

123-15



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY.**

Proyecto de Ingeniería II

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus Ciudad de México

División de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Mecatrónica

Diseño preliminar de un horno solar portátil para la fundición de algunos metales

Asesores:

Prof. Ricardo Ganem Corvera

Prof. Arturo Barba Pingarrón

Sinodales:

Prof. Enrique Muñoz Díaz

Prof. Eugenio Aguilar Ibarra

Integrantes del Equipo:

María Virginia Osa Moreira

971269

Argelia Serralde y Zavala

991695

Carolina Ramírez Esquivel

1105554

Noviembre de 2009



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY**

Biblioteca
Campus Ciudad de México

TJ810

TESLA
TH7145
882
2009

RCR

b12471388

2009.08.14
10:10:10

2009.08.14
10:10:10

INDICE

I.	INTRODUCCIÓN	3
II.	ESTADO DEL ARTE, PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS	4
A.	ESTADO DEL ARTE.....	4
B.	PROBLEMÁTICA	8
C.	OBJETIVO GENERAL.....	8
D.	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	8
III.	MARCO TEÓRICO	9
A.	CONOCIMIENTOS PREVIOS.....	9
1.	ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	9
2.	RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO	10
3.	RADIACIÓN SOLAR	12
B.	CONCENTRADORES SOLARES	16
1.	SISTEMAS TERMOSOLARES DE CONCENTRACIÓN (STCS).....	16
2.	EL SISTEMA CONCENTRADOR SOLAR.	22
3.	EL SISTEMA CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO	27
4.	DEFINICIÓN DE RAZÓN DE CONCENTRACIÓN	28
5.	BALANCE DE ENERGÍA SOBRE UN COLECTOR SOLAR CUALQUIERA.....	36
6.	BALANCE DE ENERGÍA EN EL RECIBIDOR DE UN CONCENTRADOR SOLAR	40
C.	DETERMINACIÓN DEL FLUJO DE CALOR DEL SOL.....	46
1.	EL MÉTODO DEL TRAZADO DE RAYOS	46
IV.	SISTEMA PROPUESTO	51
V.	PRUEBAS Y RESULTADOS.....	53
A.	SIMULACIONES. UTILIZACIÓN DEL SOFTWARE SOLTRACE PARA LA SIMULACIÓN DE SISTEMA DE PRUEBA Y SISTEMA PROPUESTO.....	53
1.	DEFINICIÓN DEL SOL	55
2.	DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA ÓPTICA	56
3.	TRAZADO DE RAYOS.....	57
4.	GRÁFICA DEL TRAZADO.....	57
B.	SIMULACIONES DE LA ANTENA DE PRUEBA.....	58

C.	SIMULACIONES DE LA ANTENA PRPOUESTA.....	61
D.	ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL RECEPTOR.....	66
E.	DISEÑO DEL EXPERIMENTO.....	67
1.	CÁLCULO DE PÉRDIDAS INSTANTÁNEAS DE CALOR EN EL RECEPTOR.....	67
2.	CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN (NATURAL).....	68
F.	METODOLOGÍA DE EXPERIMENTO.....	70
G.	RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN.....	73
1.	PRUEBA 1.....	73
2.	PRUEBA 2.....	74
3.	PRUEBA 3.....	75
VI.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	78
VII.	PROBLEMAS.....	81
A.	MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA ALCANZADA.....	81
B.	MECANISMOS DE SEGUIMIENTO DEL SOL Y DE FRENADO.....	81
C.	CAMBIOS CLIMÁTICOS.....	81
D.	COLOCACIÓN DEL RECIBIDOR.....	82
E.	DETERMINACIÓN DEL RECIBIDOR.....	82
VIII.	CONCLUSIONES.....	83
IX.	TRABAJO FUTURO.....	84
X.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
XI.	ANEXOS.....	87
	ANEXO 1. FLUJO SOLAR INCIDENTE EN SISTEMA DE PRUEBA.....	87
	ANEXO 2. RESULTADOS FLUJO SOLAR INCIDENTE EN PARABOLOIDES.....	91
1.	PARABOLOIDE DE 1.5M.....	91
2.	PARABOLOIDE DE 2M.....	98

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso desmedido de hidrocarburos como una de las principales fuentes de energía ha generado dos problemas principalmente. Uno de ellos es que las reservas de petróleo nacionales han disminuido considerablemente de manera que en un futuro próximo se habrán agotado, lo que traerá consecuencias importantes para la economía del país, el nivel de vida de los habitantes y para la estabilidad política. El segundo problema que deriva de dicha práctica es la generación de gases de efecto invernadero los cuales, según algunas teorías contribuyen al fenómeno llamado calentamiento global y afectan la salud de la población y el desarrollo sustentable de la misma a nivel mundial.

Por las razones anteriormente expuestas es necesario desarrollar herramientas y procesos en los cuales el uso de las energías renovables sea cada vez mayor y más eficiente, entendiéndose por energías renovables todas las fuentes de energía natural virtualmente inagotables, ya sea por la gran cantidad de energía que poseen, como en el caso de la energía solar, o aquellas que son capaces de regenerarse por medios naturales.

La principal fuente de energía renovable de la que disponemos es el Sol, el cual emite gran cantidad de energía radiante que al momento de entrar a la atmósfera terrestre se convierte en gran variedad de efectos de gran nivel energético, como son: la energía eólica, la diferencia de temperaturas oceánicas, la energía mareomotriz, la energía hidráulica y la energía de la biomasa.

En el caso de la llamada energía solar se hace referencia a la utilización directa de la energía proveniente de la radiación solar, mediante la cual es posible obtener luz, calor y electricidad.

II. ESTADO DEL ARTE, PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS

A. ESTADO DEL ARTE

Alrededor del mundo se ha comenzado a investigar sobre las energías renovables. Existen varios centros de investigación en diversos países. Los institutos de estudio de energía solar se han ubicado principalmente en aquellos países que cuentan con una ubicación geográfica favorable para el aprovechamiento de dicha energía. Entre los principales centros de investigación encontramos en Francia las centrales de energía solar de Odeillo, Mont Louis y Targassonne. En España se localiza la Plataforma Solar de Almería. Estados Unidos es otro de los países que ha puesto en marcha programas de estudio de energías renovables. Estos institutos investigan principalmente las aplicaciones de la energía solar directa y la energía solar concentrada.

Para el caso de estudio presente, podemos encontrar el desarrollo que se ha hecho sobre colectores solares, destacando la capacidad que se ha logrado obtener en diversos centros de los anteriormente mencionados y otros institutos más.

Las principales contribuciones al desarrollo de colectores de cilindro parabólico (CCP) las ha aportado principalmente España con cuatro campos de CCP, todos en la provincia de Almería: Campo Acurex cuya potencia eléctrica es de 0.5MWe; Lazo Ace 10 de 50kWe; Lazo DISS de 0.5MWe y Lazo Eurotrough de 50kWe. En Estados Unidos se encuentran las plantas SEGS (Solar Energy Generating Systems) con una capacidad de 354MWe. En Israel está el Campo del Instituto Weizmann que es un centro de investigación también sobre colector de receptor central con una capacidad de 0.5MWe.

En cuanto al desarrollo de los concentradores de discos parabólicos se han desarrollado prototipos que se encuentran instalados en centros de investigación en España, Alemania, Estados Unidos y Arabia Saudita entre otros. Estos prototipos operan con potencias entre 15kWe y 50kWe.

México ha comenzado también desde hace varios años la investigación sobre energía solar. Se han desarrollado desde instrumentos para aplicaciones menores como cocinas y calentadores hasta nuevos diseños de concentradores solares. Sin embargo este tema sigue siendo un campo de investigación con mucho potencial de desarrollo.

En el Departamento de Energías No Convencionales del Instituto de Investigaciones Eléctricas localizado en el estado de Morelos, se ha desarrollado investigación sobre

tecnologías de concentración de energía solar térmica. El eje principal de dichas investigaciones es el disco parabólico para la generación de energía eléctrica. Esto con el propósito de instalarlos en regiones rurales cuyo acceso a la energía eléctrica es limitado o incluso nulo. Se han logrado grandes avances logrando un diámetro de 7.5m.

Además de los progresos anteriormente mencionados, existen otros usos de la energía solar concentrada, como la aplicación para modificaciones superficiales de materiales: procesos como el tratamiento térmico de aceros, aceros inoxidable, hierro fundido y nitrurado de titanio por ejemplo. Se ha logrado trabajar con NiAl intermetálico para producir recubrimientos NiAl en aceros al ultra bajo carbono así como la unión de NiAl a una súper aleación y como un recubrimiento para aplicaciones de altas temperaturas.

El proceso por el cual se logra dicha aleación se denomina Síntesis Reactiva. Consiste en calentar el polvo reactivo de manera local; cuando la zona calentada alcanza la temperatura de ignición, empieza una reacción química, liberando suficiente calor para aumentar la temperatura de áreas adyacentes hasta igualar la temperatura de ignición. La reacción continúa a través de toda la muestra, hasta obtener el producto final, sin necesidad de una fuente de energía externa una vez empezada la reacción química. Los productos que se obtienen de este proceso muestran una alta pureza ya que las altas temperaturas alcanzadas favorecen la volatilización de impurezas con bajo punto de fusión, además de que debido al corto tiempo de reacción se evita la contaminación del producto debida al contenedor. Los productos de una síntesis de éste tipo son porosos, pero para reducir la porosidad la reacción puede realizarse bajo presión.

Para llegar a la temperatura de ignición en las investigaciones que se han desarrollado, se utiliza un concentrador solar tipo Fresnel, donde el punto focal es una superficie circular de 5mm de diámetro, la densidad máxima alcanzada es de 260W por cm^2 . El concentrador se posiciona de manera normal a la radiación solar, para así poder ser concentrados en el foco.

Por otra parte, también se ha estudiado la aplicación de esta energía en el campo de los plásticos. Dada la necesidad de producir una mayor cantidad, formas más complejas y diversos compuestos de los mismos, se ha incrementado la necesidad de crear uniones, sobre todo de los termoplásticos. Existen diferentes técnicas para unir materiales plásticos, en los que la mayoría requiere, en alguna de sus etapas, la generación o aplicación de calor. Es en dicha etapa que la energía solar puede ser utilizada como una fuente de generación de calor alternativa para inducir modificaciones estructurales. Aún a sabiendas de la oportunidad que resulta el poder hacer una unión de plásticos por medio de energía solar, esta área no ha sido objeto de mayores estudios.

Existen dos maneras de hacer uniones, unión mecánica y unión adhesiva, soldadura por fricción, unión electromagnética. Aunque muchas de las tecnologías convencionales de unión mencionadas se han utilizado por años, algunas de las tecnologías modernas de soldadura todavía se encuentran en sus etapas de desarrollo tempranas.

En el proceso de soldadura por microondas utiliza la interacción electromagnética entre la radiación de la microonda incidente y el material a ser unido. Las aplicaciones industriales para unir termoplásticos por este medio todavía se encuentran en etapa de investigación y desarrollo. Muchas de las tecnologías modernas convencionales usan o están basadas en los efectos causados por diferentes tipos de radiación electromagnética pero independientemente del tipo de tecnología que se necesite utilizar, se necesita una fuente de radiación electromagnética, siendo el sol la fuente más grande de energía renovable. Aunque la tierra solamente intercepta 2 billonésimos de la energía generada por el sol, la energía que llega a la atmósfera en forma de luz solar cada año, equivale a casi 1,000 trillones de barriles de aceite.

Para la aplicación de esta energía en la soldadura de plástico, se ha utilizado plásticos como el Policarbonato, Poli-Metil-Metacrilato (PMMA), Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), eligiendo éstos ya que son plásticos con excelentes propiedades físicas (ABS tiene una alta fuerza de alto impacto, bajo punto de fusión, buenas propiedades de moldeo y rigidez para usos estructurales; PMMA tiene alto grado de transparencia, resistencia a ralladuras y resistencia a los rayos ultravioleta, además de una alta resistencia química, alta dureza superficial y durabilidad; PC tiene una baja densidad, alta dureza, además de tener una relativamente alta transmisividad de la luz visible) y la amplia utilización de los mismos a nivel industrial.

En el desarrollo de la experimentación para esta aplicación la imagen focal que se obtiene es de 25mm, con una distancia focal de 2778mm. Una vez hechas las uniones de los materiales anteriormente mencionados se realizaron varias pruebas a las muestras para comprobar la efectividad de la unión de los mismos. Con los resultados de estas pruebas se determinó que el PC pudo soportar una mayor fuerza tensil y que fue el material más dúctil mientras que el PMMA tenía una fuerza tensil relativamente alta y resultó el material más frágil. La fuerza tensil promedio de los materiales ABS, PC y PMMA se calculó como 35.5, 66.5 y 54.7 MPa respectivamente.

Para poder comprobar la viabilidad del procedimiento de soldadura, los experimentos iniciales tuvieron el monitoreo de diversos parámetros como la insolación directa, la temperatura en el foco y la duración del tiempo del proceso de soldadura. Los datos obtenidos en la experimentación inicial se muestran en la tabla:

Tabla 1. Monitoreo de parámetros en soldadura de termoplásticos

Fuerza promedio de la unión de soldadura con monitoreo de los parámetros de soldadura							
Material	Duración de la unión [s]	Temperatura de funcionamiento en vacío [°C]	Intensidad de la radiación solar directa [W/m ²]	Velocidad del viento [m/s]	Fuerza (tensión) aplicada [N]	Fuerza del material original [%]	Elongación [mm]
ABS	18	549	898	≤2	248	38.77	0.66
PC	27	565	922	≤2	327	27.28	0.67
PMMA	50	555	888	≤1	313	31.76	0.55

Los resultados de las pruebas anteriores se compararon con los resultados de haber soldado los mismos materiales por medio de energía de microondas. La comparación entre ambos procesos se basó en el consumo de energía (kJ) requerida para realizar el proceso, además de comparar los resultados (fuerza de la unión). Como se puede notar en la tabla 2, el consumo de energía en el proceso realizado con la energía solar es mucho menor que con la energía de microondas. El proceso aplicando energía solar concentrada parece ser más favorable en términos de energía consumida y resultados.

Tabla 2. Comparación entre energía solar y energía de microondas utilizadas para soldadura de termoplásticos

Soldadura por medio de energía de microondas concentrada				Soldadura por medio de energía solar concentrada			
Potencia introducida [W]	Duración de la soldadura [s]	Energía consumida [kJ]	Fuerza de la unión comparada con el material original [%]	Potencia introducida [J/s]	Duración de la soldadura [s]	Energía consumida [kJ]	Fuerza de la unión comparada con el material original [%]
ABS (sin primer)							
600	46	27.6	26	134.4	13	1.747	31.99
800	38	30.4	28	124.8	18	2.246	32.8
1000	34	34	16.4	143.4	23	3.298	48.83
ABS (con primer)							
600	24	14.4	23.4	120.3 (promedio)	28	3.368	19.09
800	17.7	14.4	33.1				
1000	11.5	11.5	41.1				
PC (sin primer)							
600	140.5	84.3	11.5	134.4	22	2.957	18.01
800	66	52.8	28.2	124.8	27	3.370	22.39
1000	44.5	44.5	20.3	144.6	32	4.672	33.52
PC (sin primer)							
600	35	21	14.7	118.4 (promedio)	47	5.565	4.29
800	20.6	16.48	50.2				
1000	17.3	17.3	63.3				

Con ésta aplicación podemos observar el amplio campo de trabajo que tiene la energía solar, no sólo en la generación de energía eléctrica sino en el estudio de materiales y en la formación de aleaciones utilizadas para recubrimientos como se aquí se especifica.

B. PROBLEMÁTICA

Por lo general el aprovechamiento de la energía solar se ve reducido a actividades domésticas y en algunos casos a actividades industriales en las que el objetivo principal es elevar la temperatura del agua, o en otros casos en los que el objetivo es la calefacción o refrigeración. En el caso de nuestra nación dada la privilegiada situación geográfica, en cuanto a la gran cantidad de radiación solar recibida, es imperativo desarrollar herramientas que nos ayuden a aprovechar este recurso ilimitado no solo en aplicaciones a pequeña escala como estufas solares, o calentadores de placa para el agua de uso doméstico, sino también y principalmente en aplicaciones cuya eficiencia energética al aumentar la temperatura es exigua, como es el caso de la fundición de metales y tratamientos térmicos de algunos de éstos.

C. OBJETIVO GENERAL

Llevar a cabo el diseño de un horno solar tomando en cuenta las características geográficas privilegiadas de México. Dicho diseño deberá cumplir con los requisitos mínimos de temperatura a alcanzar y tener un tamaño práctico que permita la máxima captación de radiación solar.

D. OBJETIVO ESPECÍFICO

Simular y diseñar un horno solar que pueda alcanzar una temperatura mínima de 500 C que permita fundir algunos metales cuyo punto de fusión se encuentre entre los 200 y 500 grados centígrados, con el propósito colaborar en el desarrollo de tecnología que aproveche la situación geográfica del territorio nacional haciendo uso de energía renovable.

III. MARCO TEÓRICO

A. CONOCIMIENTOS PREVIOS

1. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Como resultado de cambios en la configuración electrónica de los átomos o moléculas la materia emite energía en campos, a esto se le llama radiación electromagnética.

Las ondas electromagnéticas se caracterizan por su frecuencia ν o su longitud de onda λ . Estas dos propiedades se relacionan mediante:

Ecuación 1 Relación entre longitud de onda y frecuencia de ondas electromagnéticas

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

En donde c es la velocidad de propagación de la onda en ese medio. El comportamiento de las ondas electromagnéticas difiere considerablemente dependiendo de las diferentes longitudes de onda.

