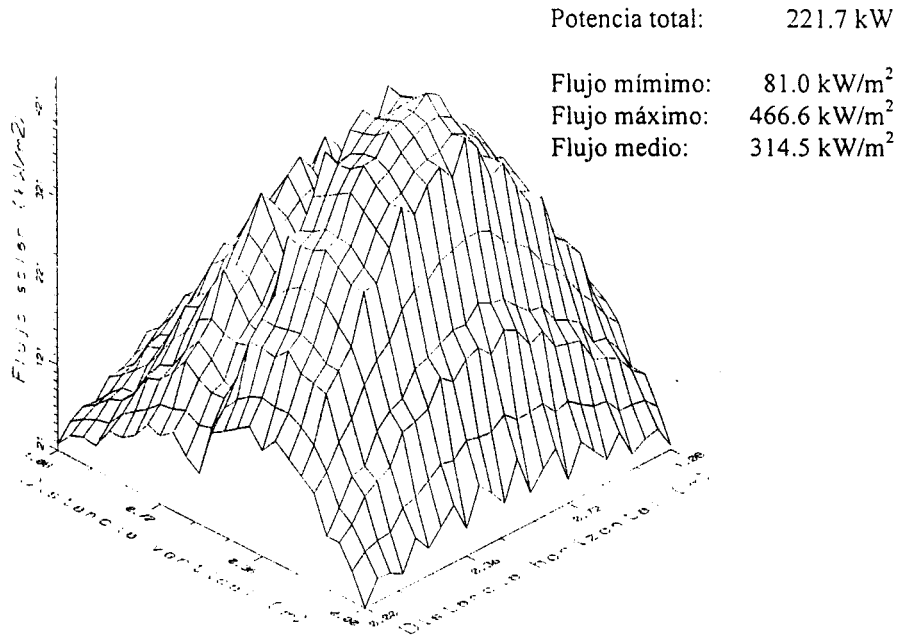
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	28.7	52.8	77.1	101.8	110.4	113.4	99.9	90.1	69.7	50.6
Rad. 2	45.8	85.5	124.6	162.5	175.1	180.0	156.5	136.9	105.0	71.8
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	98.5	188.2	261.5	326.0	351.6	361.7	313.1	271.1	208.4	133.1
Rad. 5	72.1	137.5	187.6	230.8	248.8	254.8	224.7	193.2	150.8	93.8
Rad. 6	140.1	257.9	346.2	420.0	453.4	470.4	408.5	349.5	272.6	169.9
Rad. 7	141.7	254.9	342.4	418.7	449.1	469.5	406.3	346.8	269.7	167.2
Rad. 8	134.6	238.6	323.6	398.9	427.3	451.8	389.7	331.6	254.1	156.3
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	21.1	32.7	48.0	53.0	51.8	47.9	47.1	42.3	32.8	25.5

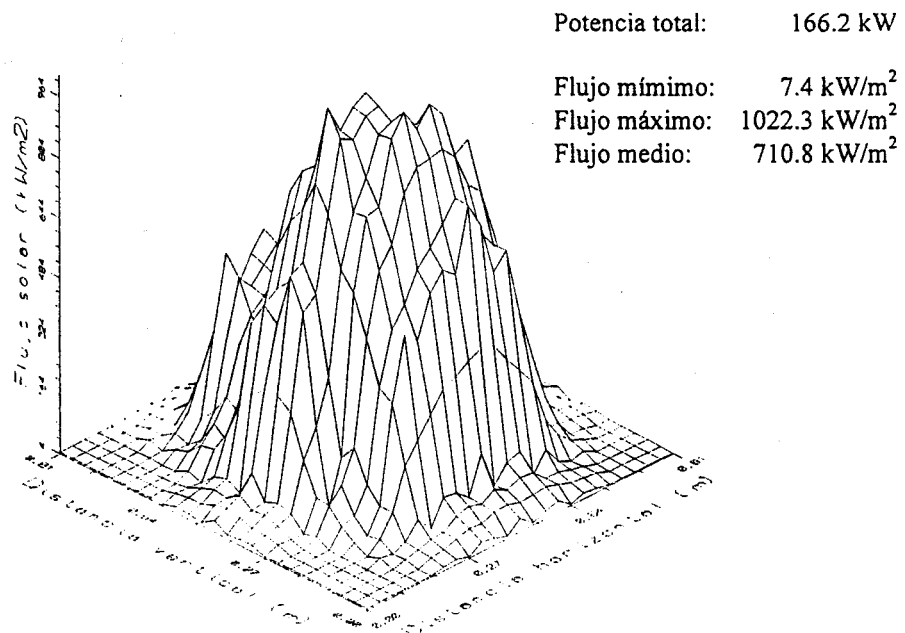
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	8.6	6.7	9.7	8.3	8.0	8.0	8.6	6.2	6.7	7.2
Rad. 2	9.3	7.4	11.2	13.9	15.3	13.9	12.8	7.9	6.8	8.2
Rad. 3	8.9	7.0	15.4	532.0	560.3	498.7	527.8	39.2	6.1	6.7
Rad. 4	8.7	6.7	75.0	312.7	372.2	355.3	351.5	298.9	10.8	4.0
Rad. 5	11.4	8.7	547.5	834.9	824.7	586.3	601.1	588.7	30.2	6.0
Rad. 6	12.1	10.0	681.8	1050.4	1039.8	823.6	789.3	690.1	28.0	9.1
Rad. 7	8.8	6.8	21.7	785.1	1023.4	1008.5	851.5	493.2	10.0	8.0
Rad. 8	9.1	7.1	10.5	541.5	673.9	837.3	633.6	46.1	8.5	8.0
Rad. 9	8.4	7.6	8.9	11.9	10.6	10.8	10.0	8.4	8.4	6.2
Rad. 10	9.7	8.6	8.4	8.4	7.6	7.8	7.6	8.1	5.7	3.9

**Experimento No. 19 - Distribuciones de flujo estimadas**



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



**Experimento No. 20 - Datos Básicos**

Fecha: 10/30/990

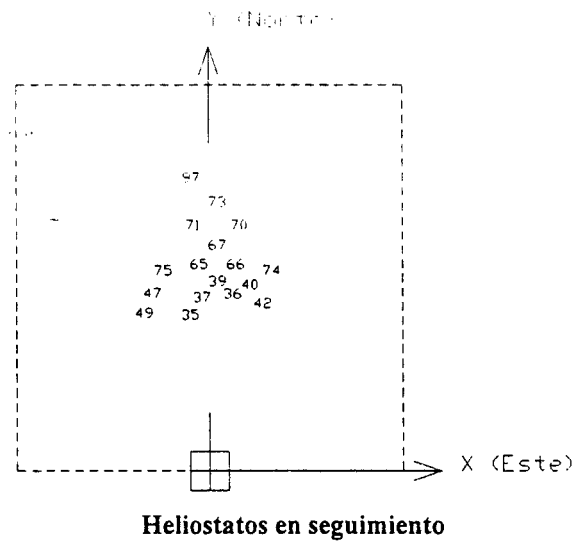
Hora Solar: 13:32

Irradiancia Directa: 968 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 86 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



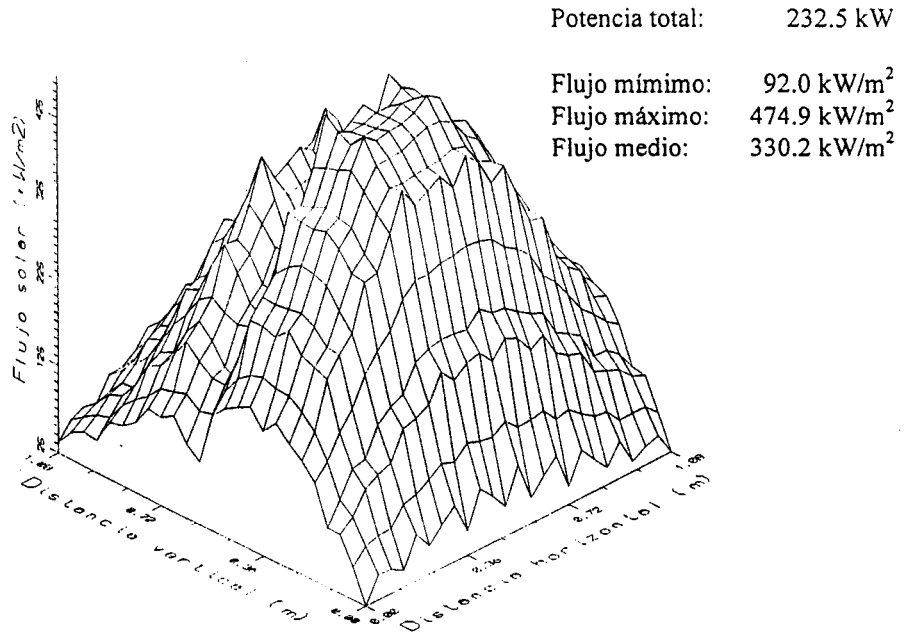
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	36.7	56.5	83.4	109.0	108.8	132.9	112.8	86.8	65.6	49.8
Rad. 2	58.8	95.9	138.0	181.1	179.8	210.0	176.3	136.9	100.6	73.4
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	127.3	216.9	296.7	377.2	369.3	406.0	343.3	270.2	201.1	141.8
Rad. 5	92.1	155.9	212.0	264.6	257.5	279.6	238.0	186.5	140.4	99.6
Rad. 6	173.9	288.8	381.4	476.2	466.8	493.9	430.3	339.6	255.1	182.6
Rad. 7	172.0	283.8	369.2	460.9	453.3	475.0	420.2	331.1	248.4	179.5
Rad. 8	159.9	264.1	339.2	427.5	421.5	436.1	395.0	309.2	228.7	167.0
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	25.1	39.2	54.6	54.5	53.7	47.9	45.9	39.7	31.7	25.3

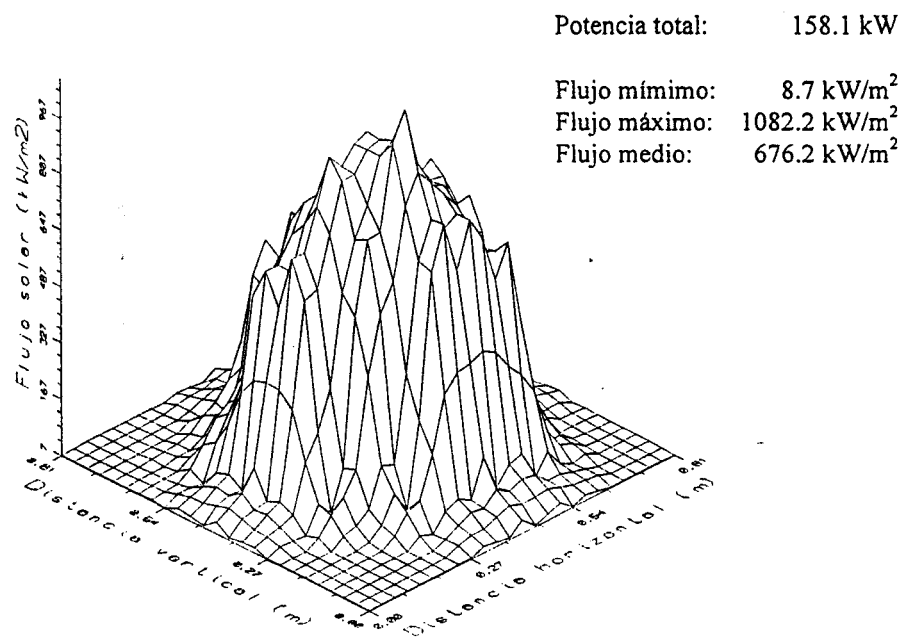
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	7.5	10.2	9.4	9.4	10.5	9.4	8.9	7.0	8.0	8.3
Rad. 2	8.2	11.2	11.2	13.1	14.8	15.0	14.8	15.0	8.2	9.0
Rad. 3	8.4	10.9	16.2	59.1	567.1	605.5	609.9	24.9	7.8	8.1
Rad. 4	7.5	10.5	176.9	267.7	371.9	371.4	362.6	262.7	11.9	7.5
Rad. 5	10.5	20.5	694.3	788.4	743.9	639.5	636.5	599.0	26.3	9.3
Rad. 6	10.9	16.5	778.7	965.3	992.8	851.9	809.1	695.4	19.1	11.8
Rad. 7	8.3	8.3	22.9	765.3	1107.0	820.0	658.8	108.5	12.0	10.3
Rad. 8	9.9	9.9	11.3	29.0	886.0	841.7	704.9	21.8	10.2	9.6
Rad. 9	9.2	10.0	8.9	11.4	12.7	11.9	12.2	9.5	10.8	9.7
Rad. 10	7.8	9.7	8.4	10.2	8.9	8.1	8.6	9.4	8.4	6.5

**Experimento No. 20 - Distribuciones de flujo estimadas**



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 21 - Datos Básicos**

Fecha: 10/30/990

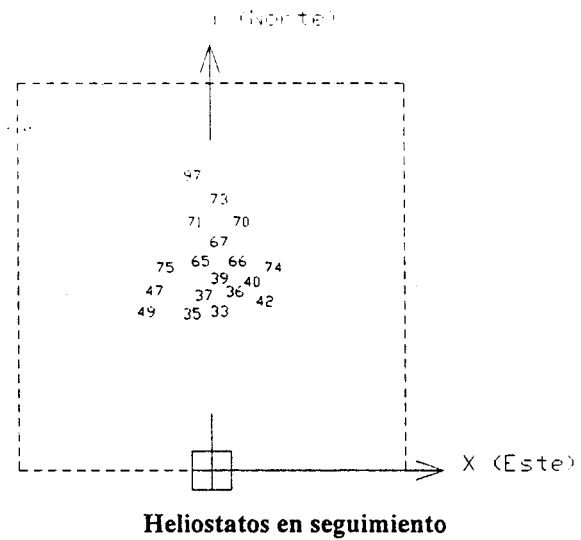
Hora Solar: 13:37

Irradiancia Directa: 960 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 86 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



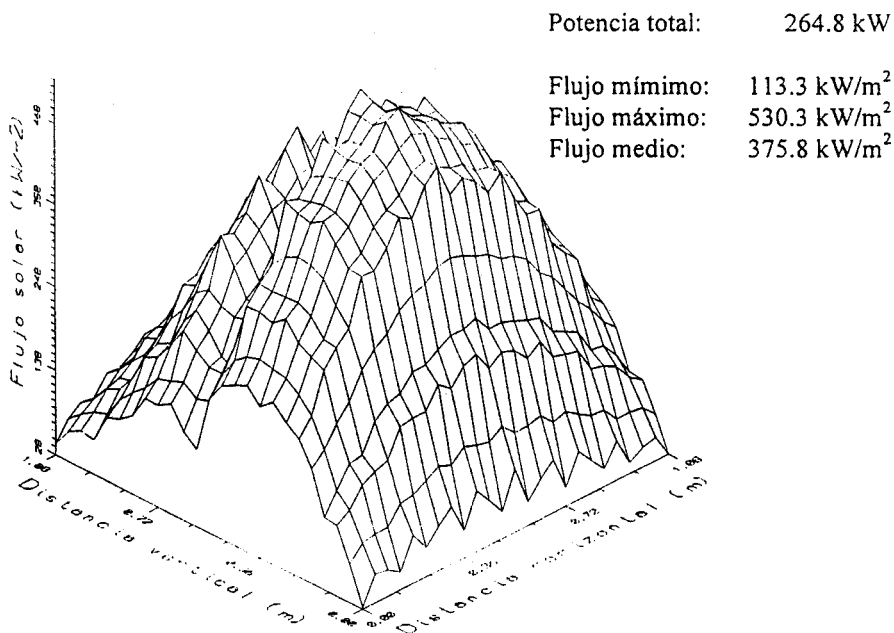
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	41.7	73.1	96.4	111.2	142.3	136.0	125.7	110.7	84.1	52.2
Rad. 2	68.6	120.1	161.5	186.7	227.1	215.0	200.6	172.6	131.0	82.3
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	160.3	262.6	349.5	395.4	446.1	419.1	394.7	334.1	258.0	165.3
Rad. 5	120.7	191.8	250.1	279.4	310.2	290.5	276.3	231.3	180.1	116.0
Rad. 6	228.2	346.3	446.4	497.3	551.2	514.0	486.1	408.7	321.5	207.4
Rad. 7	226.6	336.1	431.0	479.9	532.8	493.0	467.6	391.2	308.1	198.6
Rad. 8	210.1	308.5	394.0	440.0	492.4	452.8	433.6	361.3	283.1	181.5
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	30.3	44.3	62.2	64.4	55.8	51.7	51.8	45.5	35.7	27.8

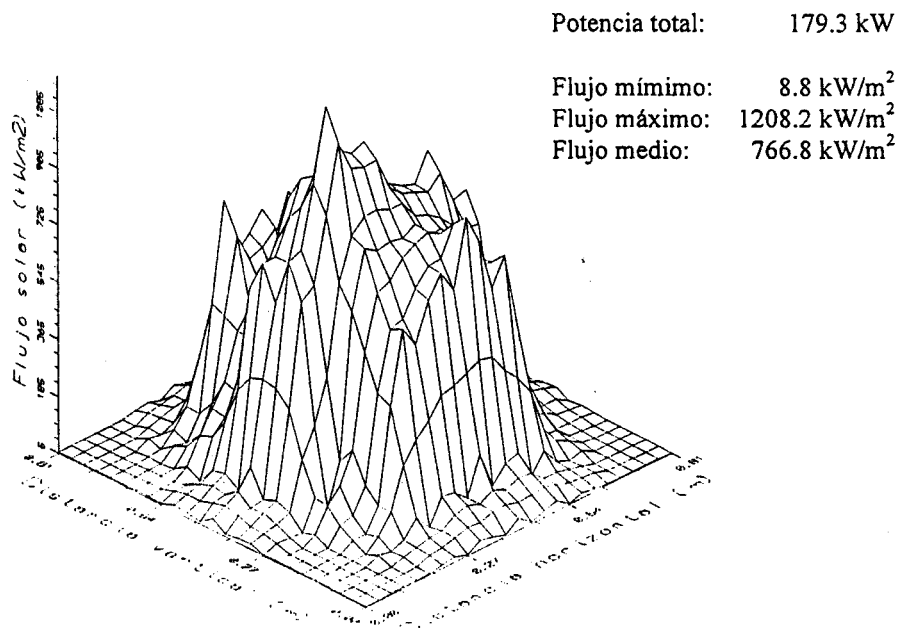
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	9.4	9.1	11.0	10.2	9.9	11.3	8.9	7.5	9.7	10.5
Rad. 2	10.1	10.1	12.6	17.2	17.5	17.2	14.8	9.8	9.8	10.9
Rad. 3	9.5	9.5	18.2	796.1	714.2	725.7	782.1	49.0	8.4	9.8
Rad. 4	9.3	9.9	172.5	340.4	369.6	386.2	445.2	361.1	15.4	8.7
Rad. 5	11.7	11.4	787.4	949.9	612.3	497.9	556.6	613.5	70.7	39.3
Rad. 6	12.1	12.1	838.9	1246.2	1075.2	872.3	927.2	783.7	28.9	12.9
Rad. 7	6.3	6.8	24.9	814.9	777.6	738.1	670.8	235.1	15.1	9.7
Rad. 8	8.8	8.8	12.9	655.1	788.4	950.9	729.8	41.4	10.2	8.8
Rad. 9	8.4	8.7	11.4	14.9	11.9	12.2	10.3	10.8	10.6	8.4
Rad. 10	8.4	9.4	9.9	9.4	8.1	8.4	7.3	8.9	7.6	5.2

Experimento No. 21 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 22 - Datos Básicos**

Fecha: 10/30/990

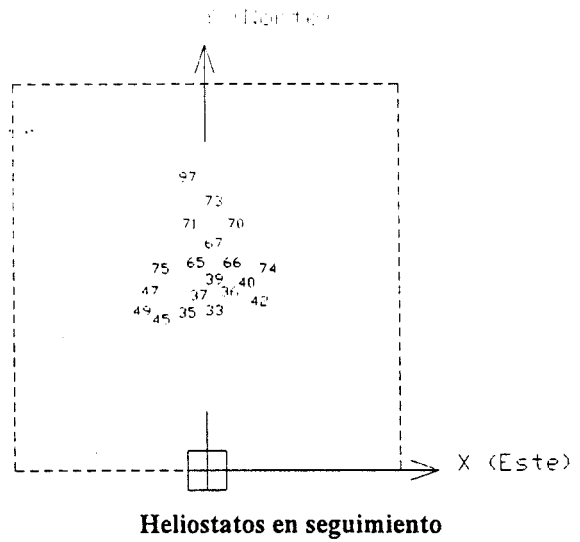
Hora Solar: 13:42

Irradiancia Directa: 968 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 86 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



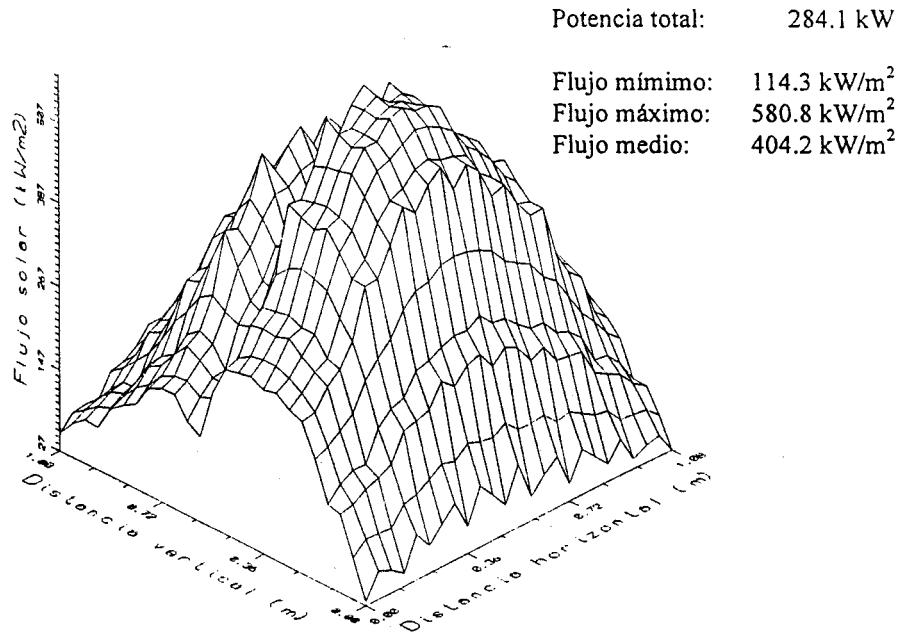
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	52.4	68.2	109.3	137.1	141.3	144.8	123.9	110.9	82.8	60.6
Rad. 2	86.7	114.2	182.5	225.8	234.2	238.0	203.5	180.6	129.3	92.2
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	195.3	250.8	383.4	459.2	480.4	477.2	410.3	364.5	252.7	171.5
Rad. 5	144.4	180.7	266.8	318.9	337.5	330.8	284.1	254.6	171.0	114.2
Rad. 6	270.5	335.5	479.1	569.4	601.5	586.1	504.4	445.6	307.9	202.3
Rad. 7	268.1	326.0	456.3	543.1	577.5	560.6	483.5	425.0	296.1	189.9
Rad. 8	250.8	298.8	412.5	492.9	528.9	513.3	447.4	393.6	273.8	172.7
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	33.2	38.7	61.1	65.8	59.8	53.0	51.6	47.2	35.3	26.9

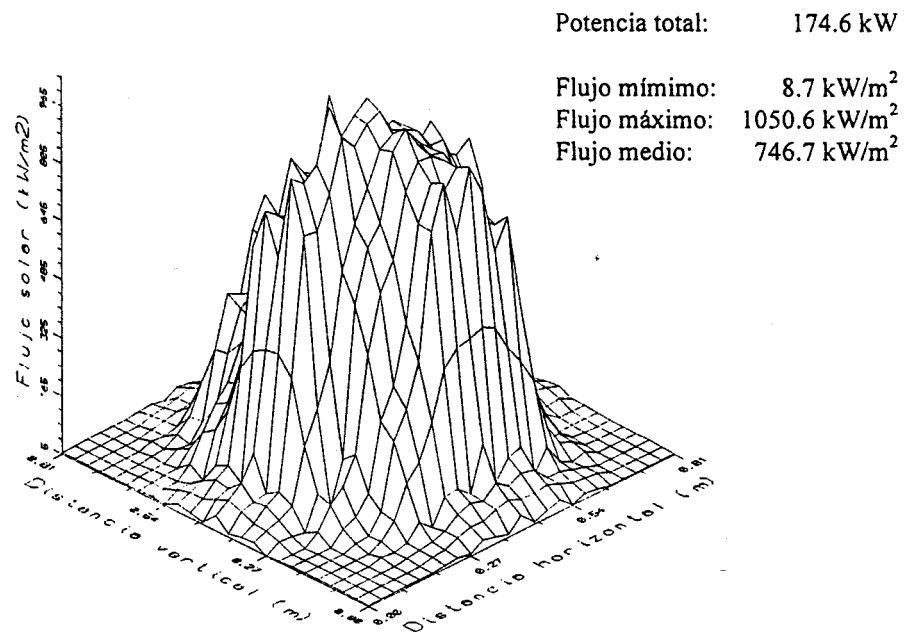
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	8.9	11.6	10.2	10.5	11.0	9.4	9.7	7.5	8.3	9.7
Rad. 2	9.8	11.7	12.3	15.6	18.3	18.3	17.2	10.4	8.2	10.6
Rad. 3	9.5	11.7	18.5	413.4	672.5	738.9	855.5	27.1	7.2	9.8
Rad. 4	8.4	11.9	195.3	309.7	375.2	385.7	416.9	294.0	11.0	7.0
Rad. 5	7.2	21.7	849.8	679.7	522.1	596.9	579.3	527.0	50.2	32.9
Rad. 6	10.9	19.4	1002.6	1076.1	1073.7	946.1	888.0	857.8	23.9	16.2
Rad. 7	4.8	5.4	22.6	712.6	999.9	877.0	756.4	99.9	12.3	15.1
Rad. 8	11.0	9.6	12.7	323.9	974.7	974.7	748.0	19.6	9.3	9.1
Rad. 9	10.8	10.3	11.4	15.2	13.3	11.6	10.6	9.2	9.2	8.9
Rad. 10	9.4	9.9	10.2	11.8	8.6	7.0	7.6	7.8	6.5	6.0

Experimento No. 22 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 23 - Datos Básicos**

Fecha: 10/30/990

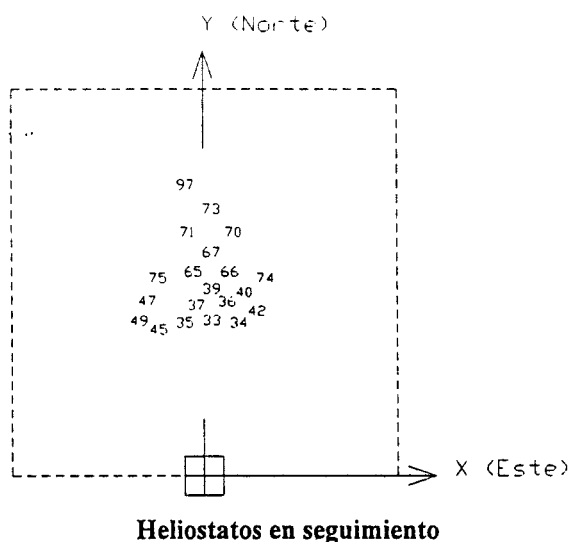
Hora Solar: 13:47

Irradiancia Directa: 962 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 86 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



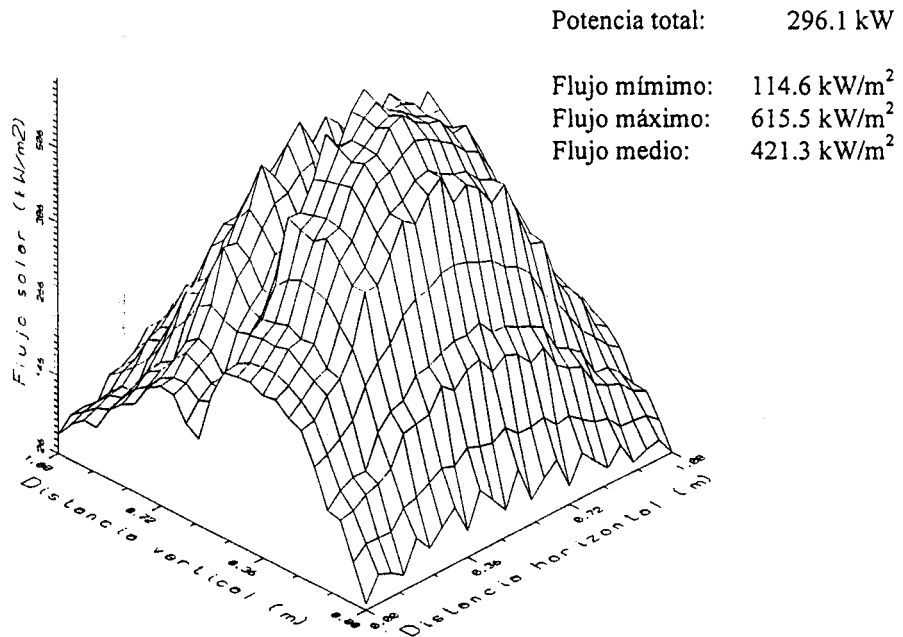
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	54.2	67.3	108.7	140.6	160.9	165.8	166.9	127.1	82.3	57.7
Rad. 2	92.1	113.2	179.3	233.0	263.9	265.4	261.5	199.6	130.0	88.9
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	209.8	253.9	385.9	477.9	524.7	510.8	490.8	375.1	250.6	164.6
Rad. 5	151.3	181.6	275.2	332.4	358.6	345.2	329.1	249.3	169.5	108.9
Rad. 6	282.6	337.0	493.1	587.0	639.0	607.0	573.7	432.5	298.0	195.2
Rad. 7	275.5	328.2	474.6	559.7	608.5	572.5	539.1	404.6	280.1	185.2
Rad. 8	253.1	300.1	432.4	507.4	553.9	516.2	485.1	364.9	254.1	169.8
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	34.6	41.1	63.8	65.8	57.6	53.1	53.2	46.0	33.7	25.6

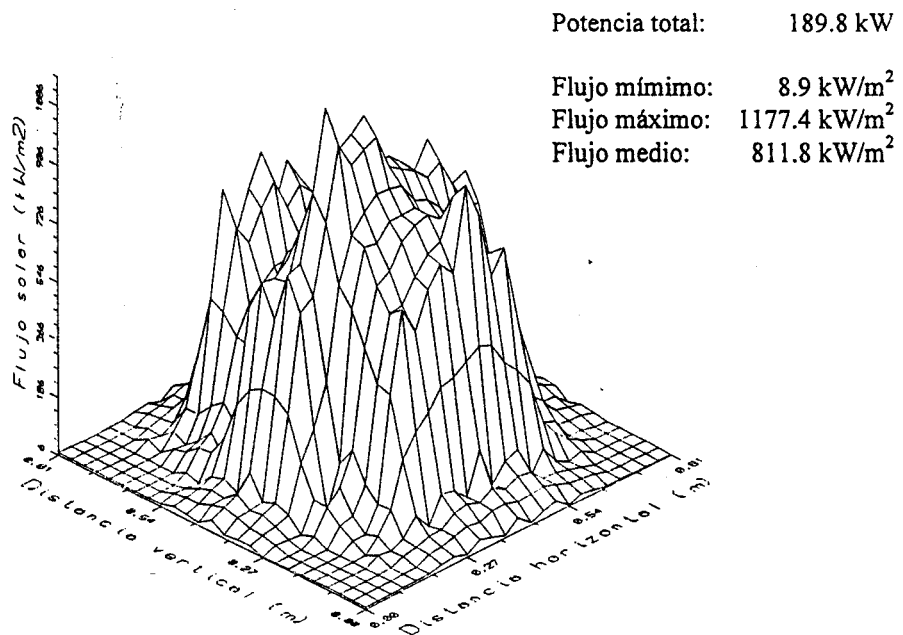
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	14.0	9.7	14.0	14.2	11.8	12.4	10.5	9.1	9.9	11.3
Rad. 2	14.5	10.6	14.8	20.0	19.7	20.5	17.2	12.8	10.6	12.8
Rad. 3	13.1	9.8	18.2	826.4	916.6	828.9	817.4	309.4	10.6	10.6
Rad. 4	14.8	11.3	28.0	366.1	379.2	419.5	443.8	427.7	17.2	8.4
Rad. 5	13.9	10.8	723.3	711.8	680.7	549.4	560.2	552.4	84.4	21.1
Rad. 6	14.4	12.9	791.4	1218.1	1153.8	955.9	947.0	844.3	45.4	34.2
Rad. 7	6.3	6.0	19.7	814.3	846.4	763.0	633.3	535.0	23.4	11.1
Rad. 8	11.8	9.1	14.3	715.7	811.0	1063.4	748.6	88.4	11.0	9.1
Rad. 9	13.8	10.8	16.5	20.1	15.2	16.3	12.7	13.0	11.9	8.7
Rad. 10	13.1	11.5	15.4	13.6	9.4	10.2	9.1	9.9	8.4	5.5