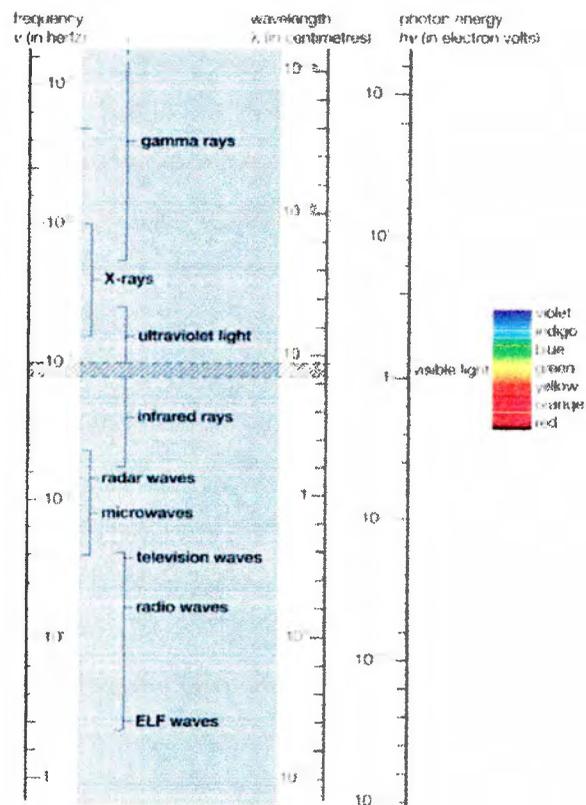


Figura 1 Espectro Electromagnético

Toda la materia emite radiación térmica constantemente cuando su temperatura está por arriba del cero absoluto. Cuando la radiación solar llega a una superficie, parte de ella es absorbida y, por lo tanto, la temperatura de la superficie se incrementa. Las tasas de radiación térmica emitida se incrementan al aumentar la temperatura, por lo tanto es importante considerar que en un concentrador solar tras estar expuesto por un tiempo a la radiación solar su temperatura aumentará y por lo tanto las pérdidas por radiación también podrían incrementarse.

La radiación emitida por el Sol, conocida como radiación solar se encuentra entre las longitudes de onda de 0.3 a 3 μm .

2. RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO

Un cuerpo negro se define como absorbedor y emisor perfecto de radiación. A temperatura y longitud de onda específicas, ninguna superficie puede emitir más energía que un cuerpo negro. La radiación emitida por un cuerpo negro por unidad de tiempo y por unidad de área se expresa como:

Ecuación 2. Radiación emitida

$$E_b(T) = \sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann y T es la temperatura absoluta de la superficie en K. E_b se conoce como la potencia emisiva de un cuerpo negro. La ley Stefan-Boltzmann da el total de poder emisivo, que es la suma de la radiación emitida en todas las longitudes de onda.

Sin embargo para conocer el espectro del poder emisivo de un cuerpo negro, que es la cantidad de radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura absoluta T por unidad de tiempo, por unidad de superficie área, y por unidad de longitud de onda, se emplea la relación de la ley de Planck que se expresa como:

Ecuación 3.

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \text{ (W/m}^2 \cdot \mu\text{m)}$$

Donde

Ecuación 4

$$C_1 = 2\pi h c_0^2 = 3.742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$$

Ecuación 5

$$C_2 = hc_0/k = 1.439 \times 10^4 \mu\text{m}^4 \cdot \text{K}$$

De acuerdo con lo anterior se pueden hacer varias observaciones, gran cantidad de la radiación es emitida en las longitudes de onda más cortas a mayores temperaturas; la radiación emitida por el sol, considerado un cuerpo negro, a 5780 K alcanza su pico en la región del espectro visible.

En un colector solar el tipo de superficie selectiva (absorbedor) que se emplea es muy importante, ya que debe combinar características, de tal manera que tenga alta absorptividad para la radiación solar y baja emitancia para temperaturas en el rango en el cual la superficie emite radiación. Para el colector solar la combinación de las características mencionadas se puede lograr ya que el 98% de la energía proveniente de la radiación solar está contenida, como ya antes se mencionó, entre longitudes de onda por debajo de $3\mu\text{m}$, mientras que un 99% de la radiación emitida por superficies negras o grises a 400K tiene longitudes de onda mayores a $3\mu\text{m}$.

La radiación térmica proveniente del Sol se propaga a través del espacio sin una atenuación apreciable hasta llegar a la atmósfera de la Tierra. Ésta muestra un espectro continuo que va desde el ultravioleta hasta la región infrarroja como se muestra en la ilustración 1.

Cuando la radiación solar penetra la atmósfera, la región ultravioleta menor a $0.3\mu\text{m}$ es limitada por el ozono, mientras que varias líneas de absorción aparecen en la región de infrarrojo debido al vapor de agua y dióxido de carbono en la atmósfera.

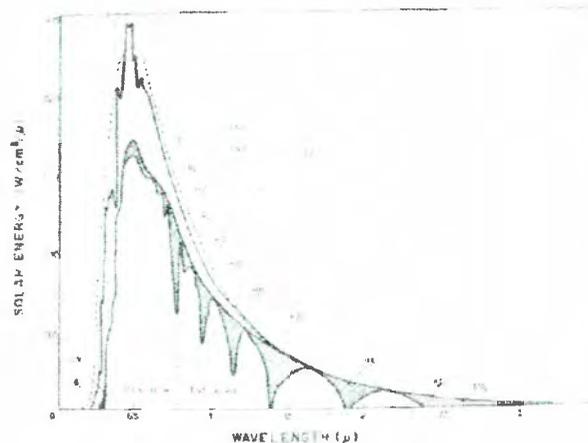


Ilustración 1 Espectro visible de la radiación solar; (a) fuera de la atmósfera, (b) radiación de cuerpo negro a 6000°K, (c) al nivel del mar

3. RADIACIÓN SOLAR

a) Propiedades radiativas y características de los materiales

La porción de radiación incidental reflejada está definida como la reflectancia ρ , la porción absorbida como la absorptancia α , y la fracción transmitida como transmitancia τ . De acuerdo con la primera ley de la termodinámica la suma de estos tres componentes debe ser igual a 1.

Ecuación 6. Relación de Absortancia, Transmitancia y Reflectancia

$$\alpha + \tau + \rho = 1$$

En los cuerpos opacos no hay transmisión de radiación por lo tanto $\tau = 0$

La reflexión de la radiación puede ser especular o difusa. Cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, la reflexión es especular. Otra importante propiedad radiativa es la emitancia ϵ , que es la razón entre el poder emisor de una superficie real y el de la superficie de un cuerpo negro.

Todas las propiedades radiativas de los materiales α , τ , ρ y ϵ pueden expresarse como funciones de la longitud de onda y dirección. De acuerdo a esto, la emitancia direccional monocromática de una superficie, $\epsilon_\lambda(\theta, \phi)$, en una dirección específica dada por el ángulo azimut ϕ y el ángulo polar θ , es:

Ecuación 7. Emitancia direccional monocromática

$$\epsilon_\lambda(\theta, \phi) = \frac{I_\lambda(\theta, \phi)}{I_{b\lambda}}$$

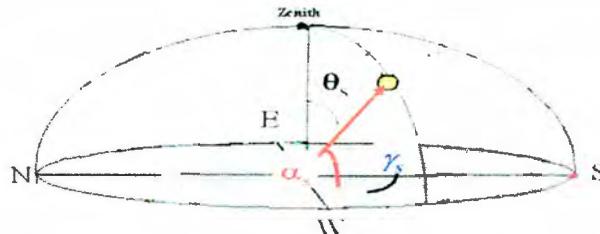


Figura 2 Posición del sol en el cielo

Donde los ángulos referidos son:

θ_s = ángulo polar solar

α_s = altura del sol

γ_s = azimut del sol

b) Intensidad de radiación emitida

La intensidad de radiación por radiación emitida $I_e(\theta, \phi)$ se define como la tasa a la cual la energía de radiación $d\dot{Q}_e$ es emitida en la dirección (θ, ϕ) por unidad de área normal a esta dirección y por unidad de ángulo sólido. Esto es:

Ecuación 8. Radiación emitida

$$I_e(\theta, \phi) = \frac{d\dot{Q}_e}{dA \cos \theta \cdot d\omega} = \frac{d\dot{Q}_e}{dA \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi} \quad (W/m^2 \cdot sr)$$

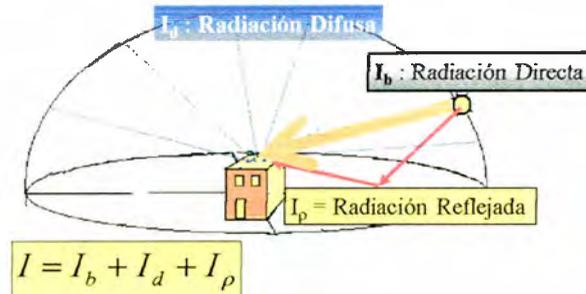


Figura 3 Intensidad de Radiación

c) Radiación incidente

Todas las superficies emiten radiación, pero también reciben radiación emitida o reflejada por otras superficies. La intensidad de la radiación incidente $I_i(\theta, \phi)$ se define como la tasa a la cual la energía de radiación dG es incidente desde la dirección (θ, ϕ) por unidad de área de la normal de la superficie receptora a esta dirección por unidad de ángulo sólido de esta dirección. Donde θ es el ángulo entre la dirección de la radiación incidente y la normal de la superficie.

El flujo de radiación incidente en la superficie desde todas las direcciones se llama irradiación G , y se expresa como:

Ecuación 9. Irradiación

$$G = \int dG = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_i(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (W/m^2)$$

La intensidad de radiación espectral $I_\lambda(\lambda, \theta, \phi)$ es la intensidad de radiación $I(\theta, \phi)$ por unidad de longitud de onda en el intervalo λ . La intensidad espectral por radiación emitida $I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi)$ puede definirse como la tasa a la cual la energía de radiación $d\dot{Q}_e$ es emitida a la longitud de onda λ en la dirección (θ, ϕ) por unidad del área normal a esta dirección, por unidad del ángulo sólido de esta dirección, y se puede expresar como:

Ecuación 10. Intensidad espectral por radiación emitida.

$$I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{d\dot{Q}_e}{dA \cos\theta \cdot d\omega \cdot d\lambda} \quad (W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$$

La intensidad espectral de radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura absoluta T a una longitud de onda λ ha sido determinada por Max Planck, y se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 11. Intensidad espectral de radiación emitida por cuerpo negro

$$I_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(hc_0/\lambda kT) - 1]} \quad (W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$$

Donde $h=6.6256 \times 10^{-34}$ J·s es la constante de Planck, $k=1.38065 \times 10^{-23}$ J/K es la constante de Boltzmann, y $c_0 = 2.9979 \times 10^8$ m/s es la velocidad de la luz en el vacío.

d) Emisividad

La emisividad de una superficie representa la relación entre de la radiación emitida por la superficie a una temperatura dada y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. La emisividad de una superficie se denota por ϵ , y varía entre cero y uno.

$$0 \leq \epsilon \leq 1$$

Emisividad es una medida de que tanto se aproxima la superficie a un cuerpo negro para el cual $\epsilon=1$.

La emisividad de una superficie real no es constante. Esta varía con la temperatura de la superficie así como de la longitud de onda y de la dirección de la radiación emitida. Por lo tanto diferentes emisividades se pueden definir para una superficie dependiendo de los elementos considerados. La emisividad más elemental de una superficie a una temperatura dada es la emisividad direccional espectral, que se define como la relación de la intensidad de radiación emitida por la superficie de una longitud de onda específica en una dirección específica y la intensidad de radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura, misma longitud de onda. Esto es:

Ecuación 12. Emisividad espectral

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{b\lambda}(\lambda, T)}$$

Donde los subíndices λ y θ son utilizados para denotar cantidades espectrales y direccionales respectivamente.

Considerando un cuerpo pequeño de área A_s , emisividad ε , y absorptividad α a temperatura constante T contenido dentro de un gran entorno isotérmico a la misma temperatura y tomando en cuenta que el gran entorno isotérmico forma una cavidad de cuerpo negro sin importar las propiedades radiativas de la superficie de cercado, y que el cuerpo dentro es demasiado pequeño para interferir con la naturaleza de la cavidad de cuerpo negro. Entonces, la radiación incidente en cualquier parte de la superficie del cuerpo pequeño es igual a la radiación emitida por el cuerpo negro a la temperatura T . Esto es, $G = E_b(T) = \sigma T^4$, la radiación absorbida por el cuerpo pequeño por unidad de superficie área es

Ecuación 13. Radiación absorbida

$$G_{abs} = \alpha G = \alpha \sigma T^4$$

La radiación emitida por el cuerpo pequeño es

Ecuación 14. Radiación emitida

$$E_{emit} = \varepsilon \sigma T^4$$

Considerando que el cuerpo pequeño está en equilibrio térmico con el entorno, la tasa de transferencia de calor al cuerpo debe ser cero. Por lo tanto, la radiación emitida por el cuerpo debe ser igual a la radiación absorbida por él:

Ecuación 15

$$A_s \varepsilon \sigma T^4 = A_s \alpha \sigma T^4$$

Entonces:

Ecuación 16

$$\dot{E} = \sigma \varepsilon A T^4$$

B. CONCENTRADORES SOLARES

1. SISTEMAS TERMOSOLARES DE CONCENTRACIÓN (STCS)

Son sistemas de aprovechamiento de la energía solar para temperaturas altas y medias, las cuales se obtienen por medio de la concentración de la radiación directa. Dentro de éstos sistemas existen diversas aplicaciones:

- ⊕ Aplicaciones energéticas: Generación de electricidad, producción de calor para procesos industriales o combinación (sistemas de cogeneración)
- ⊕ Aplicaciones de química solar: solarización de reacciones químicas endotérmicas para conversión de energía radiante en energía química
- ⊕ Otras: Desalación del agua, decodificación de efluentes industriales y agrícolas y tratamiento o síntesis de materiales.

a) Opciones de STCS

Dentro de la funcionalidad de un STCS existen diversos tipos de sistemas que pueden ser utilizados ya sea como fuentes únicamente solares o en conjunto con otra fuente de energía (híbridos). Las diferentes opciones de STCS son las siguientes:

- ⊕ Colector cilindro parabólicos
- ⊕ Discos parabólicos (Paraboloide de Revolución)
- ⊕ Sistemas de Receptor Central

(1) Colector Cilindro Parabólico (CCP)

Es un sistema compuesto por un espejo cilindro-parabólico que refleja la radiación solar directa concentrándola en un tubo receptor que se encuentra en la línea focal de la parábola. Podemos decir que es un colector solar de concentración en el foco lineal. Éstos colectores operan eficientemente en temperaturas de hasta 450°.

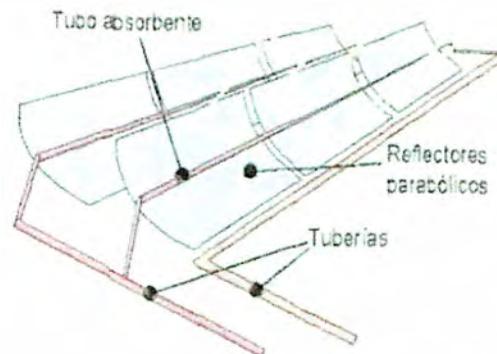


Figura 4 Colector Cilindro Parabólico

Componentes:

- ⊕ Reflector cilindro parabólico
- ⊕ Tubo absorbente
- ⊕ Sistema de seguimiento del sol
- ⊕ Estructura Metálica

Dentro del desarrollo con este tipo de colectores tenemos que la mayor parte la tiene España con cuatro campos de CCP todos en la provincia de Almería: Campo Acurex cuya potencia eléctrica es de 0.5MWe; Lazo Ace 10 de 50kWe; Lazo DISS de 0.5MWe y Lazo Eurotrough de 50kWe. Existen diversas plantas en los Estados Unidos llamadas plantas SEGS con una capacidad de 354MWe. También existen campos en Israel con una capacidad de 0.5MWe.

(2) Colector de Receptor Central (SCR)

El colector en este caso es un grupo de concentradores individuales llamados helióstatos, los cuales dirigen la radiación solar hacia un receptor central que generalmente está a cierta altura sobre el suelo en una torre. Este tipo de colector concentra la radiación en tres dimensiones por lo que pueden llegar a tener un valor elevado de razón de concentración y por lo tanto operar eficientemente a temperaturas por encima de los 1000°C

Componentes:

- ⊕ Sistema colector o campo de helióstatos
- ⊕ Torre, si la hay.
- ⊕ Receptor
- ⊕ Sistema de Control
- ⊕ Sistemas extra para la evaluación de imágenes y ajuste de offsets

A nivel mundial el desarrollo de este tipo de colector se puede encontrar en España, Estados Unidos y en Israel. En el primero existen los campos SSPS-CRS con 0.5MWe de capacidad y el campo CESA 1 de 1.2MWe. En Estados Unidos se encuentran los campos Solar One y Solar Two en California ambos con una capacidad de 10MWe. En Israel está el Campo del Instituto Weizmann que es un centro de investigación.

(3) Concentradores Solares de Curvatura Compuesta

(a) Discos Parabólicos (DP)

Consiste en un reflector o conjunto de ellos con forma de paraboloide de revolución y un receptor que se encuentra en el foco el mismo. La radiación solar que se concentra en el paraboloide tiene su punto de incidencia sobre el receptor donde se convierte en energía térmica. Los DP tienen como características un alto rendimiento, modularidad y autonomía.

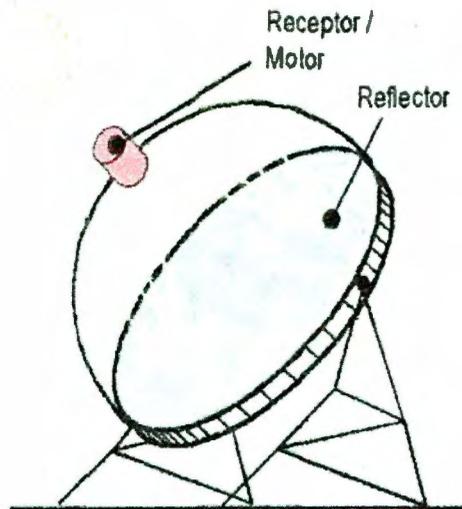


Figura 5 Sistema de disco parabólico

Componentes

- ⊕ Concentrador
- ⊕ Receptor
- ⊕ Sistema de generación
- ⊕ Estructura de soporte y mecanismos.

En cuanto al desarrollo de los DP tenemos que se han desarrollado prototipos que funcionan con potencias de entre 15kWe y 50kWe, los cuales se encuentran instalados en centros de investigación en España, Alemania, Estados Unidos y Arabia Saudita entre otros.