Experimento No. 23 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



**Experimento No. 24 - Datos Básicos**

Fecha: 10/30/990

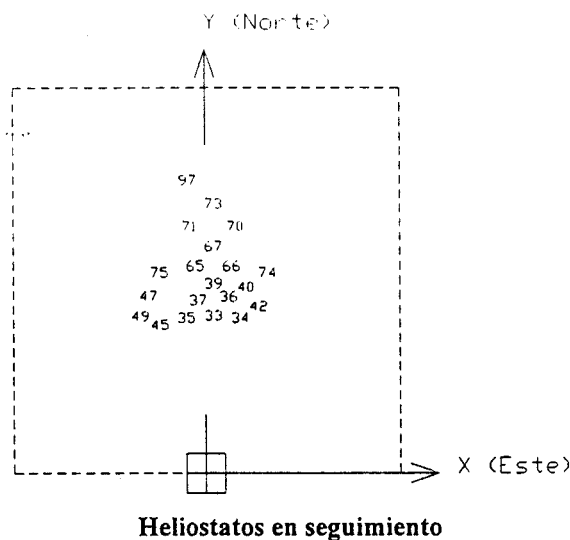
Hora Solar: 13:51

Irradiancia Directa: 957 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 86 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



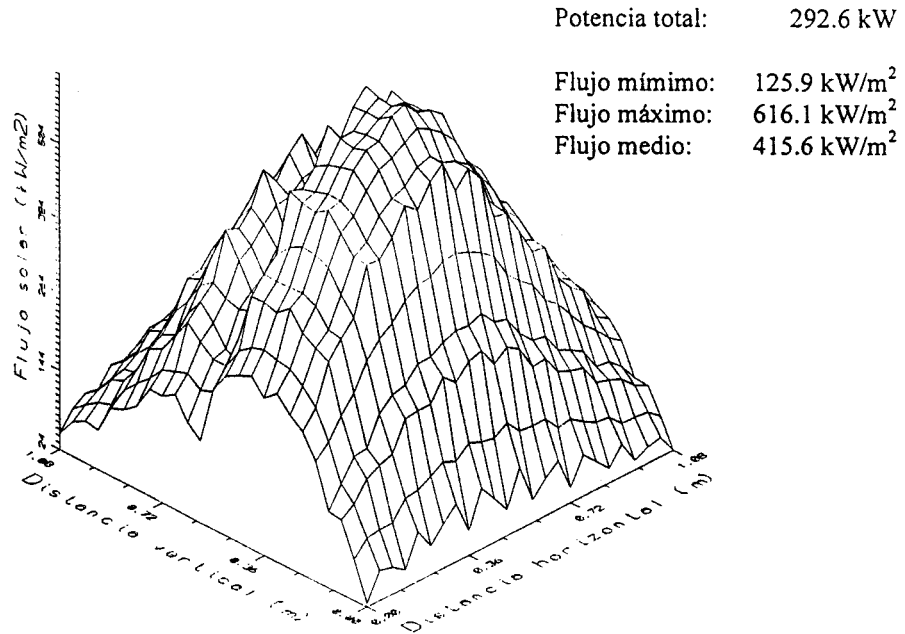
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	47.6	82.2	108.4	124.7	142.8	158.1	141.5	107.0	88.4	64.0
Rad. 2	78.5	136.7	183.3	212.3	236.2	245.2	220.7	164.4	133.2	92.7
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	185.9	305.3	406.2	462.7	498.6	484.4	424.4	319.8	245.1	166.5
Rad. 5	139.5	219.3	289.2	326.8	352.8	333.5	286.1	220.7	165.9	113.8
Rad. 6	266.1	407.8	529.9	593.5	638.0	608.2	504.6	398.6	293.9	198.7
Rad. 7	263.0	395.2	513.0	573.4	619.7	589.1	475.9	383.3	281.7	190.1
Rad. 8	242.9	360.5	468.6	524.9	570.8	540.0	429.0	350.3	260.7	175.0
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	29.8	43.5	61.9	62.4	53.9	49.0	46.7	41.1	32.6	24.1

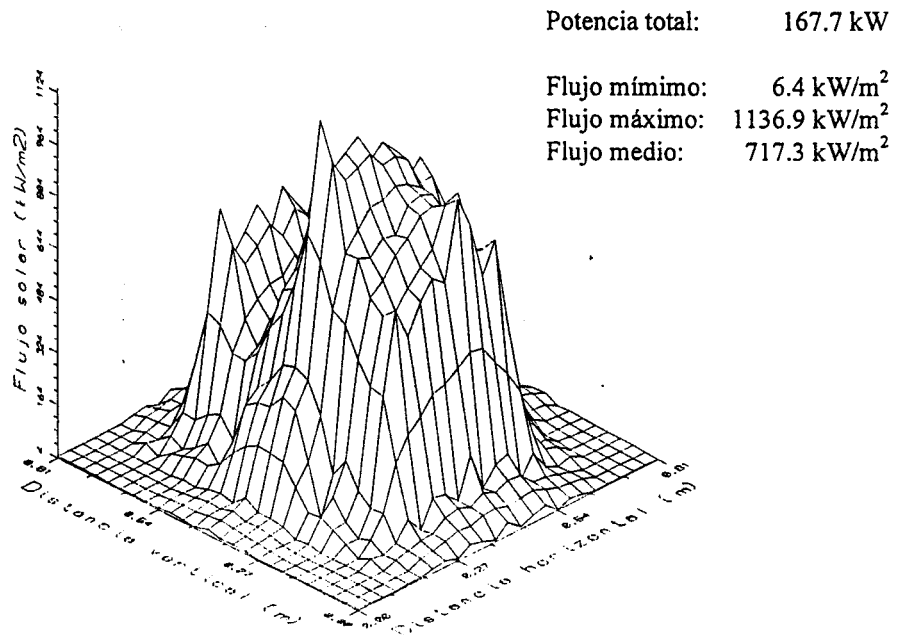
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	9.7	7.2	9.9	11.6	9.4	11.3	9.9	8.0	8.9	11.0
Rad. 2	9.8	7.9	11.5	19.1	18.6	20.5	16.7	10.9	10.4	11.2
Rad. 3	8.4	8.1	13.1	761.0	729.1	746.7	767.8	23.8	10.9	10.0
Rad. 4	9.9	9.6	18.9	344.5	351.5	376.6	396.2	278.2	22.4	7.8
Rad. 5	7.8	9.3	293.7	573.0	827.1	599.9	551.2	519.7	78.0	25.1
Rad. 6	11.2	9.4	352.9	1185.7	1067.8	1006.4	890.9	776.6	54.0	14.7
Rad. 7	5.1	4.5	10.5	770.2	771.3	867.6	696.8	102.2	22.6	9.7
Rad. 8	8.2	6.6	10.5	709.9	750.8	997.9	773.2	12.9	11.6	9.1
Rad. 9	8.9	7.8	12.7	17.6	13.8	16.0	12.5	9.2	11.4	7.8
Rad. 10	9.1	7.0	9.9	9.7	7.3	8.1	6.0	6.0	7.3	3.9

Experimento No. 24 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 25 - Datos Básicos**

Fecha: 10/30/990

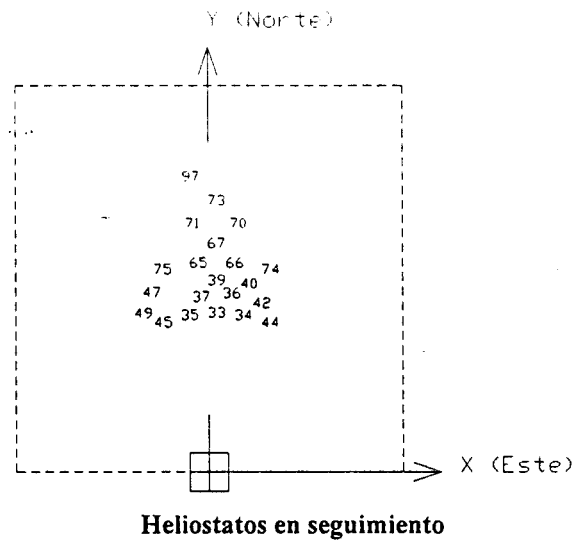
Hora Solar: 15:00

Irradiancia Directa: 908 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 86 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



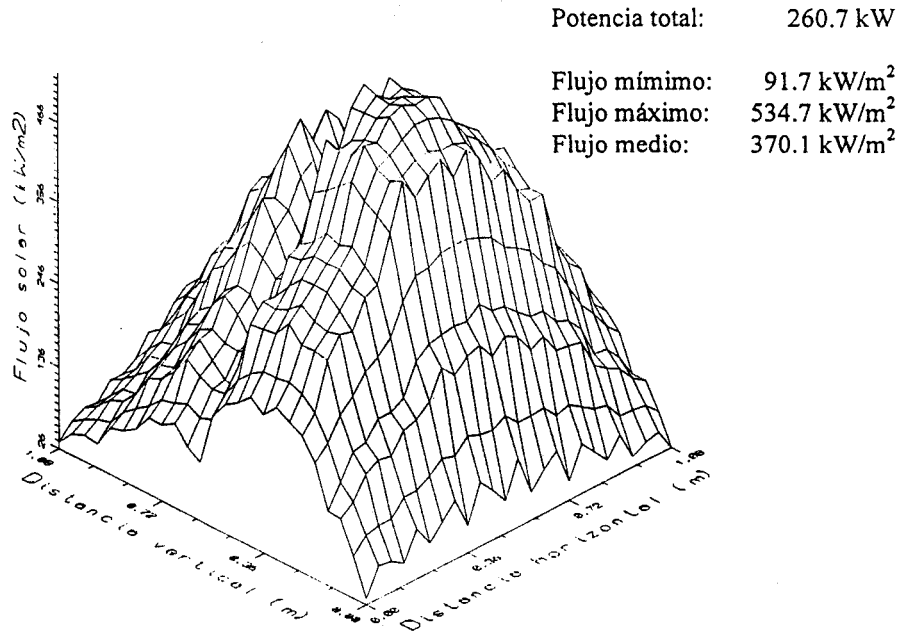
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	34.8	59.7	81.3	116.7	151.8	152.4	140.3	121.2	89.8	62.1
Rad. 2	55.0	97.6	126.6	178.8	235.2	234.3	214.0	185.8	136.9	93.9
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	127.3	218.4	260.1	359.9	454.1	447.7	393.3	347.2	250.2	167.6
Rad. 5	95.2	162.6	185.9	256.8	308.7	303.6	262.6	232.6	168.6	112.9
Rad. 6	196.6	321.5	360.0	495.5	554.5	546.2	474.3	422.7	300.1	195.6
Rad. 7	209.5	331.7	366.2	502.3	532.9	528.0	459.5	408.6	285.9	182.5
Rad. 8	206.7	326.8	354.5	490.2	495.5	492.7	432.4	381.1	259.3	164.2
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	34.3	49.2	59.1	62.2	60.3	53.9	50.8	46.9	33.5	26.0

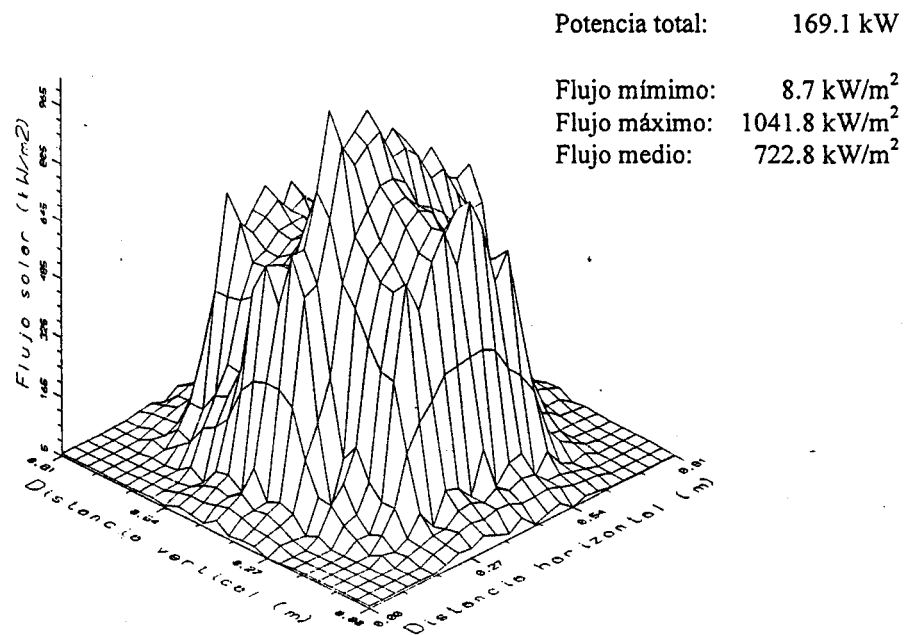
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	11.8	10.2	12.4	10.7	10.7	10.2	9.7	8.3	8.6	11.0
Rad. 2	12.6	11.5	14.2	18.3	20.2	21.1	16.1	10.9	8.2	11.7
Rad. 3	11.7	10.9	20.1	715.1	694.0	662.7	665.2	58.5	9.8	10.9
Rad. 4	11.0	9.9	216.0	518.2	558.2	450.8	442.3	358.2	14.0	10.2
Rad. 5	11.7	11.1	680.0	507.3	564.5	522.4	502.2	564.5	52.9	23.9
Rad. 6	12.1	11.5	753.9	1081.7	1037.7	940.8	816.8	772.8	31.3	15.0
Rad. 7	4.8	4.0	34.6	679.4	799.4	589.7	550.8	244.3	13.4	9.4
Rad. 8	11.6	10.2	13.8	701.8	817.9	877.4	650.4	41.4	9.1	8.8
Rad. 9	12.5	11.6	13.3	16.5	13.6	12.2	10.3	10.6	10.6	9.7
Rad. 10	12.6	12.6	12.0	32.0	15.7	5.7	5.2	8.1	5.7	5.2

Experimento No. 25 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 26 - Datos Básicos**

Fecha: 10/31/990

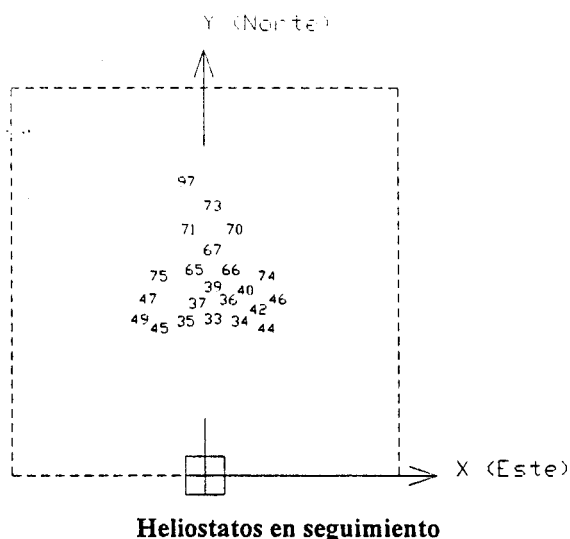
Hora Solar: 13:09

Irradiancia Directa: 953 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 85 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



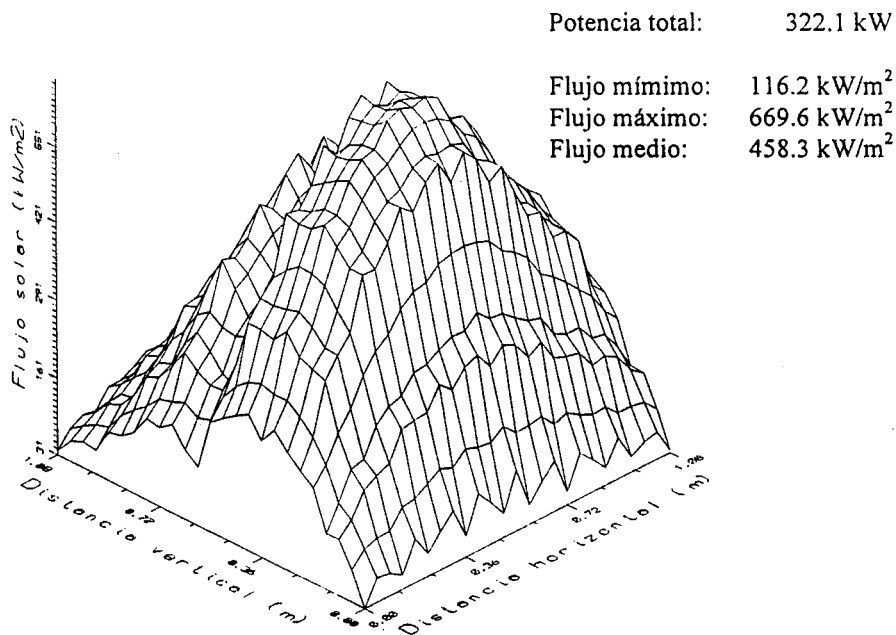
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	37.4	69.1	101.0	112.4	137.0	143.4	136.0	101.6	92.5	59.8
Rad. 2	65.5	122.8	174.6	195.2	233.3	240.9	221.9	168.4	148.6	94.4
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	163.2	295.3	399.8	450.4	514.5	522.6	471.2	365.4	317.2	197.2
Rad. 5	119.8	216.0	287.4	325.3	362.1	370.1	332.0	259.4	226.6	140.6
Rad. 6	230.5	414.7	542.0	616.0	684.6	686.9	617.1	486.8	427.8	263.2
Rad. 7	227.1	410.9	538.0	613.4	672.4	670.4	601.8	476.1	421.5	260.7
Rad. 8	206.5	378.7	502.1	573.8	624.3	622.8	557.5	445.6	395.7	246.1
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	30.5	46.0	61.3	65.6	60.1	52.2	52.2	52.2	48.5	34.9

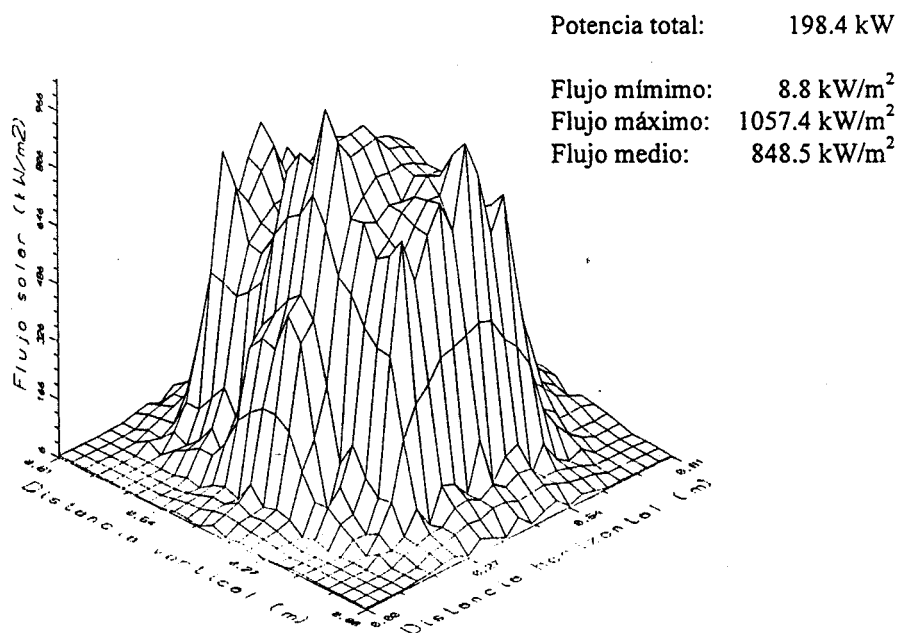
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	12.6	9.9	11.8	14.2	12.9	13.7	12.4	11.3	13.2	14.8
Rad. 2	12.3	10.1	13.9	23.3	23.8	24.6	20.5	17.2	14.5	16.7
Rad. 3	11.7	10.0	17.9	851.6	909.6	775.3	772.0	469.8	16.2	15.4
Rad. 4	7.5	6.4	28.3	569.6	554.1	500.1	447.0	454.9	20.1	9.9
Rad. 5	9.6	9.9	458.9	918.1	904.5	870.9	619.8	681.6	120.1	35.6
Rad. 6	13.2	10.6	580.5	1085.2	973.3	901.6	754.2	706.1	150.9	63.4
Rad. 7	6.3	5.4	18.0	796.2	788.5	834.9	700.9	551.1	86.5	30.0
Rad. 8	13.8	10.5	14.0	849.5	912.2	1073.7	824.0	120.2	17.4	36.2
Rad. 9	11.9	8.9	20.1	23.1	17.1	16.0	14.4	16.3	14.9	12.5
Rad. 10	12.3	9.7	17.8	14.1	8.9	11.2	12.0	9.4	9.7	7.0

Experimento No. 26 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 27 - Datos Básicos**

Fecha: 10/31/990

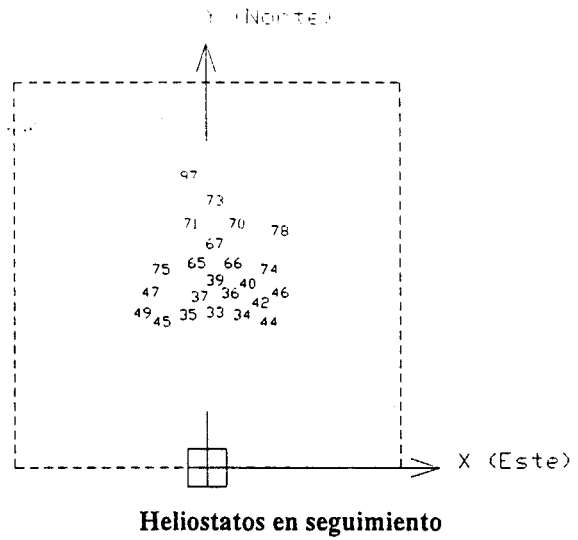
Hora Solar: 13:16

Irradiancia Directa: 945 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 85 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



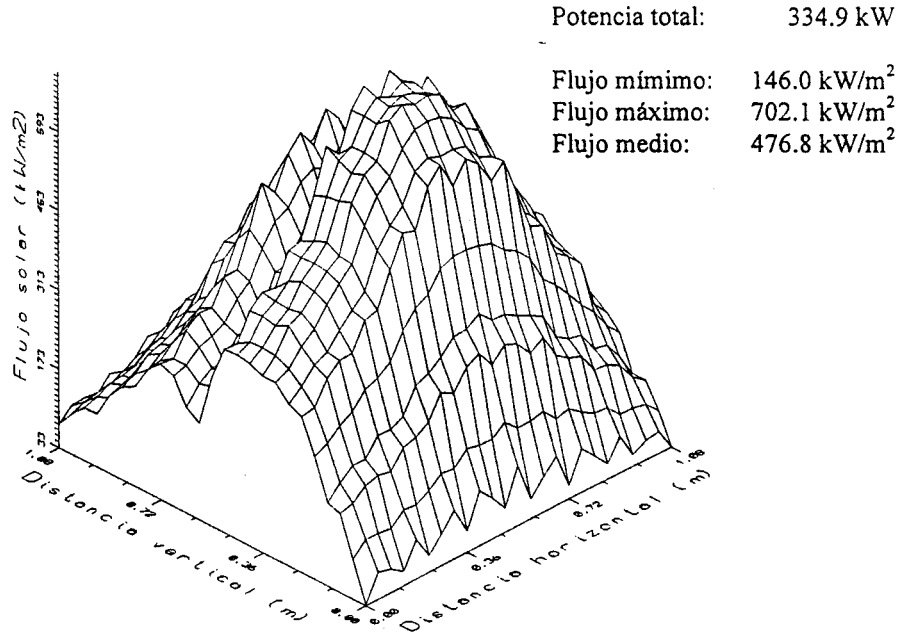
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	73.3	88.6	107.0	139.6	167.6	176.1	163.7	124.6	107.4	56.7
Rad. 2	121.9	150.4	175.4	234.0	274.1	288.3	263.7	197.9	168.1	89.5
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	272.8	333.6	374.6	501.4	567.1	587.6	535.5	397.4	333.1	178.2
Rad. 5	192.1	234.4	259.9	348.4	390.5	401.6	368.8	271.6	231.5	125.3
Rad. 6	357.7	436.7	486.5	636.2	722.7	727.6	672.0	502.6	414.6	231.9
Rad. 7	341.9	419.9	470.4	606.2	700.0	692.5	642.6	480.3	395.9	228.5
Rad. 8	305.4	377.3	425.9	547.3	643.7	627.9	585.9	436.0	361.2	214.0
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	36.0	49.9	54.6	69.9	63.7	55.5	56.4	53.5	46.4	33.2

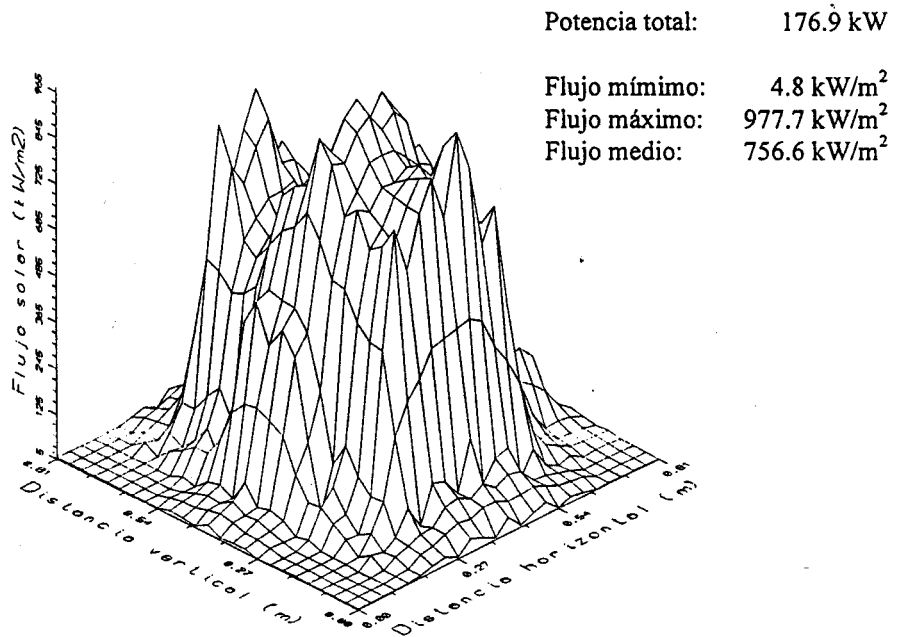
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	9.7	8.0	9.4	11.6	9.7	9.4	8.9	9.1	9.9	11.8
Rad. 2	10.1	8.5	11.2	21.9	22.2	23.3	18.6	14.2	12.0	12.8
Rad. 3	9.8	9.2	16.2	886.6	969.3	754.9	703.9	35.3	13.1	12.8
Rad. 4	7.0	7.2	24.8	529.6	527.6	498.4	433.6	244.9	20.4	9.9
Rad. 5	8.4	7.2	558.7	775.3	767.8	677.6	510.6	410.8	87.1	6.6
Rad. 6	8.5	8.8	503.2	946.7	1009.1	1004.0	794.7	658.5	48.4	12.4
Rad. 7	5.1	5.7	15.4	786.8	800.3	755.9	538.7	105.4	223.9	10.5
Rad. 8	9.9	7.4	10.5	832.3	940.1	1052.9	756.6	14.9	17.4	13.2
Rad. 9	6.8	4.0	13.0	16.0	15.7	10.3	9.2	11.4	11.4	8.7
Rad. 10	8.6	6.0	11.8	9.9	6.8	7.0	7.6	8.1	7.0	4.9

Experimento No. 27 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



**Experimento No. 28 - Datos Básicos**

Fecha: 10/31/990

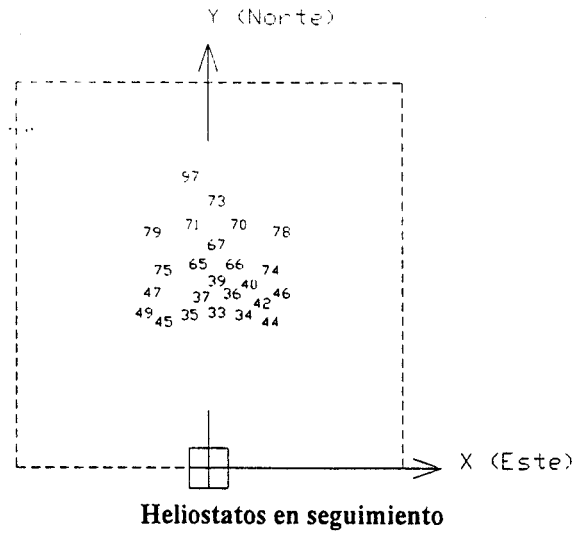
Hora Solar: 13:26

Irradiancia Directa: 930 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 85 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



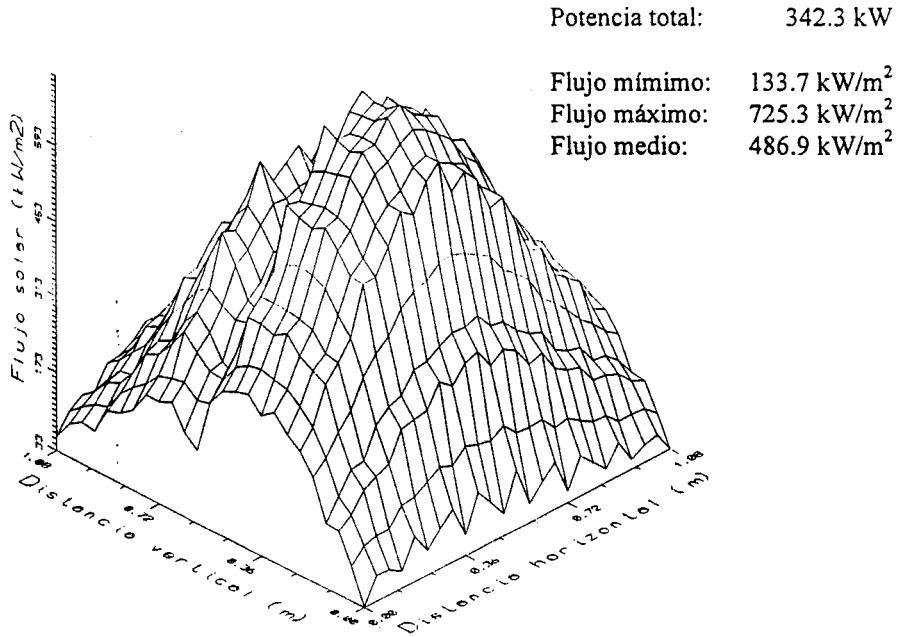
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	57.3	98.7	142.0	171.5	155.5	177.2	169.8	120.0	86.2	66.0
Rad. 2	96.1	161.8	232.1	277.3	260.2	281.3	265.9	188.4	137.7	103.1
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	213.3	345.4	478.8	563.6	566.4	559.3	524.2	370.9	280.8	198.1
Rad. 5	151.0	237.9	327.1	387.2	397.4	382.3	353.4	244.6	194.3	134.2
Rad. 6	290.0	440.8	601.1	700.9	743.8	705.0	637.6	460.6	366.2	246.4
Rad. 7	281.8	420.1	574.5	673.1	729.8	682.9	602.5	445.9	357.4	241.9
Rad. 8	253.2	381.2	517.0	610.5	678.5	630.3	541.9	411.0	331.8	227.2
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	34.1	54.7	69.9	69.6	60.4	55.0	52.6	49.7	42.6	32.8