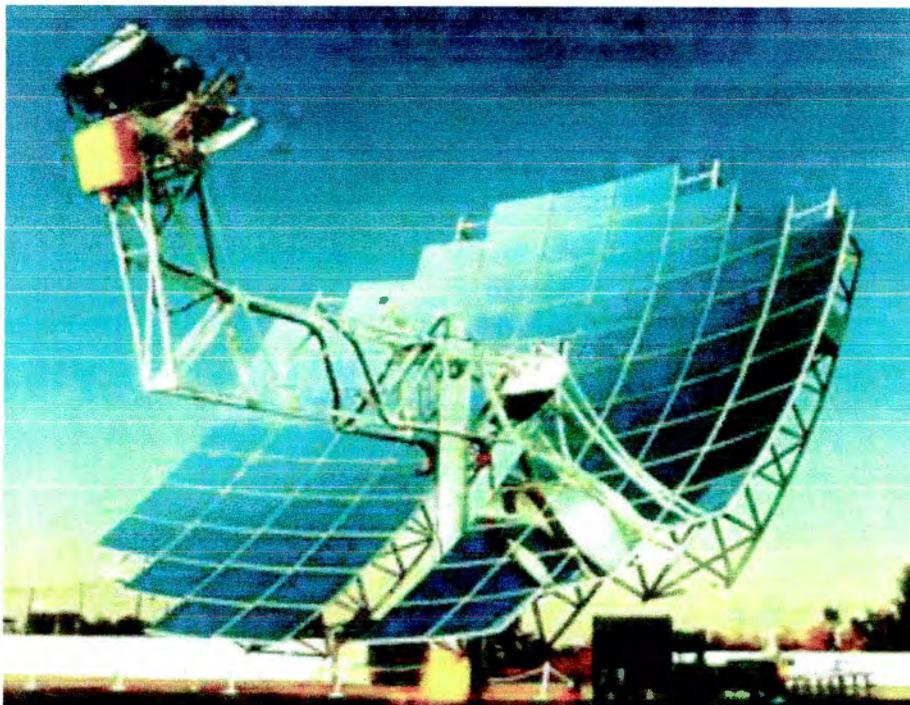


Figura 6. Concentrador Parabólico

(b) Concentradores Esféricos

Éstos concentradores utilizan una geometría esférica en lugar de una parabólica. En este tipo de concentración existe una aberración esférica, lo cual causa que el flujo reflejado se encuentre a lo largo de una línea en lugar de concentrarse en un punto como ocurre con otros concentradores de curvatura compuesta. Debido a ésta geometría los rayos que son interceptados cerca de la orilla del colector interceptan el absorbedor en ángulos de incidencia muy grandes. Debido a esto se necesita que el recubrimiento del absorbedor tenga una reflectancia baja o que ningún recubrimiento sea utilizado para evitar que disminuya la eficiencia óptica. Por otro lado la eficiencia de éste concentrador es menor

comparada con otros concentradores de curvatura compuesta, debido en mayor parte a la baja razón de concentración que se puede obtener.



Figura 7. Concentrador Esférico

(c) Concentradores Parabólicos Compuestos (CPC)

La geometría de éste tipo de concentrador consiste en dos segmentos parabólicos, cuyo foco está localizado en las orillas de la superficie del receptor. Los ejes de los segmentos parabólicos están orientados lejos del eje del CPC por un ángulo de aceptación. Ciertas pérdidas ópticas presentes en colectores seguidores son despreciables debido a su gran aceptación de banda y la habilidad de utilizar elementos ópticos imprecisos. Existen ciertos parámetros - reflectancia del espejo, transmitancia de la cubierta y la absortancia del absorbedor- que sí tienen que ser considerados en este tipo de concentrador. Por un lado los efectos de reflectancia son ligeramente diferentes para CPC dado que éste no forma una imagen nítida del sol.

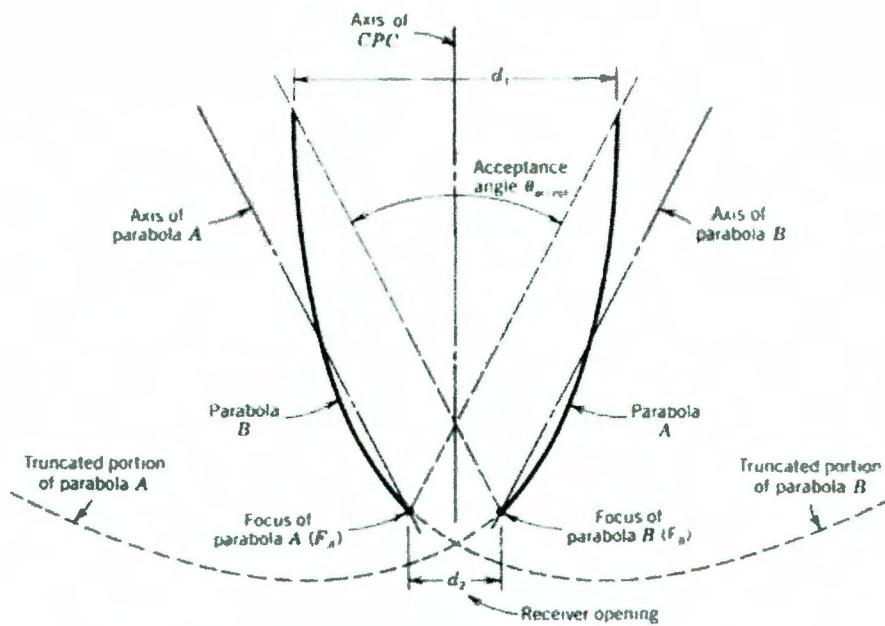


Figura 8 Concentrador Parabólico Compuesto

(4) Reflectores y Lentes de Fresnel

Un reflector o lente de Fresnel se obtiene cuando una superficie óptica lisa de un reflector o un lente se puede segmentar para obtener la misma concentración, el concentrador resultante es llamado Concentrador Fresnel. La utilización de reflectores Fresnel para colectores grandes reduce a carga debido al viento y simplifica su manufactura. Una lente de Fresnel puede alcanzar una concentración cercana a la correspondiente a un lente plano convexo con mucho menos material y bajos costos de fabricación. Una de las desventajas de éste tipo de concentrador es que los bordes se desgastan y redondean en el proceso de manufactura lo que hace a los bordes ineficaces. Otra de las desventajas ocurre cuando la incidencia de los rayos no es totalmente normal. En éste caso la distancia al punto focal que se tiene cuando los rayos son normales al lente o reflector se acorta lo que causa que la imagen del sol aparezca más amplia.

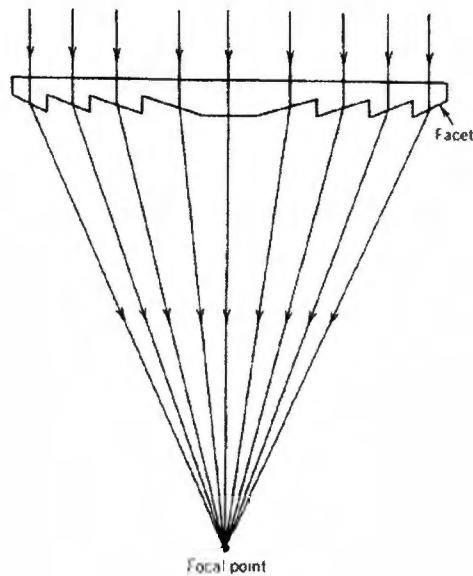


Figura 9 Lente de Fresnel

2. EL SISTEMA CONCENTRADOR SOLAR.

Los sistemas colectores de energía solar se componen en general de un sistema colector y un sistema receptor. El sistema colector tiene como función captar la radiación solar y concentrarla sobre el receptor, donde la energía radiante se convertirá posteriormente en energía térmica.

a) Colector Cilindro-Parabólico

Este sistema se compone de 4 elementos principales:

- ⊕ Reflector de cilindro parabólico
- ⊕ Tubo absorbente
- ⊕ Sistema de seguimiento del sol
- ⊕ Estructura metálica

(1) El reflector cilindro parabólico

El espejo parabólico obtiene parte de su nombre justamente de la sección transversal parabólica del receptor. Se extiende longitudinalmente. A lo largo de éste, y sobre el punto focal de la parábola se localiza el concentrador. El objetivo es concentrar la energía solar incidente sobre su superficie, sobre la línea focal de su geometría. La superficie

especular se consigue a base de partículas de plata o aluminio depositadas sobre un soporte que le da la suficiente rigidez.

(2) El tubo absorbente

Es un tubo cilíndrico en el que se concentra la radiación. Usualmente en el interior de dicho tubo se coloca un fluido que absorbe la energía, convirtiéndose en calor. Este fluido se hace circular a lo largo del tubo para transmitir la energía obtenida.

Este componente del sistema es de gran importancia, pues es de él de quien depende en gran parte el rendimiento del colector. Puede ser un solo tubo o bien dos tubos concéntricos. Para lograr resultados aceptables, este tubo necesita características especiales. Una de ellas es que debe tener una absorptividad mayor a 90% y emisividad en el espectro infrarrojo menor al 30%. Cumpliendo estas características puede obtenerse un mayor rendimiento térmico del sistema.

(3) El sistema de seguimiento del sol

Este tipo de colector trabaja principalmente con radiación solar directa. Es por ello que la posición del colector respecto al astro solar sea de gran importancia y por lo tanto su mecanismo para seguir la trayectoria que el sol describe a lo largo del día.

(4) La estructura metálica

Este componente del sistema tiene como función principal dar la rigidez y soporte que el sistema necesita para mantener a los demás componentes ubicados en sus respectivas posiciones.

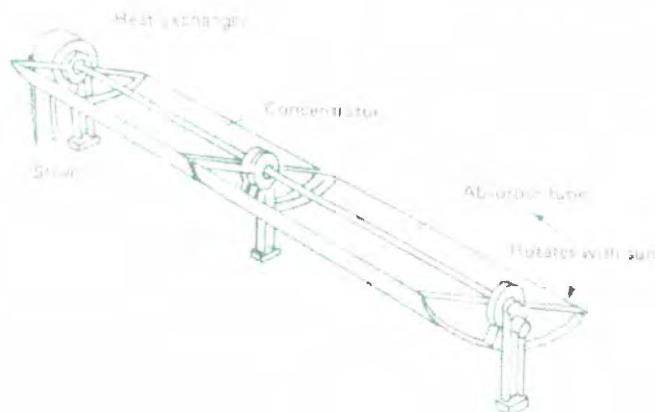


Figura 10 Concentrador Cilindro-Parabólico

b) Sistemas de Receptor Solar

O también conocidos como sistemas de torre. Son reconocibles porque el sistema se compone de un grupo de concentradores individuales denominados helióstatos. Cada uno de ellos dirige la radiación solar que recibe hacia un receptor central que se localiza a considerable altura sobre el suelo, normalmente en una torre. Este tipo de sistema requiere estar completamente fijo al piso, también con un sistema de seguimiento de la trayectoria solar. Este sistema se compone de 4 elementos básicos que se explican a continuación.

(1) Helióstatos

Característico de este tipo de sistemas, se compone de una superficie reflectante, una estructura de soporte, mecanismos de movimiento y sistema de control. Los últimos dos con el propósito de que el receptor siga el movimiento del sol. Las superficies reflectantes se consiguen de manera similar a las de los cilindro-parabólicos a base de espejos de vidrio.

Este tipo de sistema de recepción solar requiere ser instalado en un campo, donde se fijen los helióstatos para dirigir la radiación incidente hacia el receptor localizado en una torre.

(2) La torre

Ésta sirve de soporte para el receptor. Éste normalmente se localiza fijo a una altura específica hacia la que todos los heliostatos del campo dirigen la radiación que reflejan.

(3) El receptor

Es el dispositivo en el que la radiación solar concentrada se transforma en energía térmica. Se localiza en la torre, y es alimentado con la radiación concentrada proveniente de los heliostatos.



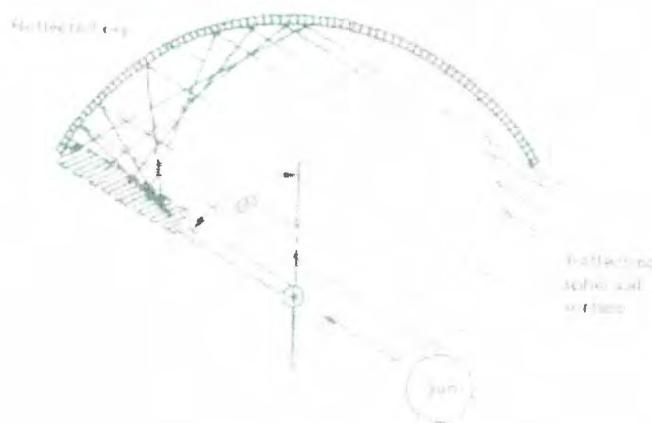
Figura 11 Sistema de Receptor Solar

c) Concentrador Esférico

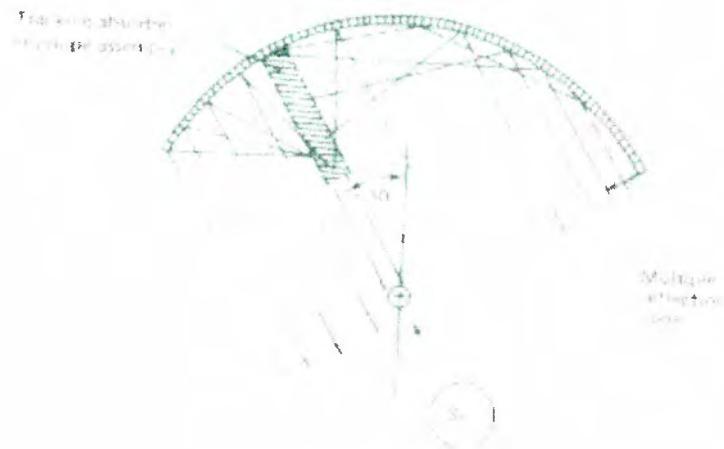
Este tipo de colector de curva compuesta tiene geometría esférica. A diferencia del colector parabólico de revolución, concentra los rayos reflejados a lo largo de una línea. Los rayos que son interceptados en la orilla del absorbedor son los que tienen ángulos de incidencia mayores. Es por ello que para evitar deficiencias ópticas se debe utilizar un absorbedor con muy poca reflectancia.

(1) El colector

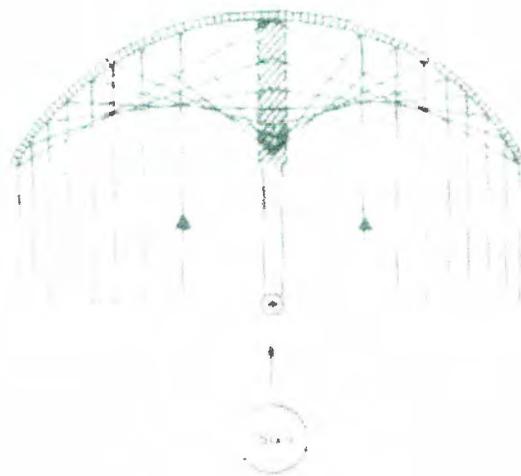
Es un colector de curva compuesta, cuya sección transversal es semicircular, con lo cual se consigue una superficie reflejante esférica. Al ser de esta manera, el colector puede reflejar los rayos solares desde muchos ángulos, con lo cual se evita tener que movilizar el concentrador, como se muestra en la imagen siguiente.



a) Recibidor en el extremo



b) Recibidor en posición media



b) Recibidor centrado

Figura 12 Colector Esférico con recibidor móvil

(2) El absorbedor

Dada la reflexión de los rayos solares sobre la superficie esférica, el receptor debe originarse sobre la superficie y proyectarse hacia el centro de ésta. Para poder captar los rayos reflejados en cualquier momento del día, normalmente se usa un absorbedor móvil

que se deslice sobre la superficie. En general, se usa un absorbedor cilíndrico ya que éste puede obtener los rayos reflejados.

Cabe destacar que la razón de concentración de este tipo de colectores no alcanza grandes ganancias, por lo que es más sensible a la temperatura de operación que concentradores en los que se reflejan los rayos hacia un solo punto. El sistema de movimiento del absorbedor esférico no muestra mayor ventaja sobre los demás *concentradores* dada la baja razón de concentración que puede alcanzar.

3. EL SISTEMA CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO

a) *Paraboloide de Revolución*

Estos sistemas se componen de un reflector, un receptor y una estructura de soporte. Tienen forma de paraboloide de revolución, y a diferencia del colector cilíndrico-parabólico, la recepción de la radiación reflejada se concentra en el punto foco del paraboloide. Así, el área del receptor es mucho menor, mejorando la razón de concentración, pudiendo alcanzar un valor de 3000. Estos sistemas destacan por su alto rendimiento.

(1) El concentrador

La superficie reflexiva es la de un paraboloide de revolución. Para obtener dicha forma se pueden colocar pequeñas piezas que en conjunto logren aproximar la geometría del paraboloide, o bien con una membrana tensionada de metal. Actualmente el diámetro de la apertura oscila entre 7 y 17 metros.

Es una cavidad con la geometría de un paraboloide de revolución. La radiación es recibida a través de la apertura superior del instrumento, situada a la altura del foco del paraboloide. Dicha radiación incide en la superficie y es dirigida hacia el receptor.

(2) El receptor

Es la parte del sistema que funciona como punto de enlace entre el concentrador y la función térmica del sistema. Tiene como principal objetivo absorber la radiación solar reflejada por el concentrador. Su otra función es la de transferir la energía absorbida a energía térmica. Generalmente son receptores de cavidad en los que la radiación concentrada entra por una apertura para incidir sobre el absorbedor. Esto se hace con el fin de reducir pérdidas radiativas y convectivas.

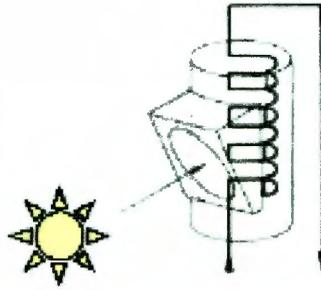


Figura 13 Receptor de Cavidad

(3) Estructura y Sistema de Seguimiento

Es fundamental que este tipo de concentrador siga el movimiento del sol a lo largo del día, es por ello que cuenta con este sistema para hacer el seguimiento del sol en dos ejes. Hay dos métodos principalmente para realizar dicho seguimiento. El primero es en acimut-elevación. Se realiza con dos ejes y es sencillo de construir. El segundo es seguimiento polar, en el que uno de los ejes tiene un movimiento muy lento para seguir las variaciones estacionales de la posición del sol, y el otro eje se mueve a velocidad constante. La ventaja de este sistema de seguimiento es que es más sencillo de controlar.

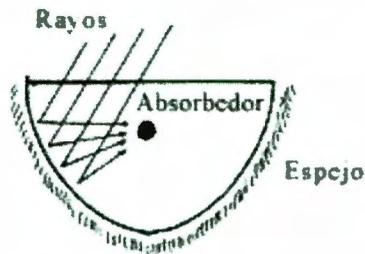


Figura 14 Paraboloide de Revolución

4. DEFINICIÓN DE RAZÓN DE CONCENTRACIÓN

El término razón de concentración se utiliza para describir la cantidad de concentración de energía luminosa alcanzada por un colector dado. La definición más común de CR es la de Razón de concentración Geométrica es decir la razón entre el área de apertura y el área de receptor. También existe la razón de concentración de flujo la cual se define como la razón del promedio del flujo de energía en el receptor comparado con ese mismo flujo en la apertura. La razón de concentración de flujo local se puede definir también como la

razón del flujo de cualquier punto del receptor comparado con el mismo en la apertura. La razón de concentración geométrica tiene un límite superior que depende de si la concentración es en tres dimensiones (circular) como en el caso de un paraboloide de revolución o en dos dimensiones como lo es un concentrador cilíndrico parabólico (lineal).