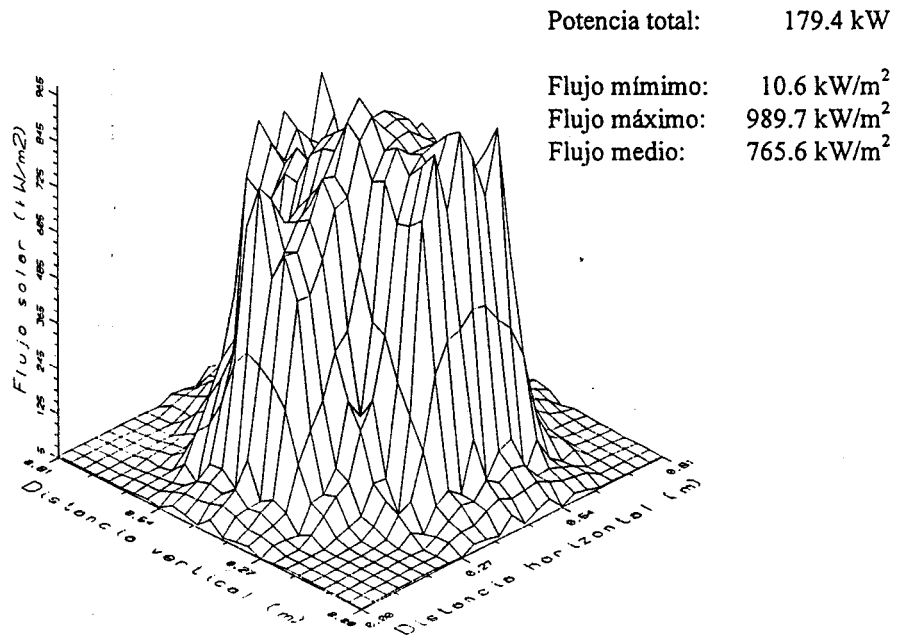
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	9.4	9.9	10.7	9.4	11.3	10.5	11.0	8.9	8.9	10.5
Rad. 2	9.8	10.4	14.2	12.6	27.6	23.3	22.2	13.4	10.6	12.8
Rad. 3	9.2	9.8	24.1	24.3	890.6	855.5	895.3	49.8	13.1	13.1
Rad. 4	7.5	8.4	274.7	331.6	789.5	566.4	557.1	281.7	16.3	10.2
Rad. 5	9.0	10.8	916.9	658.9	877.9	793.8	633.8	575.1	59.9	11.7
Rad. 6	8.2	9.7	738.5	842.8	1023.5	934.3	854.3	721.1	38.0	36.6
Rad. 7	4.8	7.4	78.7	248.3	920.8	867.9	804.3	138.0	54.7	10.3
Rad. 8	11.6	9.9	13.8	15.2	1053.8	1049.3	988.2	38.7	14.3	12.9
Rad. 9	9.7	11.9	14.1	8.9	16.0	13.6	8.9	14.1	12.7	8.1
Rad. 10	8.1	10.7	11.0	6.5	8.4	8.6	7.0	7.8	6.5	4.7

**Experimento No. 28 - Distribuciones de flujo estimadas**



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 29 - Datos Básicos**

Fecha: 10/31/990

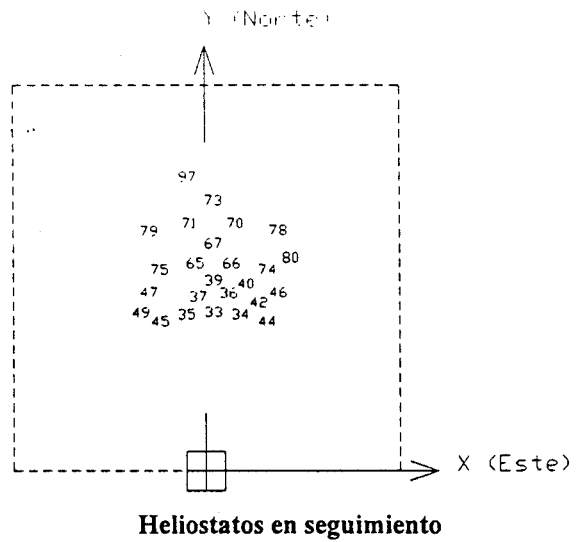
Hora Solar: 13:36

Irradiancia Directa: 930 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 85 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



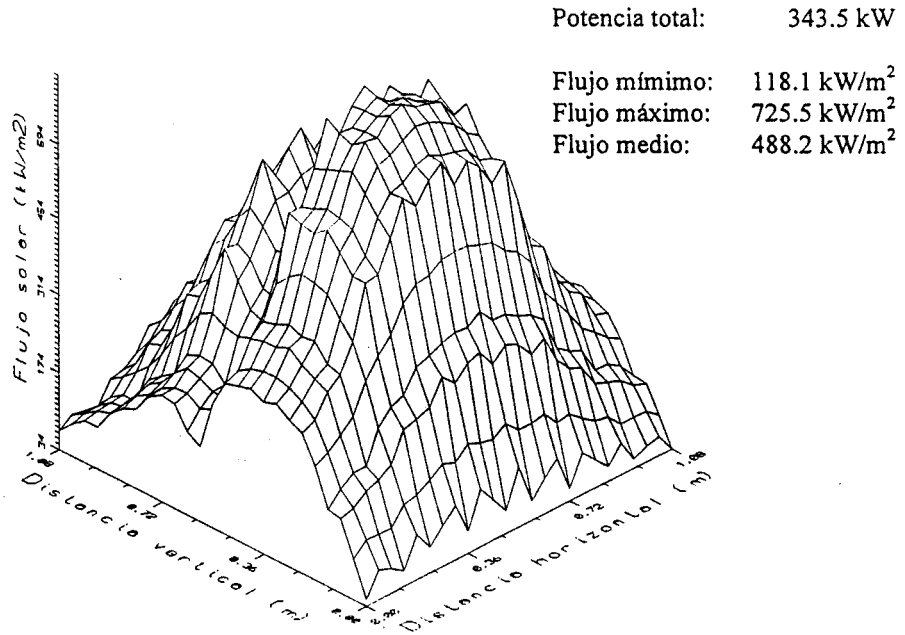
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	68.2	67.8	118.3	169.4	187.8	172.6	179.5	133.6	84.5	55.4
Rad. 2	107.0	110.0	198.9	274.4	302.1	279.8	284.0	203.6	129.8	88.0
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	226.6	261.4	444.3	565.5	599.6	570.6	559.3	380.4	251.5	178.9
Rad. 5	161.0	195.8	315.6	390.9	412.0	394.7	377.9	255.7	173.0	126.0
Rad. 6	308.8	387.4	582.7	715.2	751.4	724.3	695.6	457.1	324.0	237.2
Rad. 7	307.4	385.6	565.9	691.4	728.5	703.7	667.5	440.0	319.5	234.8
Rad. 8	289.1	358.1	517.7	633.7	671.4	647.4	610.7	408.9	301.2	221.6
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	45.7	53.0	72.8	73.4	63.2	57.4	55.5	53.5	43.6	34.0

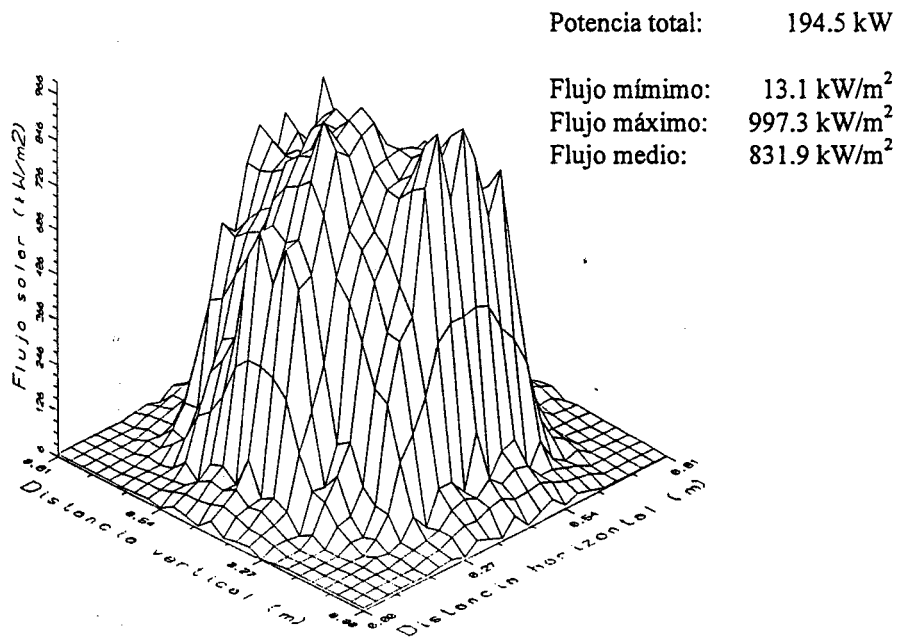
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	12.6	13.4	12.4	12.1	12.6	12.1	11.6	10.5	10.7	12.6
Rad. 2	13.4	13.9	16.4	20.0	26.3	24.9	23.0	16.1	12.3	14.2
Rad. 3	12.8	15.1	26.3	602.7	858.0	843.7	877.4	47.3	12.8	14.5
Rad. 4	9.3	13.7	309.5	599.7	741.9	600.0	508.9	266.2	18.1	11.9
Rad. 5	9.9	32.3	755.1	860.4	947.2	791.4	731.5	604.7	68.6	16.3
Rad. 6	12.6	23.6	743.0	1000.8	985.4	800.6	802.3	719.9	69.3	18.9
Rad. 7	8.0	9.4	93.3	684.0	814.9	868.1	719.8	229.4	17.7	14.8
Rad. 8	16.3	14.3	14.0	507.5	1099.1	1061.5	866.6	29.0	16.3	15.4
Rad. 9	14.6	20.9	17.1	21.7	17.9	15.5	16.0	17.4	15.7	11.1
Rad. 10	14.1	15.4	14.4	13.9	9.1	9.7	15.7	10.2	8.1	5.5

Experimento No. 29 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 30 - Datos Básicos**

Fecha: 10/31/990

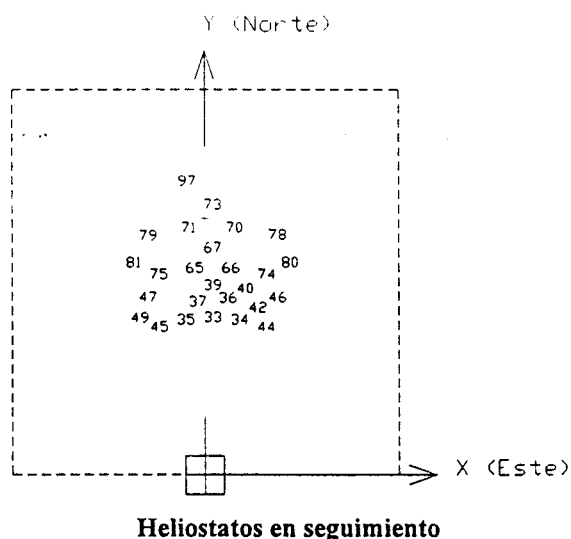
Hora Solar: 13:49

Irradiancia Directa: 930 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 85 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



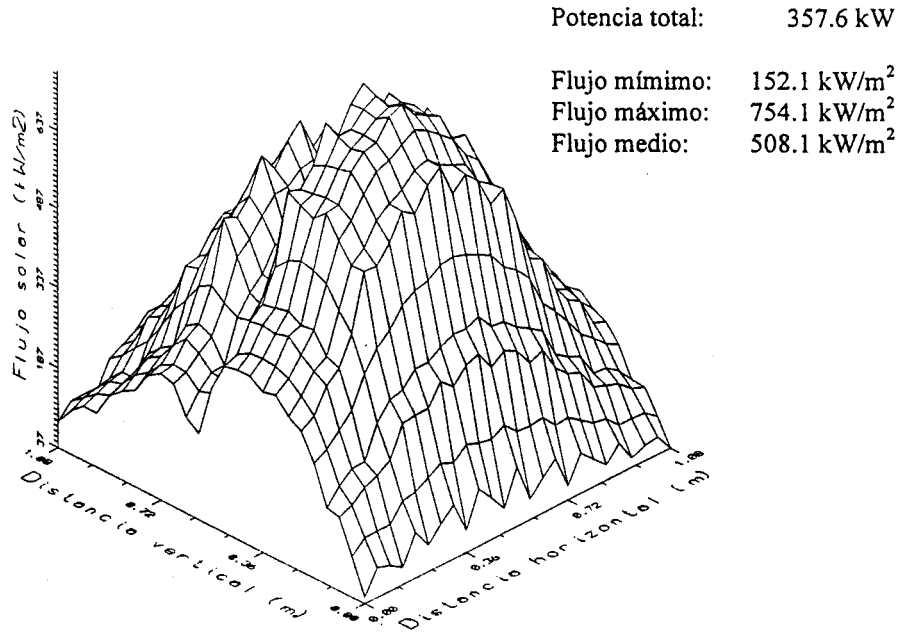
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	85.4	99.1	166.1	190.3	204.2	184.0	171.6	133.3	104.7	77.4
Rad. 2	133.5	157.0	260.2	299.3	323.2	298.2	274.8	208.2	158.5	116.4
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	273.4	329.5	519.8	589.5	633.0	593.2	539.6	396.3	291.2	213.0
Rad. 5	187.8	232.9	354.4	401.6	434.2	408.7	368.1	264.8	195.4	142.4
Rad. 6	350.6	431.9	646.7	726.0	783.5	733.8	658.7	472.1	345.8	250.5
Rad. 7	336.3	418.7	619.2	694.0	753.2	703.7	628.9	444.7	326.4	234.7
Rad. 8	300.7	380.9	561.4	625.8	686.2	641.3	573.5	400.6	295.0	211.2
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	49.7	60.5	79.6	78.4	70.8	63.8	62.9	59.1	47.9	37.0

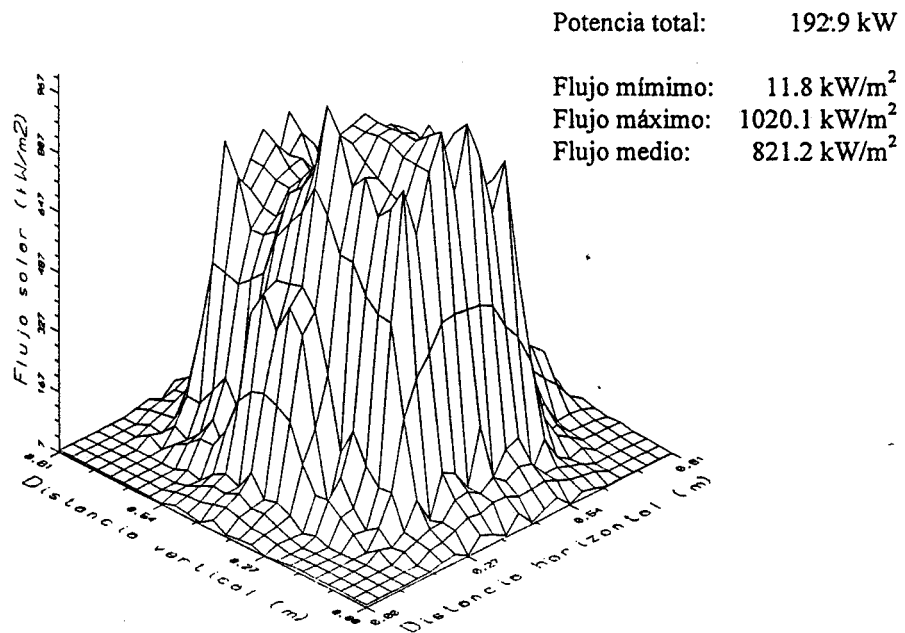
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	13.2	11.3	11.3	11.8	12.1	11.0	10.2	9.7	11.3	12.6
Rad. 2	13.4	12.8	13.9	24.9	26.3	27.4	21.3	15.6	13.1	14.8
Rad. 3	13.7	13.1	19.3	841.2	833.7	845.4	791.6	45.9	15.4	14.5
Rad. 4	11.3	13.4	33.8	586.6	673.3	588.9	498.1	304.2	30.9	12.5
Rad. 5	10.2	29.9	574.8	767.8	805.3	678.8	618.0	529.7	108.6	47.1
Rad. 6	11.2	20.6	565.8	1049.2	965.3	898.6	847.5	692.5	59.0	20.3
Rad. 7	8.5	8.0	20.9	880.2	947.2	807.4	720.9	115.1	212.5	15.7
Rad. 8	17.6	13.5	14.0	949.5	1092.5	1068.7	890.4	17.9	18.2	15.7
Rad. 9	16.5	17.4	20.1	23.1	16.3	14.9	13.6	14.4	16.0	11.6
Rad. 10	14.9	14.1	15.7	9.7	7.6	8.9	9.7	7.6	9.4	7.0

Experimento No. 30 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 31 - Datos Básicos**