Para poder concentrar la radiación solar se necesita reflejar y refractar el flujo incidente en el área de apertura A_a en un área de receptor/absorbedor A_r más pequeña. La razón de concentración óptica CR_0 es definida como la razón del flujo solar I_r en el receptor y el flujo I_a en la apertura es decir:

Ecuación 17. Razón de Concentración Óptica

$$CR_0 = \frac{I_r}{I_a}$$

Por su parte la razón de concentración geométrica está basada en las áreas:

Ecuación 18. Razón de Concentración Geométrica

$$CR_0 = \frac{A_r}{A_a}$$

CR_0 nos da una razón de concentración más precisa, dado que toma en cuenta las pérdidas ópticas de los elementos que reflejan y refractan. Sin embargo esta razón de concentración no nos permite saber acerca de las pérdidas térmicas, debido a que son proporcionales al área y el CR_0 no tiene relación alguna con el área del receptor.

a) Límites Termodinámicos de Concentración

Mediante la presente sección se lleva a cabo el análisis de las características de colectores solares de cilindro parabólico y de plato parabólico con el objetivo de determinar los límites de concentración de dichos dispositivos de acuerdo a la forma y a las dimensiones de éstos, es importante tomar en cuenta éste análisis con el fin de optimizar el diseño de acuerdo a las necesidades de este proyecto, pues como se puede observar en ésta sección los dispositivos en dos dimensiones tienen límites de concentración termodinámicos muy por debajo de los límites de concentración de los sistemas tridimensionales.

En la figura 15 se muestra un esquema que representa a cualquier dispositivo de concentración en donde se muestran la fuente de la radiación, la apertura y el receptor ambos del concentrador. La fuente representa una fuente difusa que puede ser un punto móvil como lo es el sol.

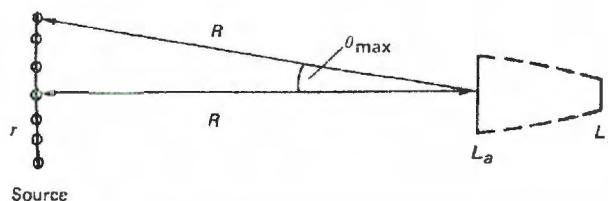


Figura 15 Diagrama de la geometría sol-concentrador en dos dimensiones

Existe un factor de radiación f_{12} que se define como la fracción de radiación emitida desde la superficie 1 que alcanza la superficie 2 por cualquier medio de transmisión. Para el siguiente análisis siguiente se necesita que la segunda ley de la termodinámica tenga además:

Ecuación 19

$$A_s \mathfrak{J}_{sa} = A_r \mathfrak{J}$$

Ecuación 20

$$A_s \mathfrak{J}_{sr} = A_r \mathfrak{J}_{rs}$$

Donde a es apertura, r es receptor y s la fuente. El f se refiere a un factor de intercambio entre superficies no-negras y F simboliza un intercambio para superficies negras. Por medio de estas expresiones el CR puede ser expresado de la siguiente manera:

Ecuación 21 Razón de Concentración

$$CR = \frac{A_a}{A_r} = \frac{\mathfrak{J}_{sa} \mathfrak{J}_{rs}}{\mathfrak{J}_{as} \mathfrak{J}_{sr}}$$

Para el mejor concentrador posible toda la radiación que entra en la apertura A_a llega al receptor A_r , es decir:

Ecuación 22. Factor de Forma

$$\mathfrak{J}_{as} = F_{as}$$

donde F_{as} es el factor de forma entre dos superficies negras. Si utilizamos éstas ecuaciones en la CR tenemos:

Ecuación 23. Razón de Concentración con Factor de forma

$$CR = \frac{\mathfrak{J}_{rs}}{F_{as}}$$

Por la segunda ley $\tau \leq 1$

Ecuación 24.

$$CR < CR_{\max} = 1/F_{as}$$

Ésta ecuación establece que la máxima concentración permitida por la segunda ley es recíproca al factor de forma F_{as} .

El factor de forma F_{as} para un concentrador solar en dos dimensiones se puede obtener del diagrama de curvatura simple como el cilindro-parabólico por reciprocidad (suponiendo cuerpos negros):

Ecuación 25. Factor de forma

$$A_r F_{sa} = A_a F_{as}$$

Ecuación 26. Factor de forma dos dimensiones

$$F_{as} = F_{sa} \left(\frac{A_s}{A_a} \right)$$

El ángulo θ_{\max} es el ángulo que se muestra a continuación en la figura 16:

Ecuación 27. Factor de forma y ángulo máximo

$$F_{as} = \sin \theta_{\max}$$

Por lo tanto la máxima concentración

Ecuación 28. Razón de Concentración del medio ángulo

$$CR_{\max 2D} = \frac{1}{\sin(\theta_{\max})}$$

El término de medio-ángulo de aceptación se refiere a la cobertura de la mitad de la zona angular dentro de la cual la radiación es aceptada (vista) por el receptor de un concentrador. Se dice que la radiación se acepta por encima de un ángulo de aceptación de $2\theta_{\max}$ porque la radiación incidente dentro de este ángulo alcanza al absorbedor después de haber pasado por la apertura. Los ángulos de aceptación prácticos van 0.5° a 180° . En la figura 16 podemos observar cuál es el medio ángulo de aceptación anteriormente descrito:

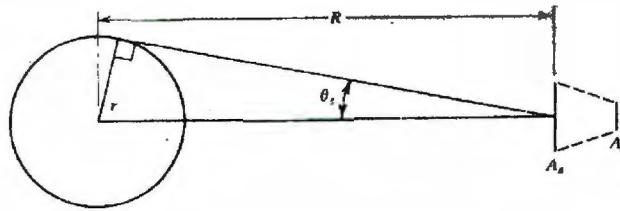


Figura 16 Medio ángulo de aceptación

Los concentradores de tipo doble curvatura o plato parabólico tienen un límite de concentración mayor que puede ser evaluado extendiendo el método anteriormente utilizado a 3 dimensiones. El resultado de dicho método es:

Ecuación 29. Razón de Concentración 3D

$$CR_{max\ 3D} = \frac{1}{\sin^2(\theta_{max})}$$

De los análisis anteriores si el índice de refracción $n > 1$ la máxima concentración es:

Ecuación 30

$$CR_{max\ 2D} = \frac{n}{\sin(\theta_{max})}$$

Ecuación 31

$$CR_{max\ 3D} = \frac{n}{\sin^2(\theta_{max})}$$

También presentamos una imagen en donde podemos ver la relación entre la razón de concentración y la temperatura en el receptor.

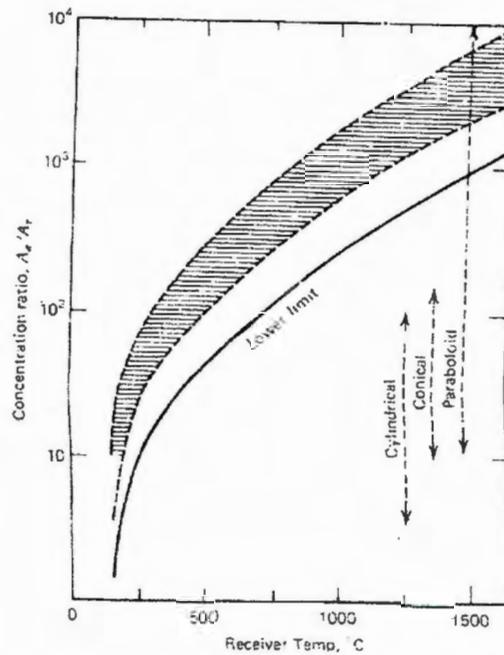


Figura 17 Relación entre razón de concentración y temperatura del receptor

b) Límites Ópticos de Concentración

Existen los límites de concentración definidos por los límites prácticos del ángulo de visión, es decir el CR máximo limitado solamente por el tamaño del disco solar aparente y alcanzado con un seguimiento continuo y preciso así como el CR mínimo basado en un número específico de horas de colección sin seguimiento. El ángulo de aceptación del disco solar es de 0.5° por lo que el medio ángulo es de 0.25° .

Dos dimensiones:

Ecuación 32. Medio ángulo de aceptación en dos dimensiones

$$CR_{max\ 2D} = \frac{1}{\sin(0.25^\circ)} = 216$$

Tres dimensiones:

Ecuación 33. Medio ángulo de aceptación en tres dimensiones

$$CR_{max\ 3D} = \frac{1}{\sin^2(0.25^\circ)} = 46,000$$

En la práctica estos niveles de concentración no son alcanzables debido a errores de seguimiento e imperfecciones en la reflexión/refracción de la superficie.

c) Eficiencia Óptica del Concentrador Parabólico

Se considerará que para un paraboloide el área de apertura es πR^2 donde R es el radio de la apertura. Por otra parte, si el receptor tiene forma esférica, la porción de éste que recibe la radiación está dada por $4\pi R_r^2$. En esta expresión, R_r es el radio del receptor esférico.

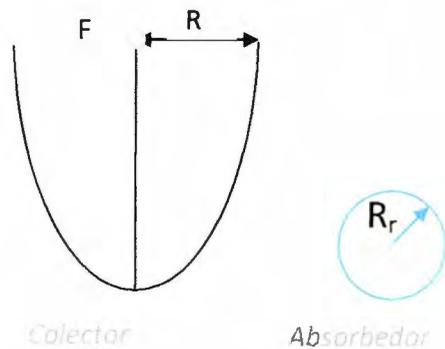


Figura 18 Geometría de colector y absorbedor

Para obtener una calidad óptica perfecta, el receptor debe recolectar todos los rayos con el medio ángulo de aceptación (θ_{max}), para ello el radio del receptor debe ser:

Ecuación 34. Radio del receptor

$$R_r = \left(\frac{R}{\sin \phi} \right) \sin \theta_{max}$$

Donde ϕ es el ángulo del arco. Mientras menor es, la apertura del colector también disminuye. El ángulo del arco es el comprendido entre el eje de revolución del paraboloide y la normal al extremo del mismo

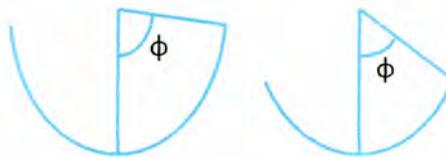


Figura 19. Ángulo del arco

Así pues la razón de concentración se define como:

Ecuación 35. Razón de concentración

$$CR = \frac{A_a}{A_r} = \frac{\pi R^2}{4\pi \left(\frac{R}{\sin \phi}\right)^2 \sin^2 \theta_{max}}$$

Donde A_a es el área de apertura y A_r es el área del receptor.

Si se simplifica la ecuación se obtiene que:

Ecuación 36. Razón de concentración (simplificado)

$$CR = \frac{A_a}{A_r} = \frac{\sin^2 \phi}{4 \sin^2 \theta_{max}}$$

En esta ecuación no se toman en cuenta las pérdidas provocadas por la sombra de la estructura o del absorbedor sobre la superficie reflejante. Si se compara con el límite térmico de concentración, se puede observar que la razón óptica es apenas una cuarta parte de la razón de concentración térmica:

ϕ	θ_{max}	CR térmico	CR óptico	$\frac{CR_{optico}}{CR_{termico}}$
[°]	[°]	$CR = \frac{1}{(\sin \theta_{max})^2}$	$CR = \frac{\sin^2 \phi}{4 \sin^2 \theta_{max}}$	
90	¼	52,525	13,131	¼
90	½	13,131	3,283	¼
90	1	3,283	820	¼

5. BALANCE DE ENERGÍA SOBRE UN COLECTOR SOLAR CUALQUIERA.

En cualquier proceso de intercambio de calor podemos tener diferentes medios de transportación del mismo: Radiación, conducción y convección. En esta sección se describirá brevemente cada uno de estos medios para poder entender el balance energético que se presentará acerca de un concentrador de doble curvatura como lo es el paraboloide de revolución.

a) Conducción

La conducción se refiere a la transferencia de partículas energéticas de una substancia a las partículas de menos energía, como un resultado de las interacciones entre partículas. La conducción puede tomar lugar en sólidos, líquidos o gases. En gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y la difusión de moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos la conducción se debe a una combinación de vibraciones de las moléculas y a la transportación de energía de los electrones libres.

La velocidad con la que se conduce el calor en un medio, depende de la geometría del medio, su espesor y el material del que está conformado el mismo, así como la diferencia de temperatura a través de éste.

Si se considera una conducción de calor estable a lo largo de una pared de espesor $\Delta x=L$ y un área A , con una diferencia de temperatura $\Delta T=T_2-T_1$, tenemos que la velocidad de transferencia de calor Q a través de la pared se duplica cuando la diferencia de temperatura ΔT a través de la pared o cuando del área A normal a la dirección de la transferencia del calor se duplica. Al contrario, la velocidad de la transferencia de calor se divide cuando el espesor L es duplicado. Por lo anterior, podemos concluir que la velocidad con la que se transmite el calor es proporcional a la diferencia de temperatura a través del medio y al área de transmisión, pero es inversamente proporcional al espesor del mismo.

Ecuación 37. Definición de Velocidad de Conducción

$$\text{Velocidad de Conducción} = \frac{\text{Área} \times \text{Diferencia de Temperatura}}{\text{Espesor}}$$

Ó

Ecuación 38. Velocidad de Conducción

$$Q_{cond} = kA \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

donde la constante de proporcionalidad k es la conductividad térmica del material, es decir la capacidad del material para conducir el calor.

(1) Difusividad Térmica

El término representa qué tan rápido el calor se difunde a través de un material y se define como:

Ecuación 39. Difusividad térmica

$$\alpha = \frac{\text{Calor conducido}}{\text{Energía Guardada}} = \frac{k}{\rho C_p}$$

k representa que tan bien el material conduce el calor y la capacidad calorífica ρC_p representa cuanta energía el material guarda por unidad de volumen. Por lo tanto podemos decir que la difusividad térmica es la razón entre el calor conducido a través del material y el calor guardado por unidad de volumen.

b) Convección

La convección es el modo de transmisión de energía entre una superficie sólida y un líquido o gas adyacente que se encuentra en movimiento. La convección incluye los efectos combinados de la conducción y el movimiento del fluido. A mayor movimiento del fluido mayor será la transferencia de calor por convección. Existen dos tipos de convección: La *convección forzada*, que ocurre cuando el fluido es forzado a fluir sobre la superficie del sólido por un medio externo como un ventilador, una bomba o el viento; La *convección natural* (o libre) ocurre cuando el movimiento del fluido es causado por fuerzas de flotación provocadas por la diferencia de densidades debido a la variación de temperatura en el fluido. Los procesos de transferencia de calor donde ocurre un cambio de fase de un fluido también son considerados como convección.

La velocidad de transferencia de calor por medio de convección es mucho más sencilla. En ella se observa que esta velocidad es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 40. Transferencia de calor por convección

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty)$$

donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección (en $W/m^2 \cdot ^\circ C$), A_s es el área de la superficie donde se lleva a cabo la transferencia de calor, T_s es la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del fluido lo suficientemente lejos de la superficie. En la superficie la temperatura del sólido y la del fluido es la misma. El coeficiente h es un parámetro determinado experimentalmente cuyo valor depende de diferentes variables

como la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, propiedades del fluido, entre otras.

c) Radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en la forma de ondas electromagnéticas (fotones) como el resultado del cambio en la configuración electrónica de átomos y moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la radiación no necesita de un medio que intervenga en la transferencia. La transferencia de calor por medio de radiación es la más rápida y no tiene atenuación alguna en el vacío. Para los análisis referidos a la transferencia de calor, la radiación de interés es la radiación térmica, la cual es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Ésta característica diferencia a la radiación térmica de otros tipos de radiación electromagnética como los rayos x, los rayos gamma, las microondas entre otras.

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en mayor o menos medida. La radiación se considera como un fenómeno superficial para sólidos que son opacos a la radiación térmica dado que la radiación emitida desde el interior de dichos sólidos

La velocidad máxima de radiación que puede ser emitida de una superficie a una temperatura absoluta T_s está dada por la Ley Stefan-Boltzmann como sigue:

Ecuación 41. Transferencia de calor por radiación

$$Q_{emitido,max} = \sigma A_s T_s^4$$

Donde $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ que es la constante Stefan-Boltzmann. Esta radiación máxima se obtiene de la superficie de un cuerpo negro. La radiación emitida por todas las superficies reales es menor a la radiación de cuerpo negro a la misma temperatura, expresada de la siguiente manera:

Ecuación 42. Calor emitido

$$Q_{emitido} = \epsilon \sigma A_s T_s^4$$

Donde ϵ es la emisividad de la superficie. Anteriormente se discutió este concepto así como el de absorptividad (α). En general ambos conceptos (ϵ y α) dependen de la temperatura y la longitud de onda de la radiación.

Cuando la emisividad ϵ y el área de la superficie A_s a una temperatura absoluta T_s , está completamente encerrado por una superficie mucho más grande (o negra) a una temperatura absoluta T_{surr} separada por un gas (como el aire) que no interviene con la

radiación, la velocidad con la que se transfiere calor por radiación entre las dos superficies está dada por:

Ecuación 43. Transferencia de Calor por Radiación

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr}^4)$$

La transferencia de calor desde o hacia una superficie rodeada de un gas como el aire, ocurre de manera paralela a la conducción (o convección) entre la superficie y el gas. Por lo tanto el calor total está determinado añadiendo la contribución de ambos mecanismos de transferencia de calor. Esto generalmente se define como el coeficiente combinado de transferencia de calor $h_{combinado}$ que incluye los efectos tanto de radiación como de convección. La transferencia total de calor entonces se define como:

Ecuación 44. Transferencia de Calor Total

$$Q_{total} = h_{combinada} A_s (T_s - T_{\infty})$$

En este caso el coeficiente h es esencialmente el de la transferencia de calor por convección que además incluye los efectos de la radiación.

d) Mecanismos de Transferencia de Calor Simultáneos

Aunque existen tres mecanismos diferentes para la transferencia de calor, los tres no pueden existir simultáneamente en un medio. En un sólido puede existir la radiación y la conducción pero no la convección. Sin embargo un sólido puede tener transferencia de calor por convección y/o radiación en la superficie si ésta se encuentra expuesta a un fluido y otras superficies. Cuando se habla de una transferencia de calor en un fluido, se tiene solamente conducción ó convección pero no ambos y en el vacío solo se puede tener radiación dado que los otros dos mecanismos necesitan de materia para poder ocurrir.

6. BALANCE DE ENERGÍA EN EL RECIBIDOR DE UN CONCENTRADOR SOLAR

Una vez establecidos los mecanismos de transferencia de calor podemos aplicar estos conceptos para hacer un balance de energía en el concentrador y más específicamente en el receptor del concentrador.

Utilizando los mecanismos que se utilizan para hacer el balance de energía en el receptor son los de convección y radiación; la primera dado que el calor que absorbe la superficie sólida proviene de un gas (el aire) y la segunda dado que la fuente es el sol, una fuente de radiación. También se utiliza el concepto de absorptancia dado que lo que necesitamos es que el receptor absorba la mayor cantidad de calor posible, lo cual podemos modificar si tenemos un material con alta absorptancia.

Partiendo del hecho que nuestra fuente energética es el sol, tenemos que éste nos da un flujo de aproximadamente 1000 W/m^2 , el cual podemos ver como una ganancia a la entrada al receptor:

Ecuación 45. Flujo de Calor

$$G = \alpha_v A G_{sol}$$

El flujo solar como ganancia se debe a que en el receptor tenemos una mayor concentración debido a la radiación, es decir la radiación que el colector recibe directamente del sol se concentra cuando llega al receptor. La razón con la que esta radiación se concentra es precisamente la razón de concentración que se analizó anteriormente. Con esto tenemos que la ganancia es:

Ecuación 46. Ganancia del Flujo de Calor

$$G = \alpha_v A_r CR G_{sol} = \alpha_v A_r \frac{A_r}{A_a} G_{sol}$$

La ganancia que se obtiene del flujo de la radiación solar se ve disminuida debido a las pérdidas del receptor, que en este caso son por radiación y por convección como sigue:

Por convección:

Ecuación 47. Pérdidas por Convección

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty)$$

Por radiación:

Ecuación 48. Perdidas por Radiación

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr}^4)$$

Con este planteamiento podemos obtener un primer balance de energía si tenemos en cuenta que las ganancias son iguales a las pérdidas:

Ecuación 49. Igualdad entre ganancias y pérdidas

$$\alpha_v A_r \frac{A_r}{A_a} G_{sol} = h A_s (T_s - T_\infty) + \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{sky}^4)$$

Este balance energético es de especial importancia, dado que el proyecto se basa en obtener una temperatura determinada (en este caso de mínimo 500°C) en el receptor específicamente. De este balance es importante distinguir cual es la diferencia entre las temperaturas que se presentan. Como anteriormente se mencionó la temperatura T_∞ el receptor es la temperatura del fluido lo suficientemente lejos de la superficie en el proceso de convección, mientras que en la radiación tenemos que la temperatura T_{sky} es la temperatura de un gas suficientemente separado de la superficie de radiación, el cual no tiene influencia en el proceso de radiación que se lleva a cabo en la superficie. En ambos casos T_s es la temperatura en la superficie del receptor la cual es la que necesitamos que sea la de 500°C.

Sin embargo, para el balance de energía del receptor establecido en la ecuación 52 se requiere conocer el coeficiente de transferencia de calor (h). Sin embargo dicho coeficiente depende de varios factores:

- velocidad de circulación
- densidad de fluido
- calor específico de las sustancias
- diámetro de los tubos
- viscosidad del fluido
- conductividad

Es posible determinarlo por medio de la realización de varios experimentos que nos ayuden a determinar dichas características. Sin embargo, existe una forma más práctica de hacer el mismo balance de energía. Dicho balance de energía se desarrolla a partir de establecer la igualdad entre el calor entrante y las pérdidas en el receptor, además de tomar en cuenta el material con el que se desarrolla, todo ello en estado estacionario.

En dicho estado, se plantea que si se cumple la ecuación 53, entonces es válida la ecuación 54 y el análisis que de ella se deriva:

Ecuación 50. Estado estacionario

$$\sum C_p = 0$$

Ecuación 51. Calor absorbido y perdido

$$Q_c = Q_U + Q_P$$

En la ecuación 54, Q_c representa el calor total en el sistema, Q_U es el calor útil y Q_P es el calor perdido por los efectos de convección y radiación.

La energía útil en el receptor se puede expresar como la energía útil en la superficie del receptor y la energía en el material contenido. Estas energías se calculan a través de la ecuación 55.

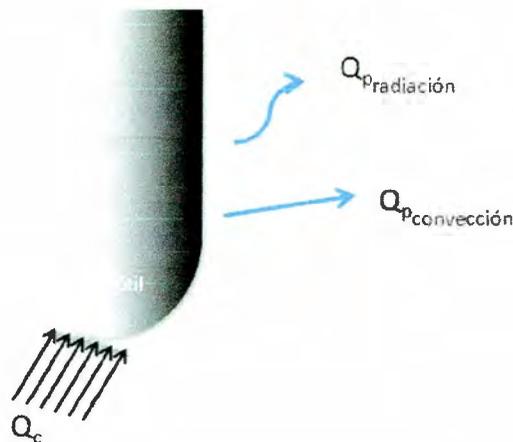


Figura 20. Flujos de calor en el sistema

Ecuación 52. Sustitución con Calor Especifico

$$Q_{\text{util}} = C_p \Delta T_{\text{material}} + C_{p_{\text{material}}} \Delta T_{\text{receptor}}$$

Las pérdidas globales se representan a través de la ecuación 56, donde se toma en cuenta la energía solar recibida, la temperatura en el receptor y el área sobre la que incide el flujo reflejado.

Ecuación 53. Pérdidas Globales

$$Q_p = U_g \Delta T A_{\text{receptor}} = Q_{\text{conveccion}} + Q_{\text{radiacion}}$$

La energía en el colector se define a partir del flujo y el área del concentrador. El flujo incidente en el concentrador se obtiene como se especifica en la ecuación 57 a partir de la eficiencia óptica y el flujo incidente en el concentrador.

Ecuación 54. Calor

$$Q_c = \eta_o I_b A_c$$

Con las energías obtenidas anteriormente se puede calcular la eficiencia térmica del sistema, como se especifica en la siguiente ecuación:

Ecuación 55. Eficiencia Térmica

$$\eta_{\text{termica}} = \frac{Q_c}{Q_{\text{sun}}}$$

Despejando el calor útil (Q_U) de la ecuación 54 se obtiene la ecuación 59:

Ecuación 56. Energía Útil

$$Q_U = Q_c - Q_p$$

Q_{sun} es la energía que entra en el concentrador:

Ecuación 57. Energía incidente del sol

$$Q_{\text{sun}} = I_b A_c$$

Q_p son las pérdidas globales, las cuales se componen de la forma que se establece en la ecuación 61:

Ecuación 58. Pérdidas globales

$$Q_p = Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}} = \eta_G (T_R - T_{\text{amb}}) A_R$$

Q_c es la energía que entra al receptor y se define como:

Ecuación 59. Energía en el receptor

$$Q_c = \eta_o I_b A_c$$

Sustituyendo la ecuación 59 en la 58:

Ecuación 60. Eficiencia térmica

$$\eta_{\text{ter}} = \frac{Q_C - Q_P}{Q_{\text{sun}}}$$

Sustituyendo las ecuaciones. 60,61 y 62 en 63:

Ecuación 61. Eficiencia térmica

$$\eta_{\text{term}} = \frac{\eta_o I_b A_C - \eta_{C_P} (T_R - T_{\text{amb}}) A_R}{I_b A_C}$$

Simplificando:

Ecuación 62. Eficiencia térmica

$$\eta_{\text{term}} = \frac{\eta_o I_b A_C}{I_b A_C} - U_{C_P} (T_R - T_{\text{amb}}) \frac{A_R}{A_C}$$

Entonces:

Ecuación 63. Eficiencia térmica

$$\eta_{\text{term}} = \eta_o - \frac{U_{C_P} (T_R - T_{\text{amb}})}{I_b} \cdot \frac{1}{C}$$

Donde C es la relación de concentración geométrica:

Ecuación 64. Sustitución con Calor Específico

$$C = \frac{A_C}{A_R}$$

Partiendo de este balance de energía, tenemos varios factores a considerar para la obtención de la temperatura deseada, es decir todas las variables que se pueden modificar ya sea por el diseño del concentrador o por las propiedades de los materiales que se pueden utilizar. Tenemos que las variables a controlar e investigar son:

- ⊕ Absortividad. Para que las ganancias sean mayores es conveniente que el material del que está hecho el receptor tenga una alta absortividad.
- ⊕ Área del Colector. Dado que ésta área influye en el valor de la razón de concentración, es recomendable que sea la menor área posible para minimizar las pérdidas.

- ⊕ Emisividad. Si la emisividad en infrarrojo del material del receptor es baja podemos disminuir las pérdidas por radiación.

La emisividad para algunos metales se muestra en la tabla 3:

Tabla 3. Emisividad de algunos metales

Metales	T [°C]	ϵ
Aluminio	170	0.05
Acero	-70...700	0.06...0.25
Cobre	300..700	0.015...0.025
Cobre oxidado	130	0.73

- ⊕ Aumentar el Flujo Solar. Esto se consigue con la Razón de Concentración y es una de las principales razones por las cuales se utilizan los concentradores solares cuando la temperatura que se necesita alcanzar es elevada.

C. DETERMINACIÓN DEL FLUJO DE CALOR DEL SOL

1. EL MÉTODO DEL TRAZADO DE RAYOS

Este proceso se utiliza para analizar sistemas ópticos, y por lo tanto es una herramienta muy útil para examinar los concentradores solares. Se usa para comprender la distribución del flujo concentrado en el receptor y para diseñar las configuraciones receptor-absorbedor.

El proceso consiste en seguir la trayectoria de una gran cantidad de rayos que inciden en el sistema óptico (ya sea en una superficie reflejante o refractante) para determinar la distribución de los rayos sobre la superficie de interés.

Cuando este método se aplica a los concentradores solares, el trazado de rayos comienza con el análisis de los rayos incidentes sobre la apertura del colector y posteriormente se determina la distribución e intensidad de los rayos que llegan al receptor.

Se puede aplicar tanto a superficies reflejantes como a superficies refractantes. El principio del método es el mismo: analizar la trayectoria de los vectores unitarios que llegan a la superficie en cuestión. El análisis para rayos reflejados se basa en la ley de la reflexión, en la que se determina que cuando un rayo incide sobre una superficie se refleja y se refracta en un ángulo con la normal a la superficie igual al ángulo con el que incide en ella. Cuando la luz es transmitida la dirección del rayo obedece la ley de Snell para la refracción. Esta ley establece que el producto del índice de refracción por el seno del ángulo de incidencia es constante para cualquier rayo de luz incidiendo sobre la superficie que separa dos medios.

En el análisis a desarrollar, consideramos exclusivamente superficies reflejantes, ya que son las que se utilizan en los colectores que hemos discutido a lo largo de este documento.

El propósito de utilizar el trazado de rayos para el diseño del horno solar es que con el análisis a través de este método conozcamos el flujo incidente sobre el receptor del horno. Teniendo estos datos podremos determinar la temperatura que se puede alcanzar con el horno. Esto se hará como se ha discutido en la sección del balance de energía en el receptor.

a) Método

Para trazar las trayectorias de los rayos se usan vectores. Con la geometría de la superficie se puede conocer su normal y así utilizar el principio de que el ángulo del rayo reflejado (θ_{ref}) es igual al ángulo de incidencia (θ_{inc}) para determinar la dirección del rayo reflejado. Para ello se usan vectores unitarios para los rayos incidentes (R_{inc}) y los reflejados (R_{ref}), así como un vector unitario a lo largo de la normal que apunte desde el receptor (n). En la figura 22 se puede observar dichos vectores.

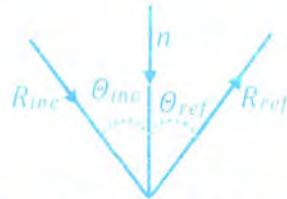


Figura 21 Vectores sobre la superficie reflejante

Considerando los vectores y la geometría mostrados, se plantea un eje de coordenadas (x, y, z) con origen en el punto de incidencia. De esta manera se divide el vector del rayo incidente en sus componentes i , j :

Ecuación 65. Rayo incidente

$$R_{inc} = \sin \theta_{inc} \mathbf{i} - \cos \theta_{inc} \mathbf{j}$$

Y lo mismo se hace con el vector del rayo reflejado:

Ecuación 66. Rayo reflejado

$$R_{ref} = \sin \theta_{ref} \mathbf{i} + \cos \theta_{ref} \mathbf{j}$$

Sin embargo se sabe que θ_{ref} es una incógnita. Para ello se utiliza la ley de la reflexión de la luz, que dicta que el ángulo de incidencia y el de reflexión de un rayo luminoso sobre una superficie son iguales. Es por ello que se puede hacer la sustitución siguiente:

Ecuación 67

$$R_{ref} = \sin \theta_{inc} \mathbf{i} + \cos \theta_{inc} \mathbf{j}$$

Ahora se sustituye el coseno por una suma que no afecta el resultado algebraico:

Ecuación 68

$$R_{ref} = \sin \theta_{inc} \mathbf{i} - \cos \theta_{inc} \mathbf{j} + 2 \cos \theta_{inc} \mathbf{j}$$

De esta manera se puede sustituir el vector del ángulo incidente en la ecuación:

Ecuación 69

$$R_{ref} = R_{inc} + 2 \cos \theta_{inc} \mathbf{j}$$

Dado que consideramos el punto de incidencia como el origen del sistema de coordenadas, podemos considerar que el vector unitario \mathbf{n} equivale al vector unitario \mathbf{j} , por lo que:

Ecuación 70

$$R_{ref} = R_{inc} + 2 \cos \theta_{inc} \mathbf{n}$$

Para el siguiente paso, se considera la definición del ángulo entre vectores:

Ecuación 71

$$\cos \theta_{inc} = \frac{\mathbf{n} \cdot R_{inc}}{|\mathbf{n}| |R_{inc}|}$$

Donde θ_{inc} debe hallarse en el rango $0 \leq \theta_{inc} \leq \pi$. Dado que se trata de vectores unitarios sucede que:

Ecuación 72

$$|\mathbf{n}| |R_{inc}| \cos \theta_{inc} = \mathbf{n} \cdot R_{inc}$$

Ecuación 73

$$\cos \theta_{inc} = \mathbf{n} \cdot R_{inc}$$

De esta manera se llega a la conclusión de que el vector del rayo reflejado puede ser definido por la normal al punto de incidencia y la dirección del rayo incidente.

Ecuación 74

$$R_{ref} = R_{inc} - 2(\mathbf{n} \cdot R_{inc})\mathbf{n}$$

Así, se puede conocer la dirección del rayo reflejado. Sin embargo para ello se necesita especificar el punto de incidencia sobre el cual se va a analizar el rayo reflejado. También es necesario conocer la ecuación que define la superficie de un paraboloide ideal con una distancia al foco F , sobre el sistema de coordenadas x, y, z para conocer la normal al punto en el que se desea hacer el análisis:

Ecuación 75

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4F}$$

Una vez que se tiene la ecuación, se transforma para poder obtener el gradiente de esta superficie:

Ecuación 76

$$f(x, y, z) = 4Fz - x^2 - y^2$$

Ecuación 77

$$\nabla f = \frac{df}{dx} \mathbf{i} + \frac{df}{dy} \mathbf{j} + \frac{df}{dz} \mathbf{k}$$

Sustituyendo las derivadas en la ecuación, se tiene la ecuación que define la dirección del vector:

Ecuación 78

$$\nabla f = -2x\mathbf{i} - 2y\mathbf{j} + 4\mathbf{k}$$

Para encontrar el vector unitario de la normal a la superficie se hace lo siguiente:

Ecuación 79

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla f}{|\nabla f|}$$

Que en este caso es:

Ecuación 80

$$\mathbf{n} = \frac{-2x\mathbf{i} - 2y\mathbf{j} + 4\mathbf{k}}{\sqrt{4x^2 + 4y^2 + 4^2}}$$

Una vez teniendo estas guías completas, se puede conocer la dirección del ángulo reflejado. Por ejemplo, si se tiene el punto $(1, 0, \frac{1}{2})$ se sustituye en la ecuación del vector unitario de la recta normal:

Ecuación 81

$$\mathbf{n} = \frac{-2\mathbf{i} + 4\mathbf{k}}{\sqrt{4 + 16}} = \frac{-2}{\sqrt{20}}\mathbf{i} + \frac{4}{\sqrt{20}}\mathbf{k}$$

Si se supone un rayo de incidencia totalmente vertical:

Ecuación 82

$$R_{ref} = R_{inc} - 2(n \cdot R_{inc})n = (-\mathbf{k}) - 2[n \cdot (-\mathbf{k})]n$$

Ecuación 83

$$R_{ref} = (-\mathbf{k}) - 2 \left[\left(\frac{-2}{\sqrt{20}}\mathbf{i} + \frac{4}{\sqrt{20}}\mathbf{k} \right) \cdot (-\mathbf{k}) \right] \left(\frac{-2}{\sqrt{20}}\mathbf{i} + \frac{4}{\sqrt{20}}\mathbf{k} \right)$$

Ecuación 84

$$R_{ref} = (-\mathbf{k}) - \left[\frac{-8}{\sqrt{20}} \right] \left(\frac{-2}{\sqrt{20}}\mathbf{i} + \frac{4}{\sqrt{20}}\mathbf{k} \right)$$

Ecuación 85

$$R_{ref} = (-k) - \left(\frac{16}{20}i - \frac{32}{20}k \right)$$

Ecuación 86

$$R_{ref} = -\frac{16}{20}i + \frac{12}{20}k$$

Así, se tiene ahora la dirección del rayo reflejado para sobre el punto $(1,0, \frac{1}{4})$.