Fecha: 10/31/990

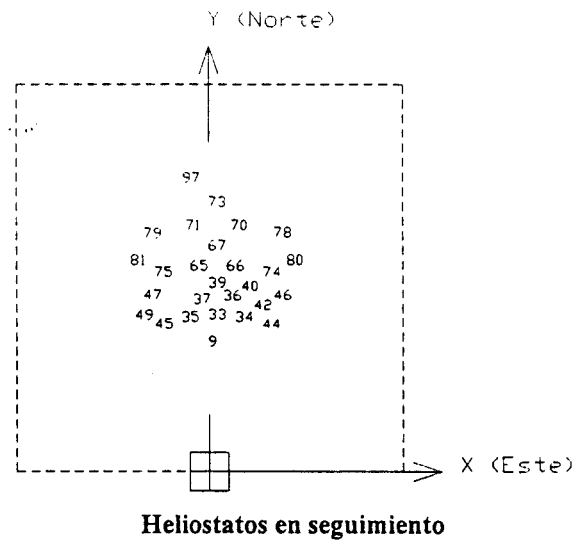
Hora Solar: 14:01

Irradiancia Directa: 925 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 85 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



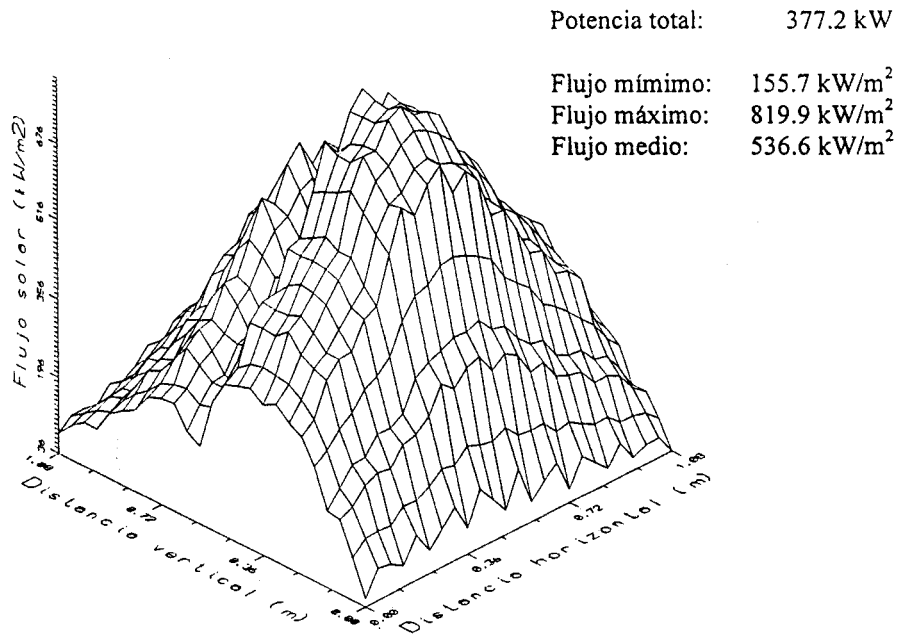
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	13.2	11.3	11.3	11.8	12.1	11.0	10.2	9.7	11.3	12.6
Rad. 2	13.4	12.8	13.9	24.9	26.3	27.4	21.3	15.6	13.1	14.8
Rad. 3	13.7	13.1	19.3	841.2	833.7	845.4	791.6	45.9	15.4	14.5
Rad. 4	11.3	13.4	33.8	586.6	673.3	588.9	498.1	304.2	30.9	12.5
Rad. 5	10.2	29.9	574.8	767.8	805.3	678.8	618.0	529.7	108.6	47.1
Rad. 6	11.2	20.6	565.8	1049.2	965.3	898.6	847.5	692.5	59.0	20.3
Rad. 7	8.5	8.0	20.9	880.2	947.2	807.4	720.9	115.1	212.5	15.7
Rad. 8	17.6	13.5	14.0	949.5	1092.5	1068.7	890.4	17.9	18.2	15.7
Rad. 9	16.5	17.4	20.1	23.1	16.3	14.9	13.6	14.4	16.0	11.6
Rad. 10	14.9	14.1	15.7	9.7	7.6	8.9	9.7	7.6	9.4	7.0

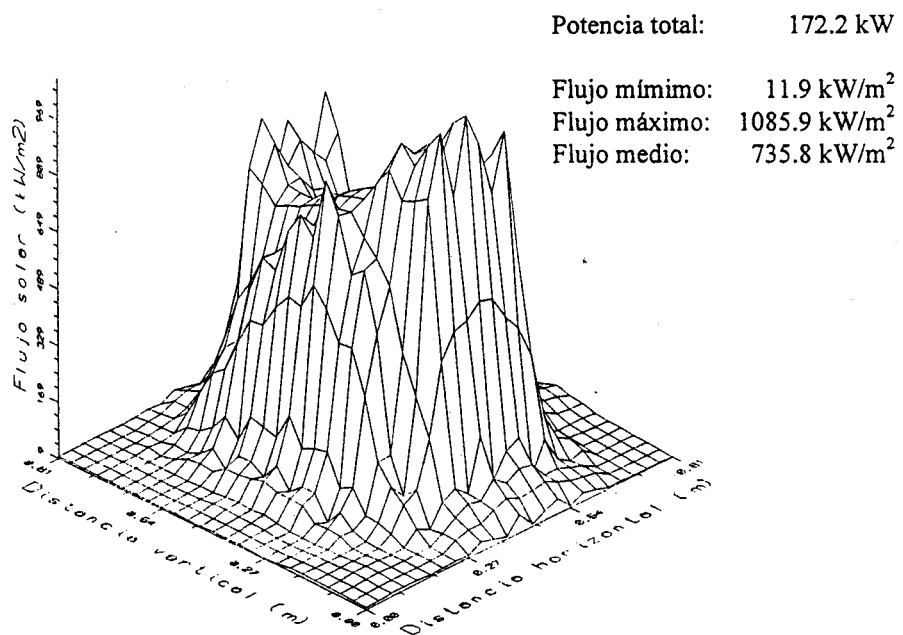
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	14.8	16.1	12.9	16.4	15.9	14.0	13.7	12.9	13.2	15.6
Rad. 2	15.3	16.7	15.3	21.9	30.7	27.6	26.3	20.2	15.0	17.8
Rad. 3	14.2	17.3	15.1	267.1	958.4	890.0	900.9	57.4	17.6	17.6
Rad. 4	13.7	18.1	16.3	573.4	703.6	541.9	499.0	289.3	20.4	14.8
Rad. 5	11.7	29.0	34.1	771.4	753.0	685.8	620.4	528.5	94.6	56.5
Rad. 6	14.7	22.7	25.1	919.0	806.2	748.0	719.0	662.9	31.3	20.3
Rad. 7	8.8	10.5	8.0	684.8	1002.5	950.1	857.8	129.7	50.9	37.2
Rad. 8	19.0	17.1	12.7	74.0	1188.4	1177.6	1046.6	32.6	19.0	19.0
Rad. 9	17.4	24.7	17.6	25.0	20.6	16.8	17.1	21.2	16.3	14.4
Rad. 10	15.4	18.6	14.9	17.0	11.2	11.5	15.2	13.1	10.2	8.6

**Experimento No. 31 - Distribuciones de flujo estimadas**



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



**Experimento No. 32 - Datos Básicos**

Fecha: 10/31/990

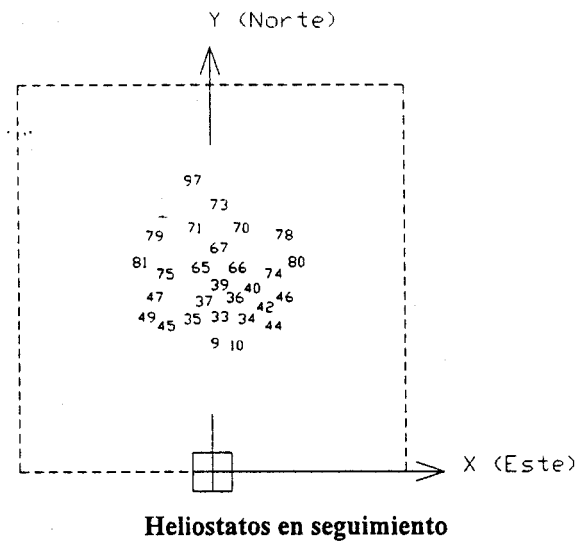
Hora Solar: 14:17

Irradiancia Directa: 920 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 85 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



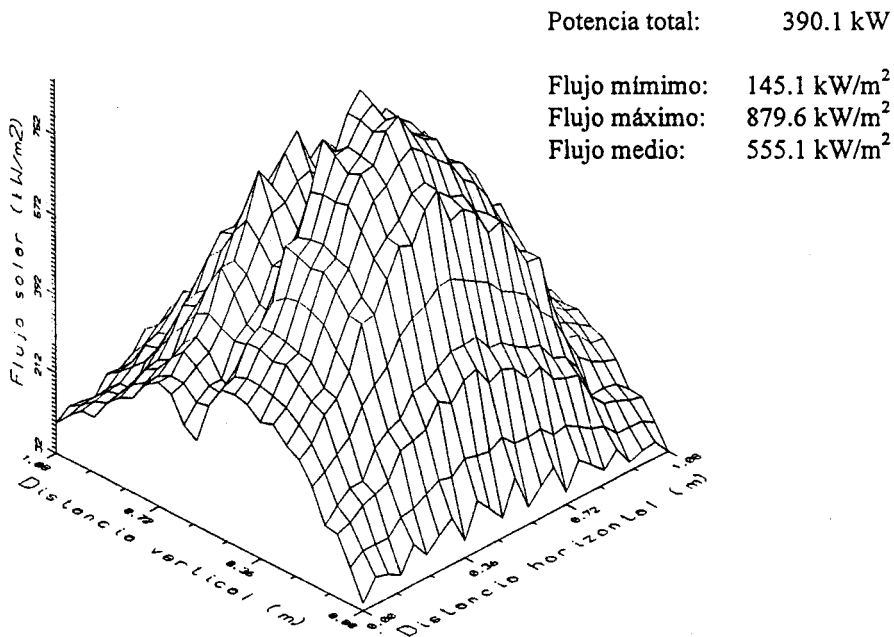
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	96.6	104.8	144.6	201.5	217.6	227.4	199.1	161.4	114.7	79.4
Rad. 2	149.8	165.7	235.3	321.7	341.9	344.5	306.0	247.1	166.9	116.9
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	304.8	365.4	506.5	669.4	730.1	677.3	583.5	483.9	292.1	223.6
Rad. 5	207.6	254.8	350.6	459.4	508.2	463.9	398.3	327.1	191.0	151.5
Rad. 6	360.0	470.2	638.9	828.1	916.9	834.5	725.7	592.4	325.6	273.0
Rad. 7	329.9	437.5	603.4	775.4	868.9	780.8	684.0	558.1	293.5	249.6
Rad. 8	291.3	383.4	540.7	669.9	766.1	682.9	608.3	495.3	250.3	214.3
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	48.7	57.6	72.7	69.0	62.1	56.4	57.2	54.2	43.7	31.5

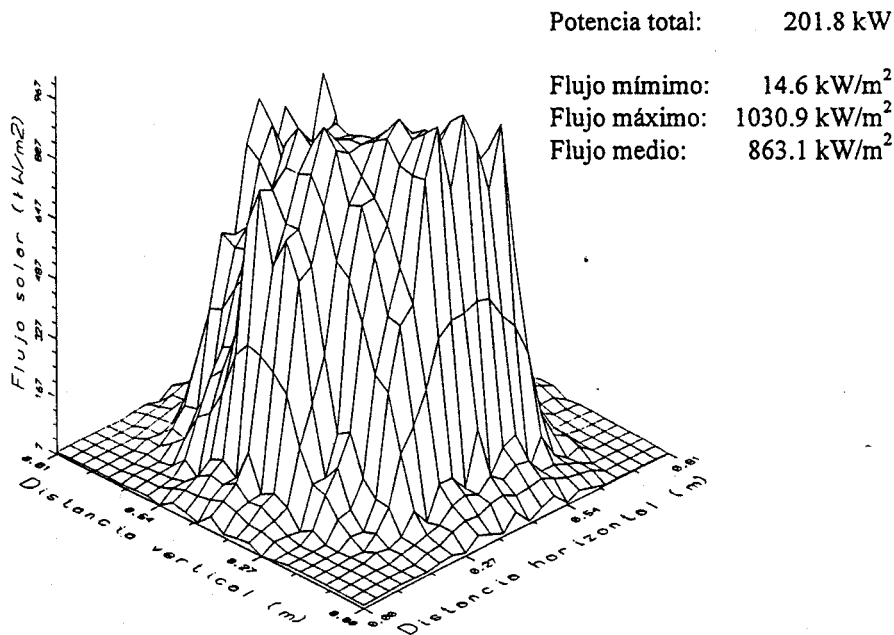
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	13.2	15.1	14.2	14.8	15.9	13.4	12.9	11.8	12.9	15.3
Rad. 2	13.9	16.7	18.6	24.1	30.4	30.4	25.5	18.0	14.5	17.2
Rad. 3	13.4	17.1	31.3	585.0	958.1	875.1	905.1	51.3	17.1	16.8
Rad. 4	9.0	14.5	292.2	531.1	621.0	507.1	461.6	250.2	18.6	14.8
Rad. 5	9.0	40.5	908.2	955.7	920.0	831.6	836.8	569.6	81.6	29.0
Rad. 6	11.2	25.3	787.0	993.7	904.8	805.6	810.0	693.9	116.6	27.1
Rad. 7	7.7	9.4	112.5	820.6	1008.2	887.9	857.3	112.8	22.9	17.7
Rad. 8	17.9	17.1	15.7	571.6	1134.2	1114.8	1010.6	27.9	18.2	19.0
Rad. 9	17.1	22.5	20.1	23.6	19.0	15.5	16.5	17.6	15.7	14.4
Rad. 10	16.5	18.6	16.0	15.2	10.5	9.7	12.6	9.4	9.1	7.0

**Experimento No. 32 - Distribuciones de flujo estimadas**



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 33 - Datos Básicos**

Fecha: 10/31/990

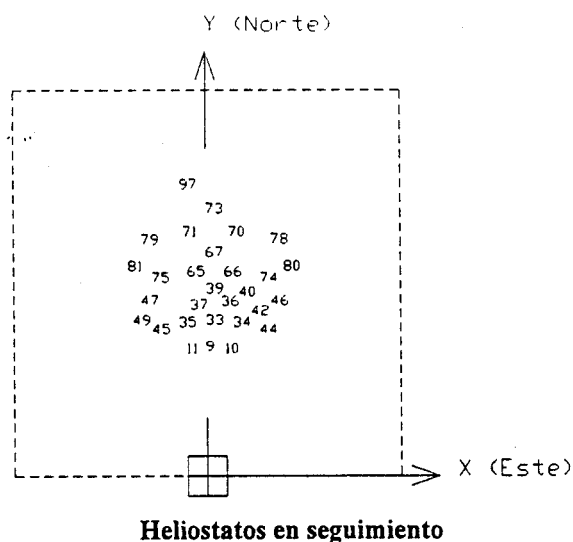
Hora Solar: 14:27

Irradiancia Directa: 915 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 85 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



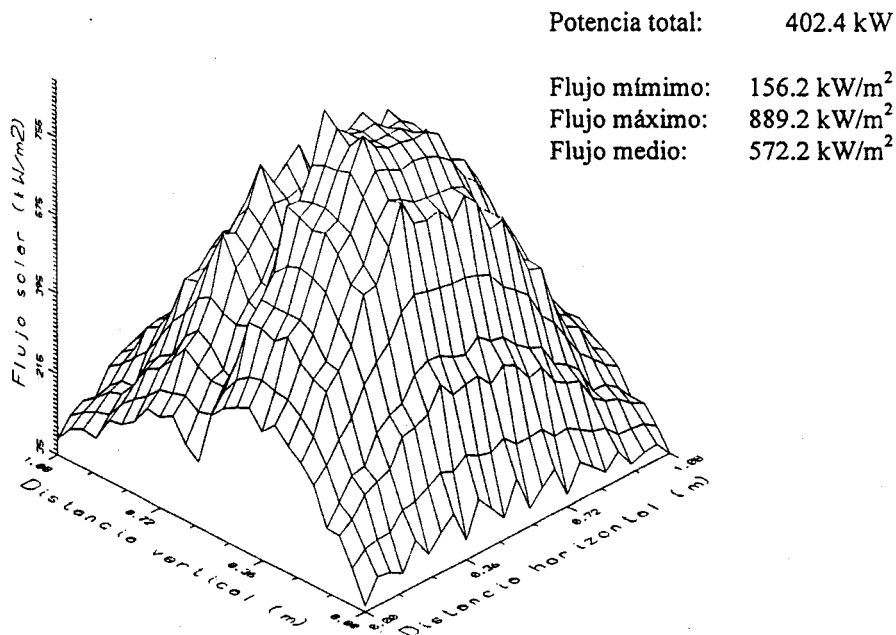
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	69.3	115.2	188.4	188.4	211.7	208.3	180.4	147.4	108.6	85.0
Rad. 2	108.3	176.8	292.5	299.9	338.0	318.9	277.9	223.4	163.9	121.8
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	234.2	385.4	589.5	694.3	708.4	647.3	569.2	432.2	301.1	204.7
Rad. 5	166.1	284.3	405.8	491.3	484.0	456.5	403.8	304.9	204.3	133.8
Rad. 6	323.0	539.8	741.6	910.7	866.6	847.2	743.9	557.7	363.2	235.6
Rad. 7	317.9	521.0	697.0	873.3	814.6	812.5	701.4	529.2	335.2	217.9
Rad. 8	291.1	458.1	611.4	779.3	714.9	727.3	616.7	467.1	289.1	191.5
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	48.5	66.9	81.6	77.5	69.6	62.0	60.6	58.7	47.5	35.2

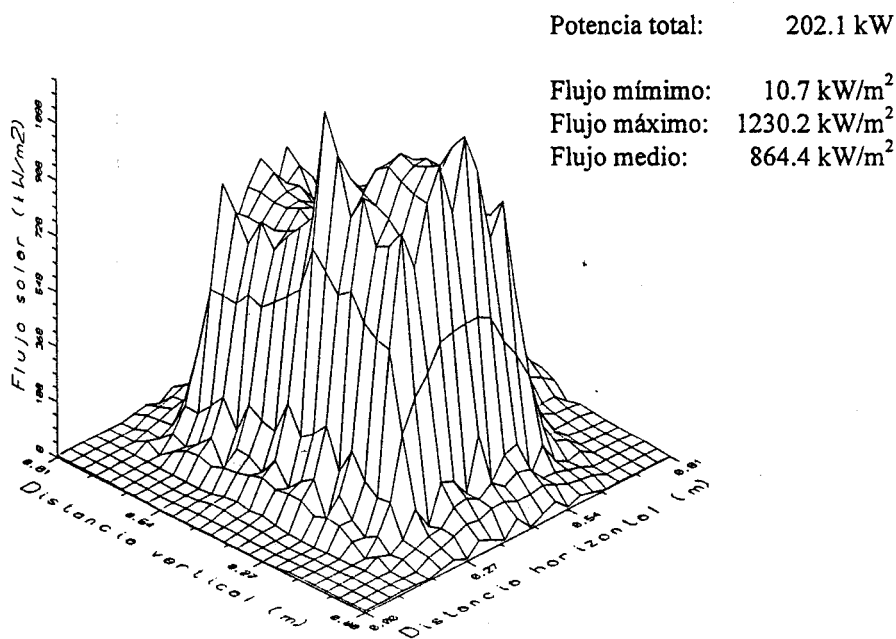
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	14.5	14.2	13.2	16.9	16.7	15.1	15.6	14.5	13.4	17.8
Rad. 2	15.0	16.1	14.8	27.4	31.8	30.1	26.3	20.8	16.1	19.7
Rad. 3	14.0	16.8	15.9	888.3	923.9	917.5	834.8	57.1	25.5	19.9
Rad. 4	8.4	12.2	13.4	773.4	779.8	675.3	512.1	315.6	63.3	28.9
Rad. 5	9.3	36.6	49.0	831.0	740.6	704.2	567.2	575.1	371.5	52.0
Rad. 6	11.2	24.2	33.0	1289.3	941.1	704.9	751.8	702.5	301.8	76.1
Rad. 7	9.1	8.5	9.1	1015.7	1096.1	1037.1	815.1	120.3	25.4	21.4
Rad. 8	18.2	16.3	14.0	1020.6	1206.6	1271.0	951.7	36.4	25.9	21.5
Rad. 9	16.3	21.4	17.4	28.2	20.6	20.9	18.7	22.8	20.6	15.7
Rad. 10	17.0	18.3	13.3	16.0	11.2	10.2	16.2	10.7	11.5	8.6

Experimento No. 33 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 34 - Datos Básicos**

Fecha: 10/31/990

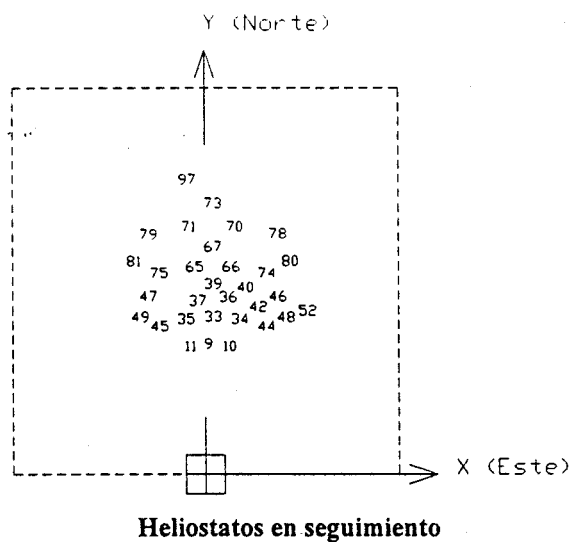
Hora Solar: 14:45

Irradiancia Directa: 905 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 85 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



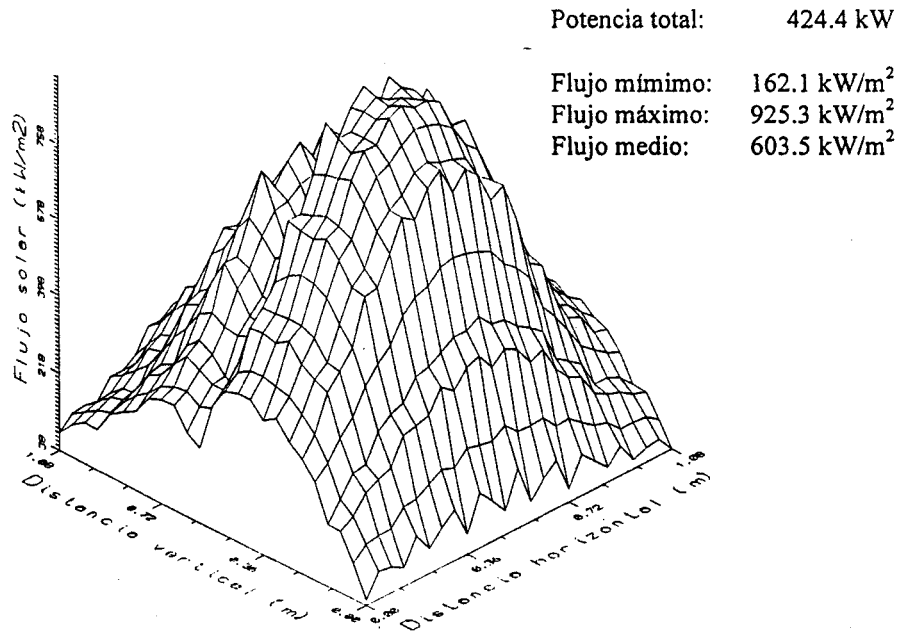
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	79.2	101.1	146.0	218.9	217.3	206.2	193.3	133.7	113.7	81.4
Rad. 2	125.8	162.0	233.8	340.5	339.3	329.8	314.0	211.0	175.3	121.8
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	276.9	371.2	529.5	694.1	728.4	739.0	674.3	434.8	324.4	225.2
Rad. 5	198.1	275.0	382.0	485.8	516.2	521.7	473.9	307.8	217.5	152.4
Rad. 6	371.5	532.2	720.0	901.8	958.9	952.5	864.4	570.3	386.2	286.3
Rad. 7	347.9	519.5	700.7	860.8	927.2	909.7	813.8	541.2	358.4	272.0
Rad. 8	302.7	467.4	624.3	759.1	839.8	807.0	716.8	477.8	314.4	240.8
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	51.6	71.7	88.9	85.2	79.4	70.7	68.0	64.6	50.6	38.2

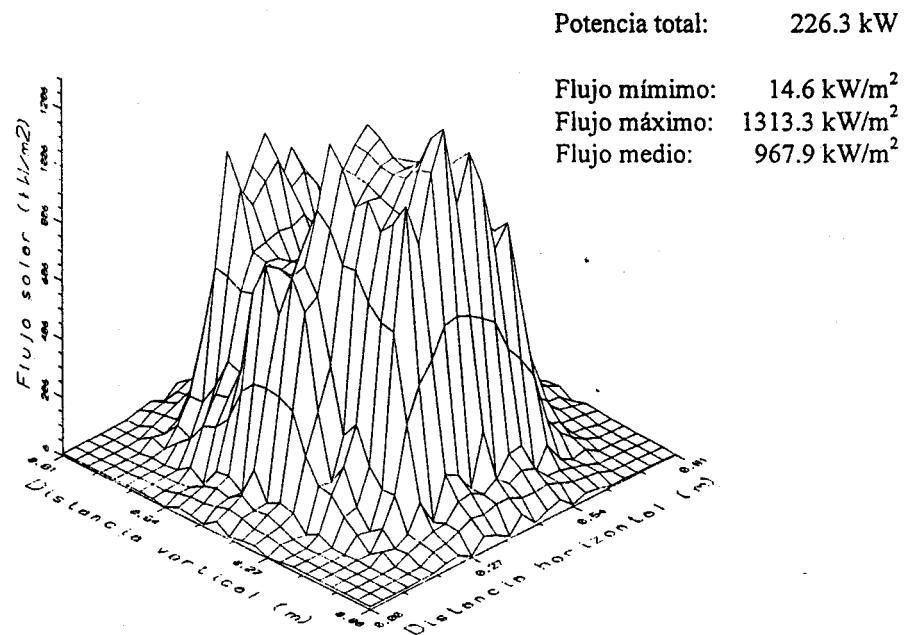
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	14.2	12.9	17.8	16.7	15.3	16.4	16.1	15.1	15.6	14.5
Rad. 2	15.3	13.9	21.9	33.1	38.1	51.8	41.1	30.4	15.6	16.7
Rad. 3	15.4	14.5	35.8	1064.4	1088.2	970.5	872.3	125.0	22.1	17.1
Rad. 4	8.7	8.1	263.9	669.8	570.8	511.2	459.2	366.4	25.9	32.7
Rad. 5	12.1	10.8	862.5	615.9	581.7	716.7	736.9	748.7	88.6	30.5
Rad. 6	12.4	12.1	864.9	1227.0	1255.3	966.5	818.6	771.0	56.7	17.7
Rad. 7	10.0	7.7	130.0	1062.1	1101.6	1043.4	773.0	537.9	22.0	12.6
Rad. 8	19.9	17.1	19.0	1170.4	1439.7	1275.5	915.8	81.2	21.0	17.4
Rad. 9	17.6	18.4	24.7	28.2	23.1	21.2	18.7	21.7	18.2	11.4
Rad. 10	18.1	15.7	19.9	12.0	9.9	11.5	13.3	12.6	10.5	6.3

Experimento No. 34 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 35 - Datos Básicos**

Fecha: 10/31/990

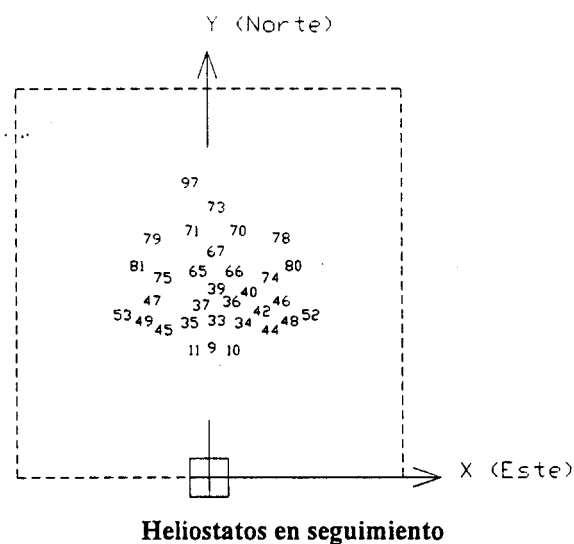
Hora Solar: 14:55

Irradiancia Directa: 905 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 85 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



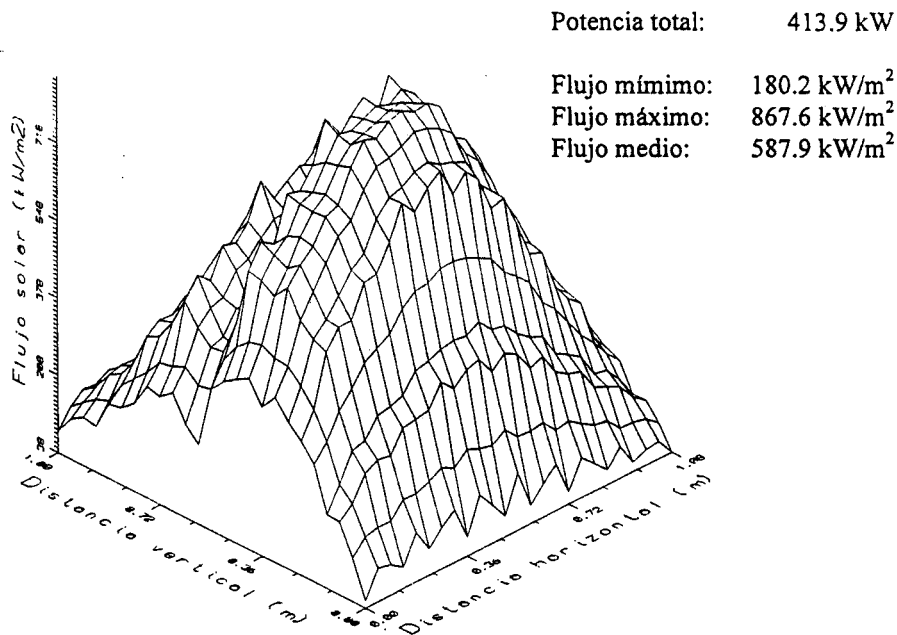
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	84.4	141.4	134.8	168.3	180.5	220.3	201.5	159.0	131.9	88.7
Rad. 2	130.3	226.1	221.9	271.7	278.8	341.9	299.3	236.5	193.7	126.3
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	272.1	510.1	544.3	632.6	631.6	717.8	595.0	446.1	345.4	209.6
Rad. 5	195.4	359.5	385.6	453.7	463.7	485.2	405.5	302.2	228.9	134.9
Rad. 6	371.0	672.7	740.9	856.4	874.2	904.1	763.1	573.5	423.4	238.6
Rad. 7	361.1	637.9	712.0	834.9	861.7	850.7	724.0	549.8	400.7	220.4
Rad. 8	328.5	554.3	624.0	753.8	791.7	758.4	648.6	492.6	356.2	193.2
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	53.2	72.2	86.6	79.4	68.3	63.8	64.5	62.2	50.5	37.6