Ahora bien, para hacer un análisis completo, se debe analizar todos los puntos de la superficie diseñada, y verificar si se obtiene una concentración aceptable para los objetivos planteados.

b) Importancia del Sistema de seguimiento

El flujo concentrado se dibuja trazando un conjunto de rayos especularmente reflejados de la superficie del reflector. Si el colector tiene un sistema de seguimiento del sol, podrá mantener su eje de simetría paralelo a los rayos solares. De esta manera, el flujo reflejado incidirá en el receptor. Si el sistema de seguimiento del sol no está ajustado correctamente o no existe, los rayos del sol arribarán al colector formando un ángulo con el eje de simetría del concentrador. Esto se puede apreciar en la figura 23:

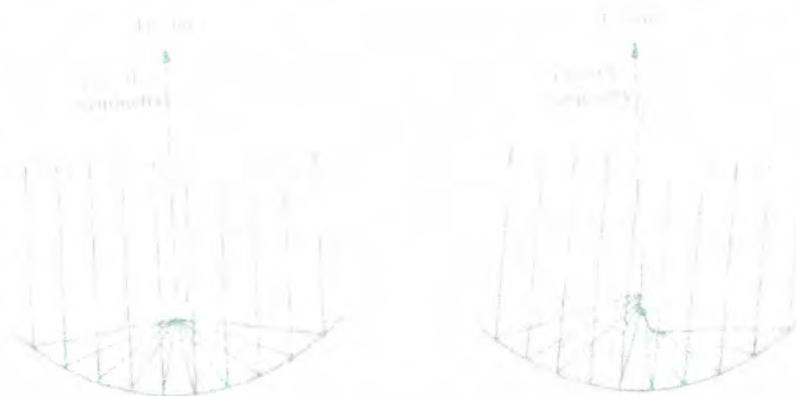


Figura 22 Error en el seguimiento del sol

Es por ello que contar con un sistema de seguimiento del sol es de vital importancia para este tipo de colectores, ya que el error introducido tiene un fuerte impacto sobre el flujo incidente en el receptor.

IV. SISTEMA PROPUESTO

Dada la información obtenida mediante la investigación de los diferentes tipos de concentradores solares desarrollados y los resultados obtenidos con ellos en las investigaciones, se ha determinado que el concentrador solar que consiste en un paraboloide de revolución es la alternativa más viable que puede cumplir con los requerimientos del horno solar de fundición de la manera más eficiente.

Tomamos la decisión de enfocarnos principalmente al análisis de ésta opción debido a que, como resultado de la investigación, hemos encontrado que las mayores relaciones de concentración se obtienen con este tipo de concentrador solar lo que es básico para el propósito de alcanzar una temperatura igual o mayor a los 500°C en la superficie del receptor.

La característica principal de los concentradores de paraboloide de revolución es que la energía solar se concentra mediante espejos sobre un mismo punto focal lo que reduce el área en donde ocurren las pérdidas de calor, todo esto sin requerir de un área de recolección tan amplia como con el uso de helióstatos; por otra parte habiendo tomado la decisión de dirigir nuestra investigación a sistemas colectores tridimensionales debemos tomar en cuenta que cualquiera de ellos debe contar con un sistema de seguimiento del sol, pues es muy importante que la incidencia de la radiación solar este dirigida a la superficie absorbadora de manera precisa.

Con el propósito de asegurar que la temperatura obtenida sea igual o mayor a los 500°C esperados es de suma importancia realizar el análisis de trazado de rayos para conocer mediante éste la zona de mayor incidencia de rayos y el efecto que una variación en el ángulo entre el colector y los rayos solares podría tener con respecto a la temperatura alcanzada. Dicho análisis se realiza con el programa SolTRACE, cuyo funcionamiento se explicará con mayor detenimiento en el apartado de pruebas y resultados.

El sistema que se propone, en base a las características de los colectores, es un paraboloide de revolución con foco en el centro. Esto es porque, como se ha explicado anteriormente, estos sistemas pueden alcanzar mayores razones de concentración. Para determinar las características particulares del sistema, se toma en cuenta la portabilidad que se tiene como objetivo. De acuerdo a las simulaciones que se muestran en el apartado de pruebas, las dimensiones para obtener la temperatura deseada en el receptor oscilan entre 1.5 y 2 metros de diámetro. Para dar mayor oportunidad de que el sistema sea portátil, se determinó que entre las opciones existentes, es más útil optar por el colector de 1.5m de diámetro. Dadas las características de un paraboloide, este

diámetro es consistente con un foco ubicado sobre el eje de revolución y a 2.66m del origen. La profundidad de dicho paraboloides es de 0.22m

El sistema propuesto se ilustra en la imagen siguiente, donde se observan los puntos donde inciden los rayos solares sobre la superficie y sobre el receptor.

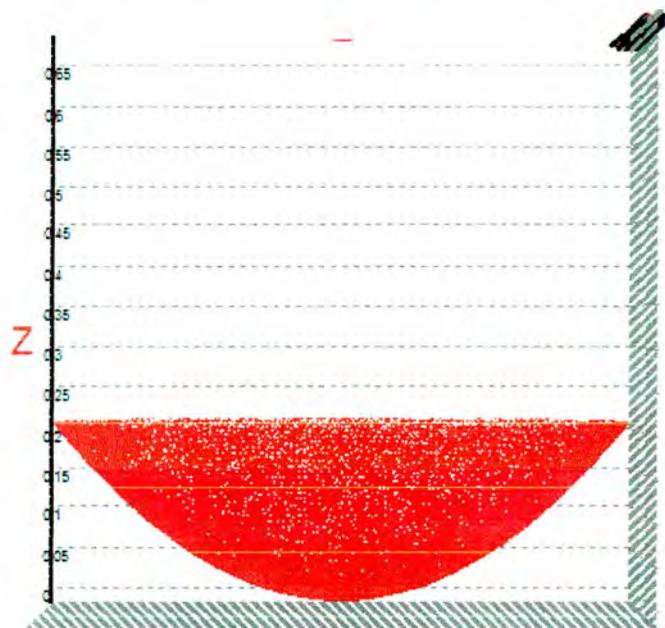


Figura 23. Paraboloide propuesto (1.5m diámetro)

Con este sistema propuesto, se alcanza un flujo solar incidente en el receptor de $6.758 \times 10^2 \text{ kW/m}^2$.

V. PRUEBAS Y RESULTADOS

A. SIMULACIONES. UTILIZACIÓN DEL SOFTWARE SOLTRACE PARA LA SIMULACIÓN DE SISTEMA DE PRUEBA Y SISTEMA PROPUESTO

El software que se utilizó para las simulaciones que se presentarán más adelante es el software Soltrace de NREL (National Renewable Energy Laboratory). SolTRACE es un paquete de software utilizado para modelar los sistemas de potencia óptica solar y analizar su rendimiento. Originalmente se desarrolló para aplicaciones solares ópticas, aunque el código también puede ser usado para modelar y caracterizar los sistemas ópticos en general. El software se desarrolló a partir de la necesidad de un modelo de sistemas ópticos más complejo de lo que se podía modelar con las herramientas existentes.

El código utiliza la metodología de trazado de rayos como la que ya se explicó anteriormente. El usuario selecciona un número determinado de rayos a ser trazados. Cada rayo se traza en el sistema encontrando varias interacciones ópticas. Algunas de estas interacciones son de naturaleza probabilística (por ejemplo, selección del ángulo del sol a partir de la distribución angular de intensidad solar), mientras que otros son determinísticos (por ejemplo, el cálculo de la intersección de rayos con una superficie analíticamente descrita y la reorientación resultante).

La ventaja que tiene éste software sobre otros utilizados para el mismo propósito, es que reproduce las interacciones reales de los fotones y por tanto puede ofrecer resultados precisos de los sistemas complejos que no podrían ser modelados de otra forma. La principal desventaja mayor tiempo en el procesamiento. Éste software aumenta la precisión con el número de rayos trazados y un mayor número de rayos significa más tiempo de procesamiento. Además, geometrías complejas se traducen en tiempos más largos. Tenemos que considerar también que el número requerido de rayos es también una función de los resultados deseados. Es decir, menos los rayos (y por tanto menos tiempo) son necesarios para determinar cambios relativos en la eficiencia óptica de diferentes ángulos del sol en un concentrador dado que son necesarios para evaluar con precisión la distribución de flujo en el receptor. Es por esto que dependiendo de las necesidades del usuario se pueden modificar los parámetros de entrada cuando se utiliza el software.

En SolTRACE, un sistema óptico se organiza en "etapas" dentro de un sistema de coordenadas globales. Una etapa se define como una sección de la geometría óptica en la que una vez que un rayo sale de la etapa, no vuelve a entrar por resto de su trayectoria por el sistema. Un sistema geométrico completo puede constar de una o más etapas. El usuario es el que debe definir la geometría correspondiente en cada etapa. La motivación detrás de la utilización de el concepto de etapas es emplear un rastreo eficiente y por lo tanto ahorrar tiempo de procesamiento. Cada etapa se compone de "elementos". Cada elemento consta de una superficie, un tipo de interacción óptica, una forma de apertura y si corresponde, un conjunto de propiedades ópticas. Una de las mayores ventajas del concepto de las etapas reside en que también pueden ser guardadas y empleadas otros sistemas sin necesidad de volver a calcular las posiciones y orientaciones de los elementos.

La ubicación y orientación de las etapas se definen en el sistema de coordenadas globales mientras que la ubicación y orientación de los elementos se especifican dentro de la etapa donde se encuentran definidos. Las etapas pueden ser de dos tipos: ópticas o virtuales. Una etapa óptica se define como aquella que interactúa físicamente con los rayos. Por el contrario, una etapa virtual se define como aquella que no interactúa físicamente con los rayos. El escenario virtual es útil para determinar la ubicación y dirección de los rayos diversas posiciones a lo largo del camino óptico, sin afectar físicamente la trayectoria de rayos. Los elementos que se encuentran definidos en un escenario virtual, no tienen propiedades ópticas, ya que no interactúan con los rayos. Las etapas ópticas consisten en elementos que interactúan con los rayos y que podrían alterar sus trayectorias. Estos elementos tienen propiedades ópticas y tipos de interacción asociadas a ellos. Más allá de esto, las etapas ópticas y virtuales son idénticas en la forma en que se definen y utilizan. Las etapas pueden ser duplicadas y reubicadas como grupos de elementos y luego pueden ser guardadas para utilizarse en otro sistema óptico.

SolTRACE utiliza tres sistemas coordenados: el sistema de coordenadas globales, sistema de coordenadas de la etapa y sistema de coordenadas del elemento. Cada elemento en una etapa tiene un sistema de coordenadas local (es decir, la ubicación y orientación) se define en relación con la etapa de sistema de coordenadas. Cada etapa tiene un sistema de coordenadas definido en relación con el sistema de coordenadas globales. La dirección del sol se define en relación con el sistema de coordenadas globales y se define ya sea como un vector o por fecha y hora con latitud especificada. Los rayos de luz se generan a partir del sol y luego se trazan secuencialmente a través de cada etapa de la geometría. La posición y la dirección de cada rayo en cada etapa se almacenan en la memoria para su posterior procesamiento y salida.

En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de un sistema multi-etapa, multi-elemento. En ella se puede notar el sistema de coordenadas global (negro), de etapa (rojo) y de elemento (azul). En este ejemplo, hay un total de tres etapas. La primera etapa consta de un elemento de reflexión de plano rectangular (el heliostatos). En este caso, el sistema de coordenadas del elemento se encuentra directamente en la parte superior del sistema de coordenadas de la etapa. La segunda fase es el concentrador principal cuyo sistema de coordenadas se muestra en la parte superior derecha del sistema de coordenadas de la etapa. La tercera y última etapa es la etapa de la muestra (un objetivo plano rectangular). Una vez más, el sistema de coordenadas del elemento ocupa la misma ubicación y orientación del sistema de coordenadas de la etapa.

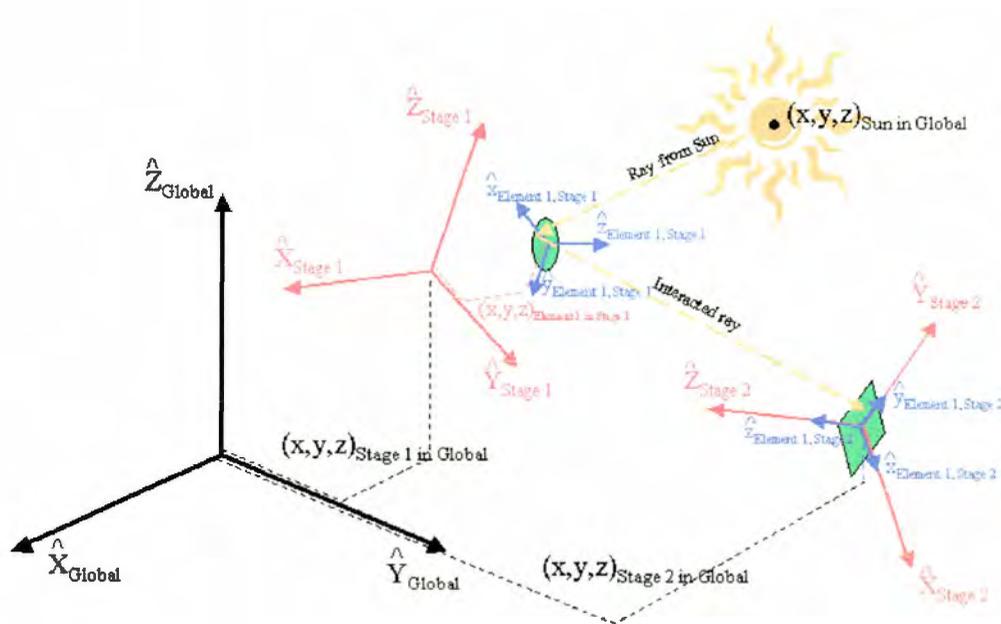


Figura 24. Sistema de coordenadas

1. DEFINICIÓN DEL SOL

Existen dos características que definen al sol como fuente de luz: la distribución de intensidad angular de la luz a través del disco solar y la posición del mismo. En el software hay tres opciones disponibles. En las dos primeras se utilizan distribuciones de probabilidad. Aunque el disco solar varía ampliamente con la localización terrestre, las condiciones del cielo y el tiempo estas aproximaciones son adecuadas para una amplia

clase de problemas. Una vez que se definió el sol en su totalidad, el perfil puede ser almacenado en un archivo para su uso futuro. Una vez que el disco solar ha sido definido, todo lo que queda es determinar la dirección. Una opción es definir un punto en el sistema de coordenadas globales de tal manera que un vector desde este punto hasta el origen del sistema de coordenadas global define la dirección. La otra opción es definir un sitio en particular de latitud y el tiempo (día del año y la hora local.) A partir de esta información, se determina la dirección suponiendo que el eje z del sistema de puntos de coordenadas globales hacia el norte y que apunta hacia cenit.

2. DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA ÓPTICA

Al momento de definir la geometría óptica que tendrá el elemento que se utilizará en el sistema, primero se muestra una ventana donde se tienen dos opciones. La primera opción es un botón titulado "Entrada de Sistema de Geometría desde Archivo" el cual permite utilizar un archivo guardado previamente. El segundo botón "Definir sistema de geometría" asume que el usuario desea definir la geometría óptica desde cero. El formulario se utiliza para diseñar todos los aspectos del problema de óptica a ser analizado. Se selecciona el número de etapas y se define cada una de ellas ya sea como virtual u óptica. A continuación la siguiente serie de botones es un área que contiene un libro de hojas de cálculo. Las hojas se nombre automáticamente según el número y el tipo de escenario. En esta parte también se definen los sistemas coordenados, tanto los globales como los locales, dependiendo de lo que se necesite en cada sistema así como la rotación que tiene cada elemento con respecto al eje z (en grados). También se debe definir la apertura de cada elemento, la cual se describe como la forma prevista de la apertura de elemento en un plano perpendicular al elemento de eje z. Además se define la geometría superficial de cada uno. El software tiene superficies paraboloïdales, esféricas, elipsoidales, planas y cónicas entre otras, donde en cada una se deben introducir los parámetros suficientes para ser trazadas.

Dependiendo del tipo de elemento óptico, se utilizan diferentes tipos de propiedades, pero la estructura del archivo de propiedades ópticas es la misma para todos los elementos y contiene entradas para todas las propiedades, ya sean de refracción, reflexión o de otras. Además, hay una parte trasera y una parte delantera a cada elemento. La parte frontal está en la dirección z positiva, mientras que la parte de atrás está en la dirección z negativa. Para la óptica de refracción, sólo la transmisividad y el índice de refracción son pertinentes.

3. TRAZADO DE RAYOS

Una vez que el sol y la geometría han sido definidos, se puede continuar con el trazado de los rayos. Para ello existen diferentes parámetros que necesitan ser definidos como se explica a continuación.

La primera casilla es el número de rayos a ser trazados. El software genera de forma aleatoria los rayos en un plano normal al vector que une el sol con el origen de la etapa. Los rayos son generados dentro de un círculo lo suficientemente grande para abarcar sólo las imágenes proyectadas de todos los elementos en la etapa, visto desde el sol. El software hace un recuento del total de rayos generados, tanto los que caen en el elemento como los que no, divide este número entre el área del círculo y lo multiplica por la insolación normal directa que está dada por el usuario. Este resultado está en unidades de potencia/rayo y su valor se utiliza para calcular eficiencias e intensidades de flujo. Para empezar el trazado de rayos, se tiene el botón de 'TRACE' y una vez trazados se continua el proceso con el botón 'Done'. Una vez que el trazado se ha terminado puede hacerse un dibujo del trazado o guardar el archivo.

4. GRÁFICA DEL TRAZADO

Existen tres tipos de gráficos diferentes disponibles en SolTRACE. El gráfico de intersección de rayos (o gráfico de dispersión), el e tres dimensiones de distribución gráfica de flujo de superficie y la distribución de flujo 2-D ó gráfico de contorno. En la parte superior derecha de la ventana, el usuario tiene dos cuadros, uno titulado "etapas" y el otro titulado 'Elementos'. En el cuadro de etapa existe una lista de las etapas dentro del sistema. Inicialmente, la 'caja de elementos' está vacía. Debajo de cada entrada de la etapa es la lista de elementos dentro de esa etapa con casillas de verificación junto a ellos. El tipo de superficie para cada elemento también está indicado. Una vez que los elementos de interés se han seleccionado, el usuario puede ahora elegir cómo mostrar las intersecciones de rayos. Directamente debajo de la lista de la etapa es una caja para seleccionar el sistema de coordenadas que se utilizarán para la parcela. Si los elementos de múltiples etapas han sido seleccionados, entonces claramente el sistema de coordenadas globales sería la opción lógica. Sin embargo, si se selecciona un conjunto de elementos dentro de una etapa, el usuario puede desear para trazar las intersecciones de rayos en el sistema de coordenadas para cada etapa

Una vez que se define el tipo de gráfico, se crea haciendo clic en el ' XYZ Plot of Intersection Points'. El trazado de tiempo para el gráfico puede ser muy largo, especialmente si muchos rayos han sido localizados. En la parte inferior, hay una casilla de verificación que, en caso de control, mantiene los límites de los ejes. Los otros dos tipos

de gráficos son seleccionados en la parte inferior del formulario. Tanto la superficie del gráfico y el gráfico de contorno están diseñados para la distribución de flujo y requieren que los datos sean de un elemento ya sea con una superficie plana o cilíndrica en el sistema de coordenadas del elemento. El programa no permite que se grafique una superficie o un gráfico de contorno si más de un elemento es seleccionado, un sistema de coordenadas que no sea el elemento de sistema de coordenadas seleccionado o el elemento de superficie no es plana o cilíndrica. Debajo de los botones de trazado, se muestra algunos datos estadísticos sobre la distribución de flujo. Flujo pico, el flujo promedio y el radio efectivo de la distribución del flujo se muestran tanto en las unidades elegidas por el usuario y también en soles.