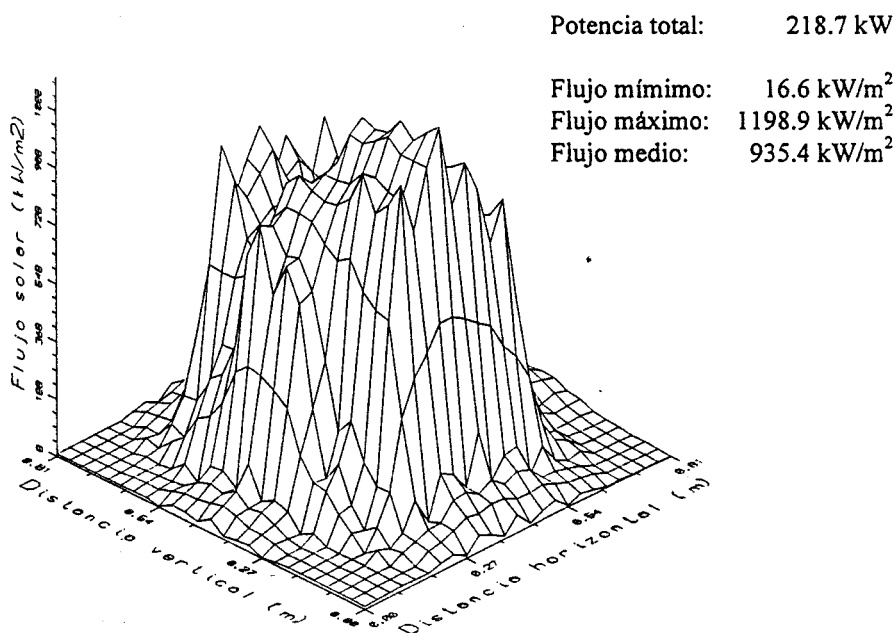
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	15.9	15.9	16.7	18.8	19.1	17.8	15.6	15.3	15.3	16.4
Rad. 2	16.7	17.5	21.9	37.0	51.0	47.7	41.1	27.9	17.5	18.3
Rad. 3	16.5	18.2	41.2	980.0	1011.4	920.3	904.9	93.3	22.1	18.2
Rad. 4	11.9	10.5	324.1	616.9	615.2	475.3	426.8	266.5	23.0	45.8
Rad. 5	21.1	20.5	931.5	955.4	936.0	661.6	730.6	630.1	147.0	49.9
Rad. 6	15.0	16.2	826.5	901.0	1150.8	812.1	801.7	727.6	158.5	65.2
Rad. 7	10.8	10.5	134.9	1050.9	1172.6	903.7	781.3	160.4	24.6	53.2
Rad. 8	20.4	21.8	20.4	1144.1	1306.7	1118.2	921.1	47.8	20.4	21.2
Rad. 9	19.3	26.6	25.8	28.8	27.4	22.3	16.8	22.3	17.4	13.3
Rad. 10	18.6	22.8	21.5	16.8	13.3	12.6	13.6	12.0	10.5	8.1

Experimento No. 35 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



**Experimento No. 36 - Datos Básicos**

Fecha: 10/31/990

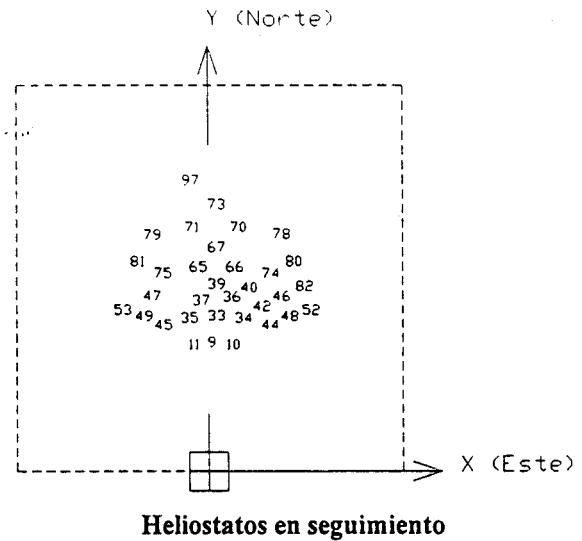
Hora Solar: 15:02

Irradiancia Directa: 855 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 85 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



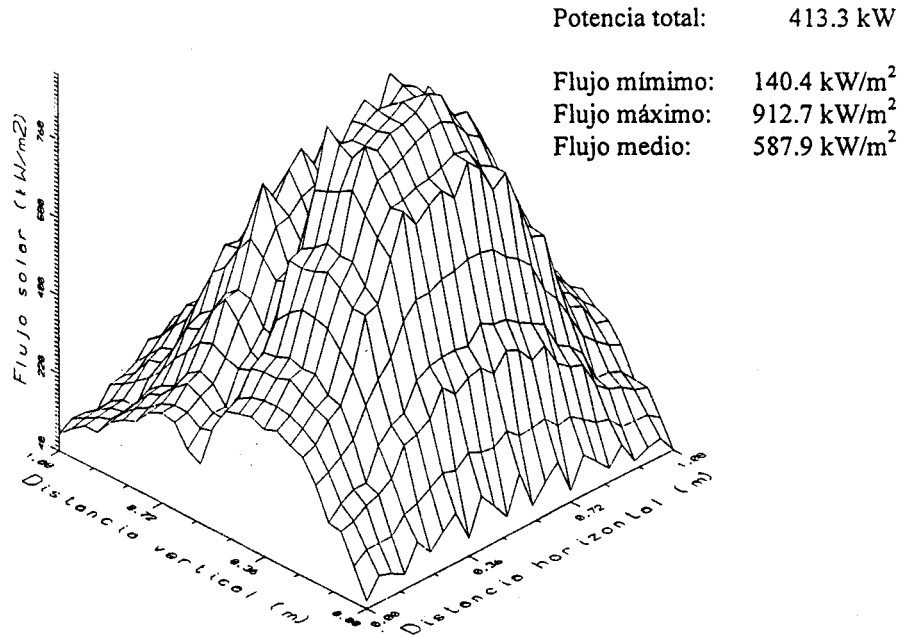
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	80.1	88.3	137.6	189.4	193.2	212.6	202.7	162.5	129.8	96.7
Rad. 2	124.1	135.3	213.9	299.4	310.0	329.6	309.5	247.1	192.5	144.6
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	248.6	301.1	444.5	660.2	707.7	714.9	647.6	502.5	346.3	256.4
Rad. 5	163.7	206.7	298.5	450.3	470.3	483.8	439.0	345.5	227.7	167.5
Rad. 6	327.9	424.8	622.7	889.1	909.8	951.2	856.1	665.3	422.7	313.4
Rad. 7	326.9	417.8	620.8	861.0	869.1	914.1	823.8	631.2	393.3	298.7
Rad. 8	308.3	380.2	579.3	774.7	777.5	822.7	743.1	557.7	342.5	266.3
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	57.9	64.1	84.4	79.2	67.6	61.8	64.1	62.7	50.4	39.9

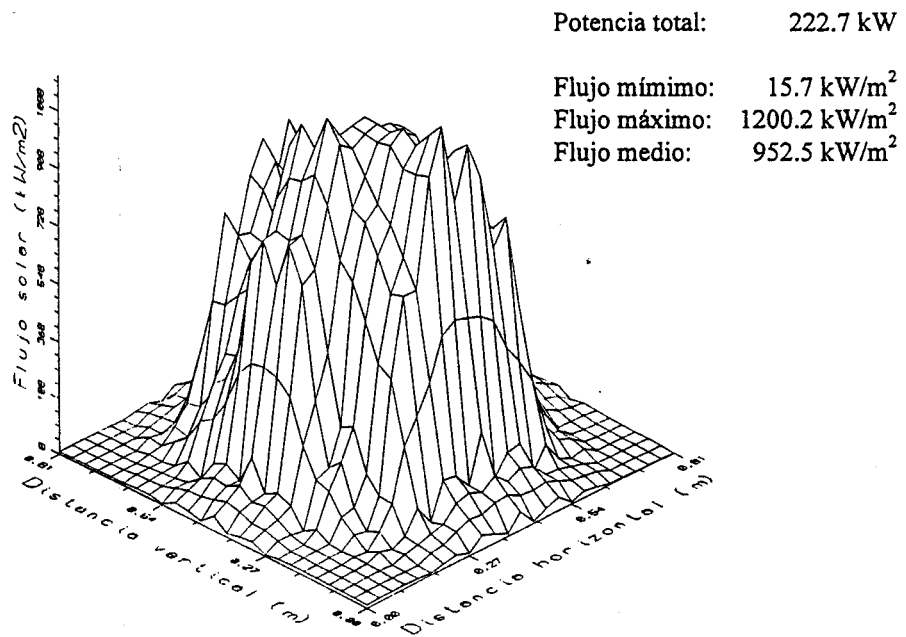
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	15.3	15.9	14.8	16.4	17.8	16.4	16.4	13.7	14.5	16.7
Rad. 2	16.4	17.5	20.2	28.5	50.1	46.3	51.0	26.0	17.0	18.6
Rad. 3	15.9	18.7	41.4	749.3	966.5	983.3	888.3	78.2	20.4	17.6
Rad. 4	12.2	16.0	308.3	568.2	579.0	532.0	438.8	264.5	65.1	151.8
Rad. 5	15.7	43.5	866.7	1129.6	887.6	938.1	936.0	642.8	129.1	64.4
Rad. 6	15.9	30.4	896.2	1191.0	1133.1	1056.0	924.6	712.3	144.7	25.6
Rad. 7	13.4	11.4	163.8	899.6	1136.2	948.6	743.3	140.9	52.1	20.6
Rad. 8	21.2	21.2	17.9	761.0	1321.4	1192.3	860.0	29.8	19.6	20.4
Rad. 9	20.1	25.0	19.5	25.5	27.2	20.1	18.2	20.9	16.8	14.1
Rad. 10	19.4	19.9	14.7	15.7	12.0	10.5	13.9	11.8	9.9	7.6

**Experimento No. 36 - Distribuciones de flujo estimadas**



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)

**Experimento No. 37 - Datos Básicos**

Fecha: 10/31/990

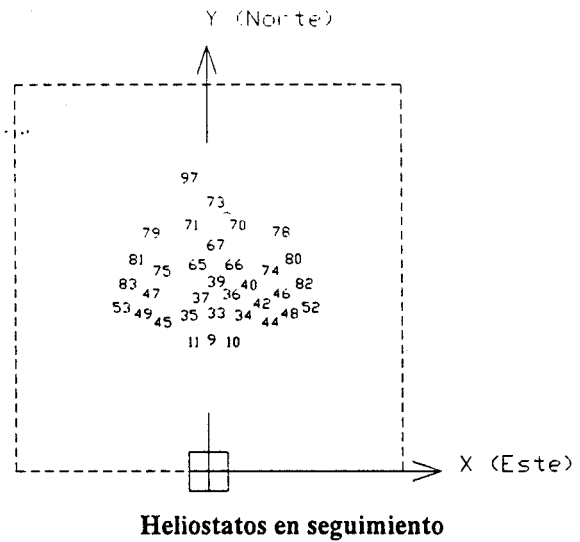
Hora Solar: 15:10

Irradiancia Directa: 880 W/m<sup>2</sup>

Reflectividad Media Heliostatos: 85 %

Reflectividad Reconcentrador: 77 %

Punto de apunte (m): -0.01, 1.52, 42.33



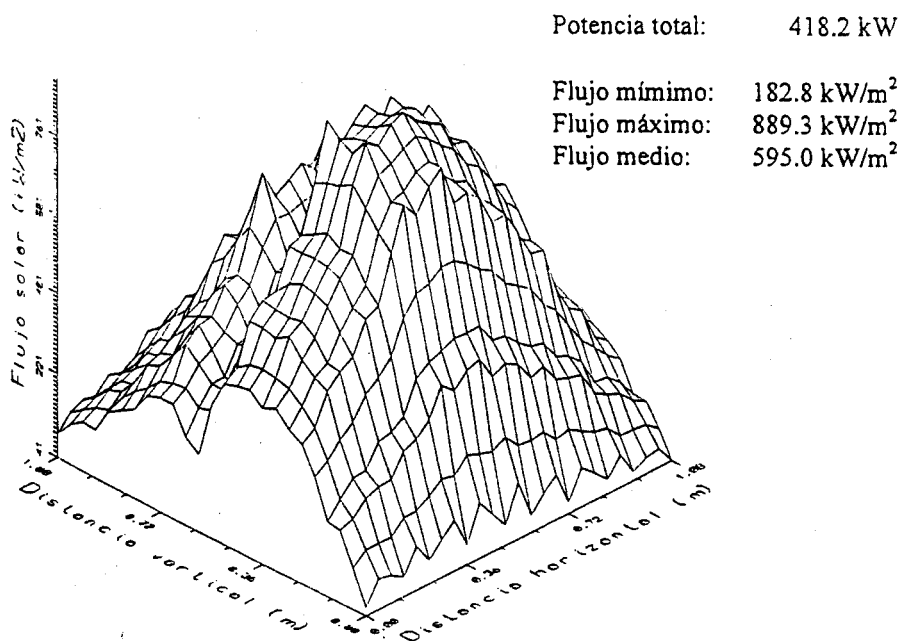
**Distribución de flujo a la entrada del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	90.5	126.1	148.3	208.6	207.5	228.7	234.6	229.5	146.2	93.1
Rad. 2	137.9	192.4	224.6	320.4	321.9	353.6	340.9	321.9	209.3	136.7
Rad. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 4	285.4	407.1	471.5	680.9	668.5	720.8	651.2	573.3	347.2	233.3
Rad. 5	194.5	280.1	326.6	462.7	449.5	472.9	428.4	376.5	221.3	149.3
Rad. 6	388.2	549.2	643.8	893.8	893.8	885.7	806.5	685.8	417.7	268.6
Rad. 7	378.9	525.9	622.0	863.2	894.1	836.7	753.2	621.3	392.6	251.4
Rad. 8	346.2	465.7	555.8	781.7	839.3	738.0	638.8	522.5	347.4	225.7
Rad. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rad. 10	60.6	75.9	85.4	86.2	72.2	66.7	65.3	64.8	52.6	41.4

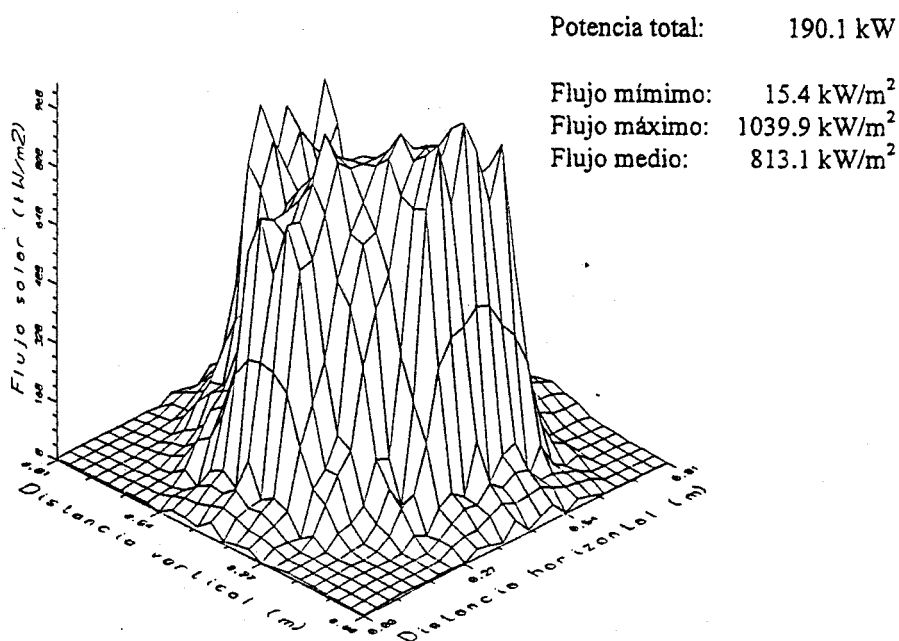
**Distribución de flujo a la salida del reconcentrador (kW/m<sup>2</sup>)**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rad. 1	13.4	15.1	14.8	15.1	16.7	16.1	14.5	13.4	13.2	15.3
Rad. 2	13.7	17.0	20.8	26.5	46.8	51.0	61.1	27.9	15.9	18.3
Rad. 3	14.2	17.1	41.7	155.0	985.6	917.2	919.2	81.0	19.6	18.2
Rad. 4	9.3	11.9	207.0	318.5	513.6	470.6	409.0	262.4	29.4	14.3
Rad. 5	16.9	32.6	848.9	810.1	807.4	755.7	763.8	696.1	135.8	63.5
Rad. 6	11.5	26.2	864.1	1012.6	885.9	765.7	758.9	667.7	135.5	50.2
Rad. 7	8.5	10.8	164.7	740.4	1004.8	922.8	826.3	127.7	67.0	58.1
Rad. 8	17.4	16.3	17.1	54.1	1122.9	1125.6	987.1	38.9	21.2	20.7
Rad. 9	14.1	20.6	17.4	20.4	25.0	19.5	17.4	20.6	16.5	11.9
Rad. 10	12.3	17.0	12.8	11.2	10.5	10.5	11.2	10.2	8.9	7.6

Experimento No. 37 - Distribuciones de flujo estimadas



Flujo solar a la entrada del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)



Flujo solar a la salida del reconcentrador (distancias en metros; flujos en kW/m<sup>2</sup>)