B. SIMULACIONES DE LA ANTENA DE PRUEBA

Las siguientes simulaciones se hicieron con base en las medidas reales de la antena utilizada para hacer las pruebas. Estos parámetros son: Eje mayor de la antena, posición (x, y, z) del foco con respecto al vértice de la antena, apertura del colector y apertura (diámetro) del receptor. Las medidas se muestran en la tabla a continuación y fueron introducidas como parámetros para modelar en el software SoTRACE, como ya anteriormente se explicó.

Eje mayor [m]	0.82
Ubicación del Vértice (x, y, z)	(0,0,0)
Apertura del Recibidor (diám.) [m]	0.02545
Ubicación del Recibidor (x, y, z) [m]	(0,-0.325,0.551)

Como ya se mencionó anteriormente, se necesita introducir el diámetro de la antena, para lo cual utilizamos la medida del eje mayor (0.82m). La imagen siguiente muestra la antena obtenida con los datos anteriores, donde podemos observar la ubicación del foco como está realmente ubicado.

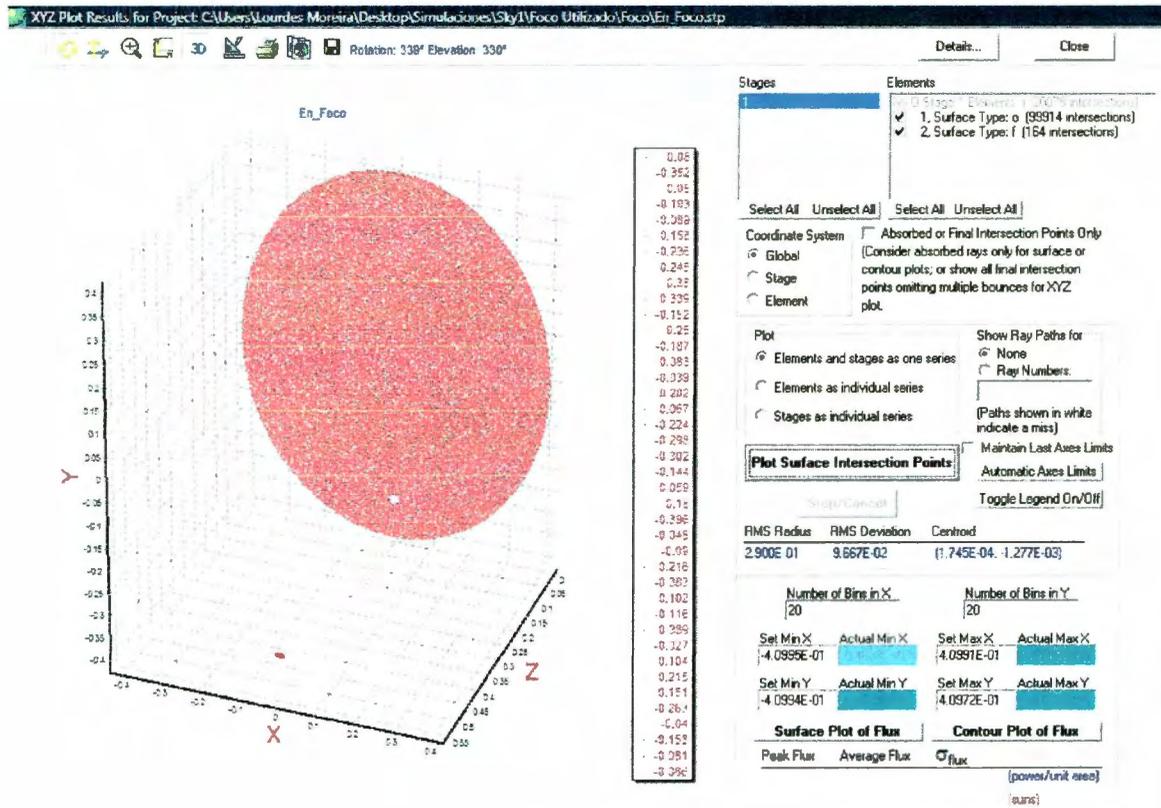


Figura 25. Simulación de la antena

Con esta antena obtuvimos diferentes valores de concentración promedio (en Soles), que varían dependiendo de la distancia que hay entre el punto donde se simula y el foco. La mayor concentración está (como es de esperarse) en el punto exacto donde se encuentra el foco, con lo cual se obtiene una diferente concentración promedio y distribución de los rayos solares en cada punto del receptor. Dichas concentraciones promedio y su distribución se muestran en el Anexo 1 y fueron obtenidas con el software, donde se hicieron simulaciones con 3cm de diferencia entre cada una. A continuación se muestran solamente los resultados obtenidos en el foco de la antena

En el foco:

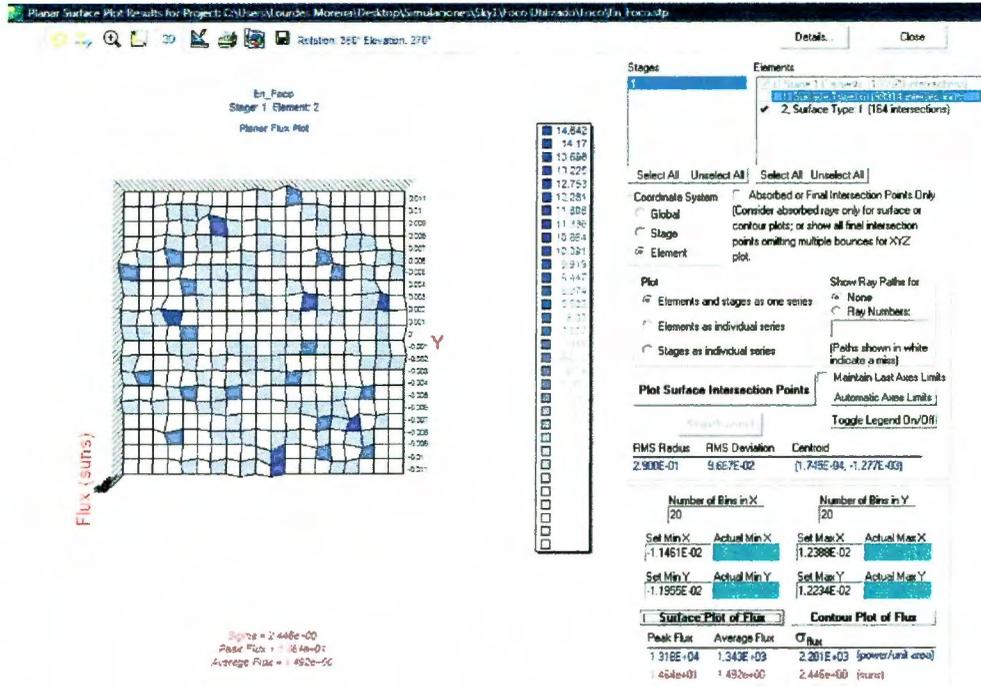


Figura 26. Flujo en el receptor colocado en el foco

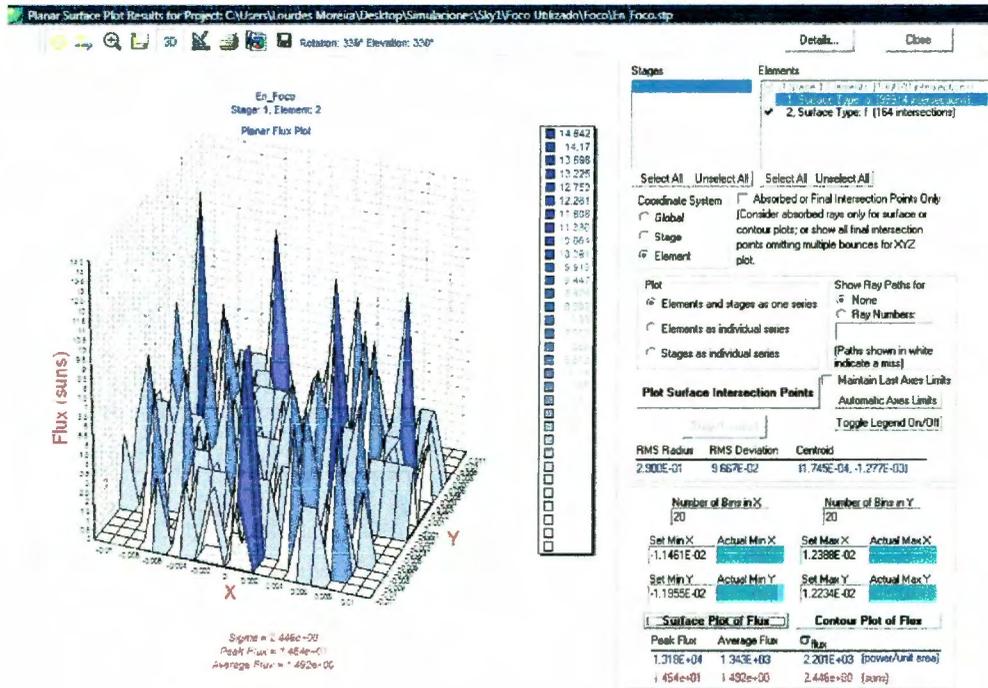


Figura 27. Flujo en el receptor en el foco

En la siguiente imagen se muestra el flujo solar promedio (1.319 Soles) y la distribución de los rayos que inciden en el receptor, si éste estuviera en el centro de la antena ($x=0,y=0,z=0.551$), como lo estaría en un paraboloide de revolución y donde podemos observar que la concentración toma un valor menor y se distribuye de manera menos uniforme que en los casos anteriores, confirmando así que el foco se encuentra efectivamente en la ubicación ($x=0, y=-0.325, z=0.551$).

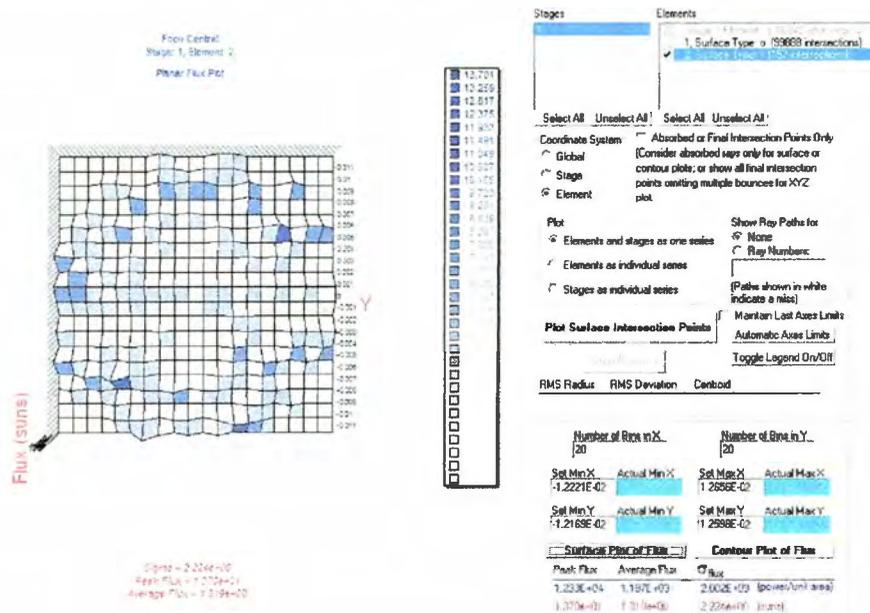


Figura 28. Flujo en el receptor en el centro

C. SIMULACIONES DE LA ANTENA PRPOPUESTA.

Como ya mencionamos anteriormente, se decidió que para el sistema propuesto la geometría sería la de un paraboloide de revolución, por lo que las siguientes simulaciones nos ayudan a definir exactamente el tamaño (diámetro) que esta tendrá y el flujo que la misma genera en el receptor. En las imágenes siguientes se observa el flujo que existe en el foco de la antena, primero con una antena de 1.5m de diámetro y después con una antena de 2m de diámetro. Para calcular la distancia al foco de cada uno de ellos se utilizó la siguiente fórmula:

Ecuación 87. Distancia al foco

$$d = \frac{1}{2c}$$

Donde d es la distancia del vértice del paraboloide a la ubicación del foco y c es el parámetro de apertura del mismo (radio). Para cada parábola simulada, la distancia al foco queda como sigue:

Ecuación 88. Distancia al foco

$$d_{1.5m} = \frac{1}{2(0.75)} = 0.666 \text{ m}$$

$$d_{2m} = \frac{1}{2(1)} = 0.5 \text{ m}$$

Con estos datos podemos determinar los parámetros necesarios para definir la geometría que será introducida al software, para poder hacer las simulaciones correctamente. Las siguientes imágenes nos muestran como queda la geometría de cada una de estos paraboloides en la simulación:

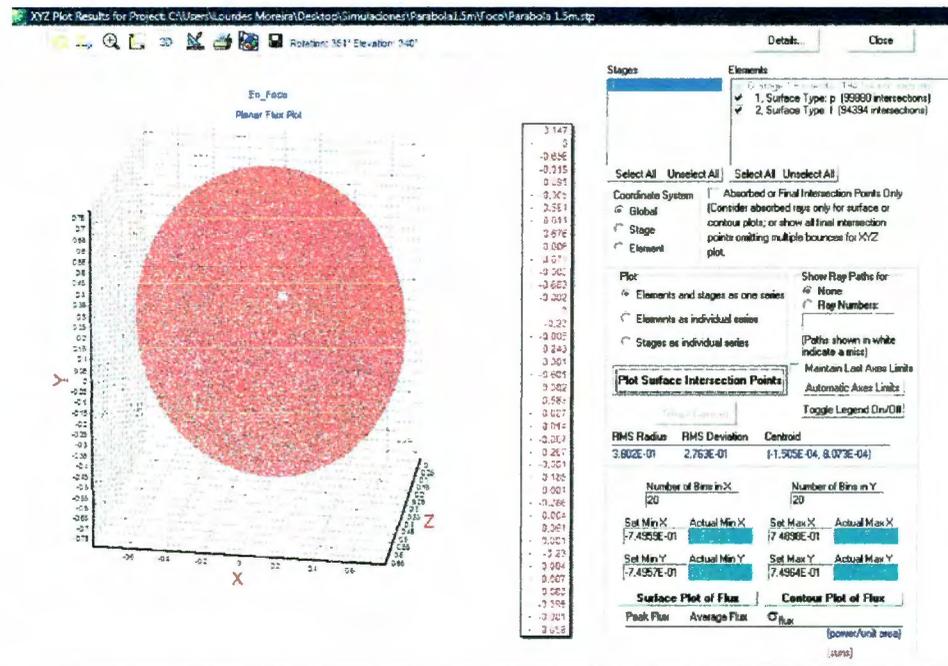


Figura 29. Paraboloide de 1.5 m de diámetro

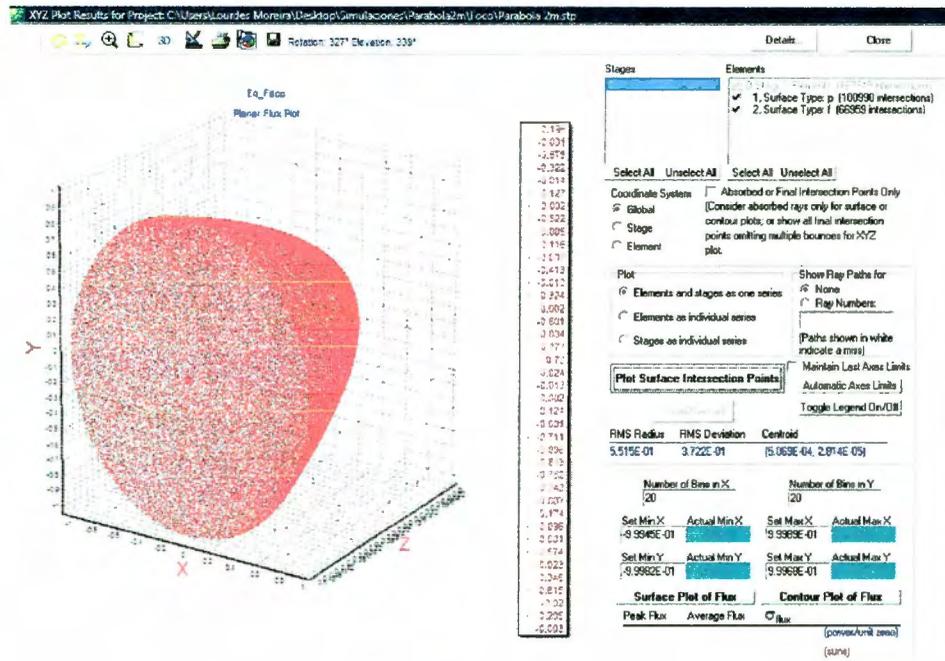
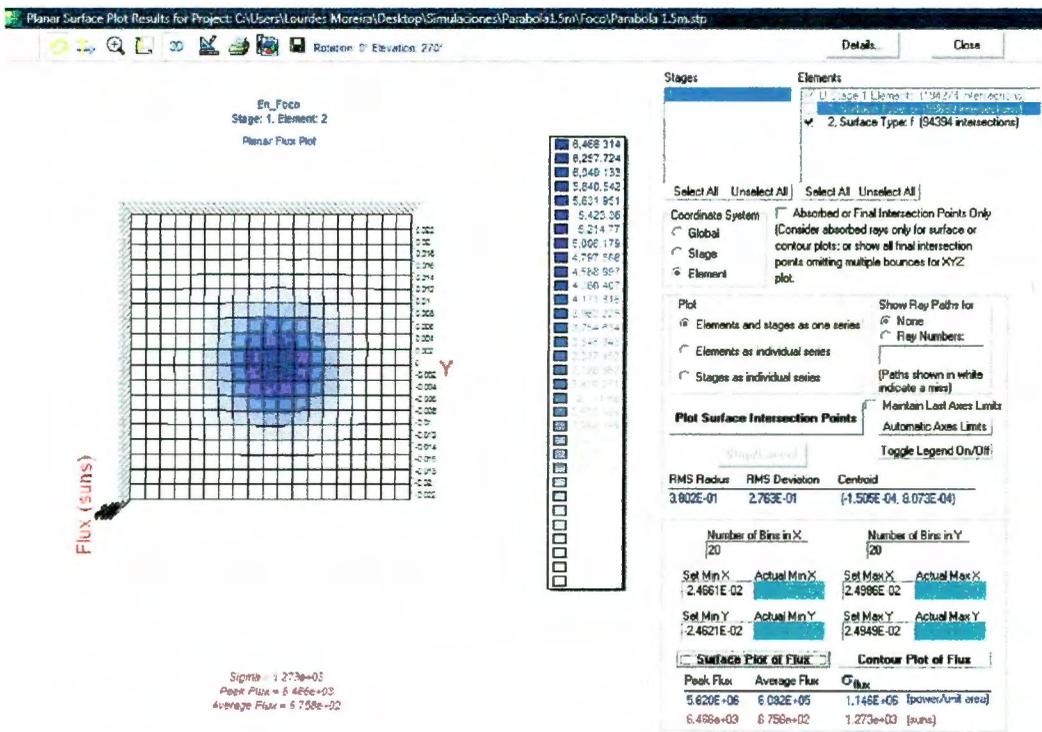
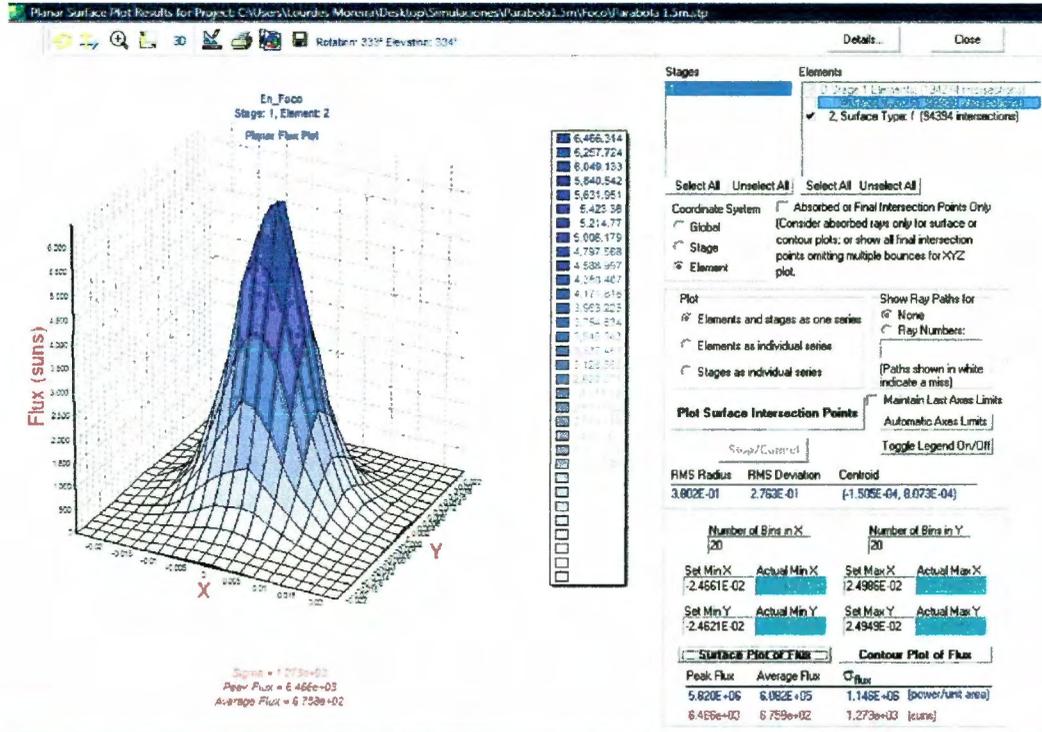


Figura 30. Paraboloide de 2m de diámetro

En el Anexo 2 se pueden encontrar las imágenes del análisis similar al que se hizo con la antena de prueba, donde se hicieron simulaciones variando la ubicación del foco cada 3cm, tanto en dirección al vértice como en dirección contraria. Las imágenes siguientes muestran el flujo que se obtiene en el absorbedor de cada una de las antenas simuladas cuando éste se encuentra exactamente en el foco de la antena (a 0.666m en la de 1.5m de diámetro y a 0.5m en la de 2m de diámetro)

Flujo en el receptor de la antena de 1.5m de diámetro:



De estas simulaciones podemos obtener el valor promedio del flujo en el receptor es de 6.758×10^2 Soles.

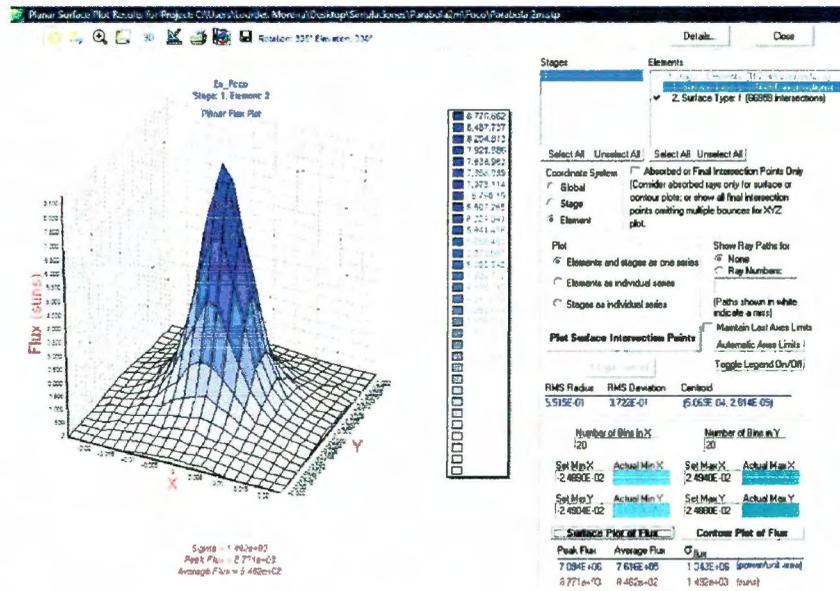


Figura 31. Flujo en el receptor de la antena de 2m de diámetro

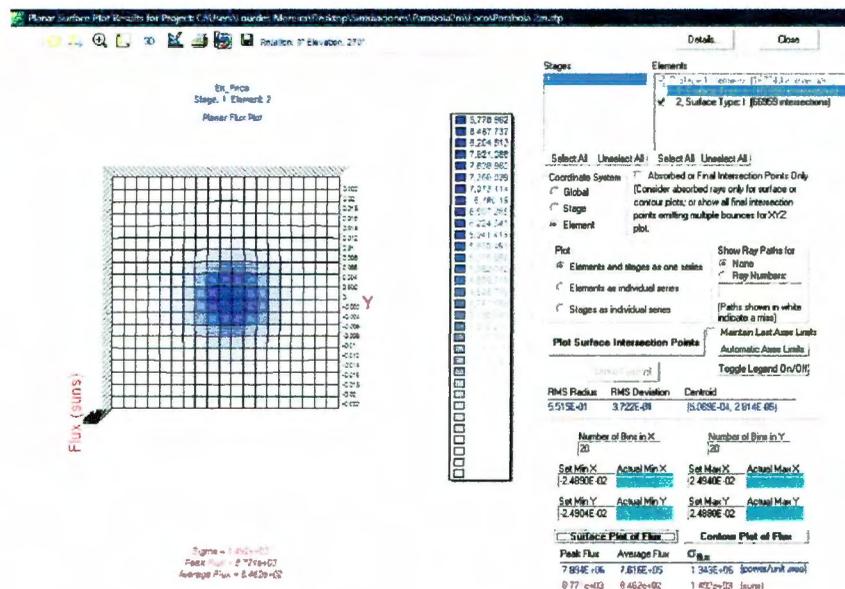


Figura 32. Flujo en el receptor de 2m de diámetro

De donde obtenemos un valor de flujo promedio en el receptor de 8.462×10^2 Soles.

D. ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL RECEPTOR

Con el propósito de realizar el balance de energía del sistema es necesario llevar a cabo las mediciones experimentales del flujo de calor en el receptor. El receptor capta la energía que viene del colector por medio de la superficie de calentamiento exterior, para posteriormente transferir la energía en forma de calor al material a fundir. De acuerdo a esto, se puede realizar el balance de energía en el receptor para el proceso de calentamiento.

Como receptor se cuenta con un crisol de aluminio como se muestra en la figura 37, tiene un diámetro de 50 mm y una altura de 80mm. El crisol se pintó con pintura negro mate de alta temperatura de la marca COMEX, la cual de acuerdo a pruebas ópticas tiene un valor promedio de absorptancia de 0.89. La pintura empleada se eligió de acuerdo a las especificaciones del fabricante, pues puede ser utilizada en aplicaciones con temperaturas cercanas a los 650 °C.

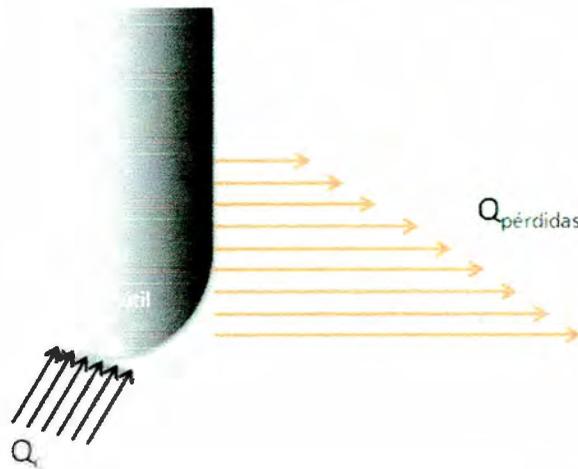


Figura 33. Flujos de calor en el receptor

E. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

1. CÁLCULO DE PÉRDIDAS INSTANTÁNEAS DE CALOR EN EL RECEPTOR

Dentro del sistema las pérdidas instantáneas de calor en el receptor se dan tanto por convección como por radiación, por lo tanto:

Ecuación 89. Pérdidas instantáneas de calor

$$Q_{pérdidas} = Q_{convección} + Q_{radiación}$$

Donde:

Ecuación 90.

$$Q_{conv} = hA(T - T_a)$$
$$Q_{rad} = \sigma \varepsilon A(T^4 - T_{sky}^4)$$

h = coeficiente de transferencia de calor por convección

A = superficie de calentamiento en el receptor

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4$ (constante Stefan-Boltzmann)

ε = emisividad de la superficie del receptor (pintura de alta temperatura)

T = temperatura en la superficie del receptor

T_a = temperatura ambiente

De manera que el total de pérdidas de calor en el receptor se puede expresar como:

Ecuación 91. Pérdidas en el receptor

$$Q_{pérdidas} = \int_0^t (Q_{conv} + Q_{rad}) dt = \int_0^t [hA(T - T_a) + \sigma \varepsilon A(T^4 - T_{sky}^4)] dt$$

A partir de lo anterior y mediante los valores que se obtengan experimentalmente se determinará de manera aproximada el acumulado del calor perdido en el receptor durante el proceso de calentamiento del sistema. Esto se obtiene mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 92. Pérdidas Totales de Calor

$$Q_{pérdidas} \cong \sum (hA(T_i - T_a) + \sigma \varepsilon A(T_i^4 - T_{sky}^4)) \Delta t_i$$

2. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN (NATURAL)

Para realizar esta aproximación se considera que la transferencia de calor por convección es natural, por lo que se hace el cálculo de coeficientes de transferencia de calor por convección tomando en cuenta lo siguiente:

El receptor se considera un cilindro pues es la geometría que más se semeja y de acuerdo a lo anterior se obtiene el número de Grashoff de la siguiente manera:¹

Ecuación 93. Grashoff²

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_a)L_c^3}{\nu^2}$$

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2} \quad \beta = \frac{1}{T(^{\circ}K)} \quad L_c = D$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ Viscosidad cinemática} \quad \rho_{\text{aireseco}} = \frac{P}{R \cdot T}$$

Ecuación 94

$$P = 75 Pa$$
$$R = 0.287 \frac{J}{Kg^{\circ}K}$$

Ecuación 95. Condición para consideración de plano

$$D \geq \frac{35L}{Gr_L^{1/4}}$$

¹ Çengel, A.Y. (3ª Ed.) (2006). Thermal Radiation. En Heat transfer: a practical approach (pp. 504-514). New York; Mexico: McGraw-Hill.

² El número de Grashof Gr es el parámetro adimensional que representa los efectos de la convección natural, y se obtiene al dividir todas las variables tanto dependientes como independientes entre cantidades constates adecuadas: las longitudes entre una longitud característica Lc, las velocidades entre una referencia arbitraria de velocidad (que por definición es el numero de Reynolds, tomado como V=Re v/Lc), y la temperatura entre la diferencia de temperatura (Ts-Tinfinito).

Para $D = 0.05\text{m}$

Tabla 4. Número de Grashof

Temperatura receptor	Gr	$D \geq \frac{35L}{Gr_L^{1/4}}$
40	2.37E+06	4.46E-02
60	4.10E+06	3.89E-02
80	5.34E+06	3.64E-02
100	6.21E+06	3.51E-02
120	6.80E+06	3.43E-02
140	7.18E+06	3.38E-02
160	7.40E+06	3.36E-02
180	7.50E+06	3.34E-02
200	7.50E+06	3.34E-02

Una vez obtenido el número de Grashoff para valores de temperatura del rango que se obtiene en el sistema tenemos que para la condición expuesta en la ecuación 98 se puede considerar el comportamiento del cilindro como el de placa plana y por lo tanto el coeficiente de transferencia de calor por convección para cada intervalo de tiempo se obtiene de la siguiente manera:

Ecuación 96. Raleigh

$$Ra_i = \frac{g\beta(T_i - T_a)L^3 \text{Pr}}{\nu_i^2}$$

Pr = número de Prandtl

Por lo tanto, para $10^4 \leq Ra \leq 10^9$

Ecuación 97. Nusselt

$$Nu = 0.59Ra_i^{0.25}$$

Ecuación 98. Coeficiente h

$$h_i = \frac{k_i \cdot Nu}{L}$$

k = conductividad térmica

L = altura del cilindro

F. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTO

A continuación se presenta la metodología seguida en la experimentación. Para realizar las pruebas experimentales se cuenta con una antena parabólica de offset, esta antena requirió de una preparación previa que también se incluye dentro de la metodología

Pruebas de calentamiento del sistema colector-receptor

1. Se lija la antena para remover la pintura de la superficie.



Figura 34. Antena lijada

2. Se limpia la superficie de la antena y se procede a aplicar el papel espejo adherible.

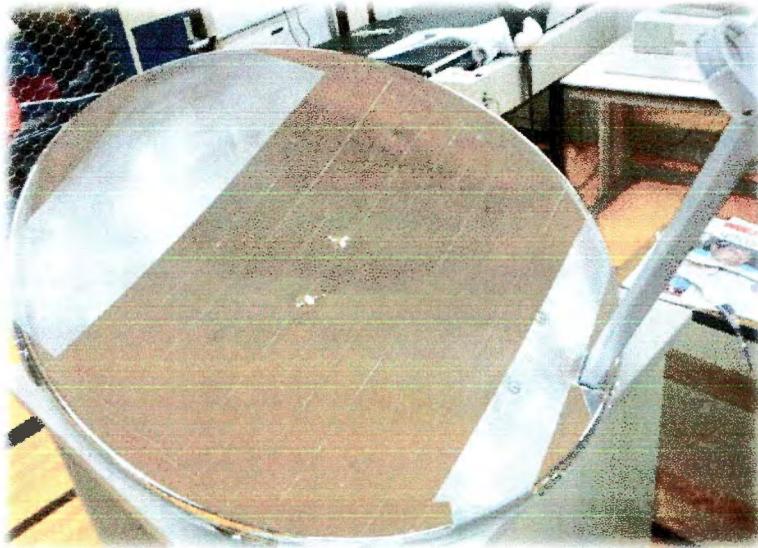


Figura 35. Antena parcialmente cubierta con papel espejo adherible

3. Se instala el receptor cilíndrico en el foco de la antena parabólica de offset.



Figura 36. Recibidor de prueba

4. Se limpia el colector solar de forma cuidadosa para evitar ralladuras.
5. Se verifica el correcto funcionamiento de los tres termopares y se instalan dos en el receptor y uno en el material a fundir. En el receptor se coloca un termopar en la base donde se recibirá el haz proveniente del colector y el segundo termopar en la parte más lejana de dicho haz.
6. Se coloca la parábola de offset en la posición adecuada de manera que en el foco se obtenga la mayor concentración solar y se empieza el escaneo de temperaturas

en el receptor y material. Como se menciono anteriormente, la antena de sky utilizada para realizar las pruebas es una antena parabólica de offset, por lo tanto es importante que la alineación respecto al Sol se de de la siguiente manera:

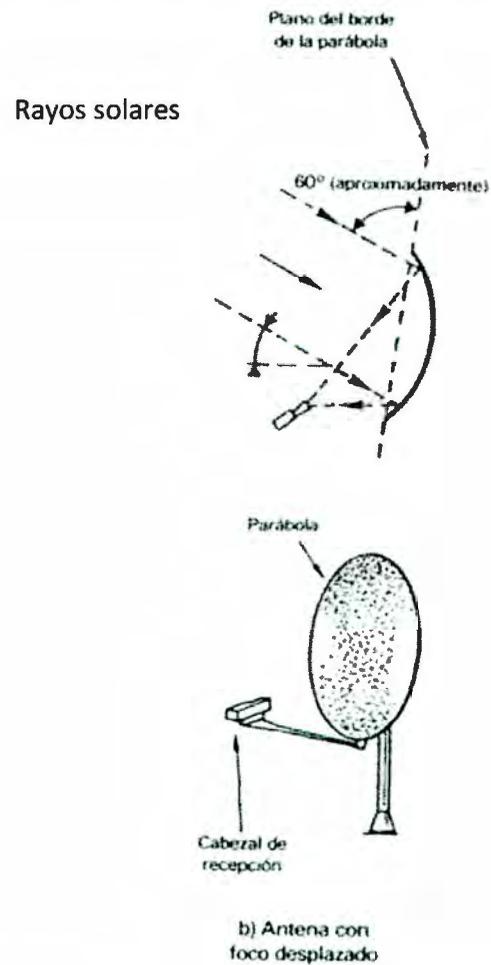


Figura 37. Antena con foco desplazado

7. Se registran los datos obtenidos durante 275 segundos.
8. Se suspende el escaneo de los datos experimentales.
9. Se desorienta el sistema colocándolo en una posición de enfriamiento colocando el colector hacia abajo.

G. RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN

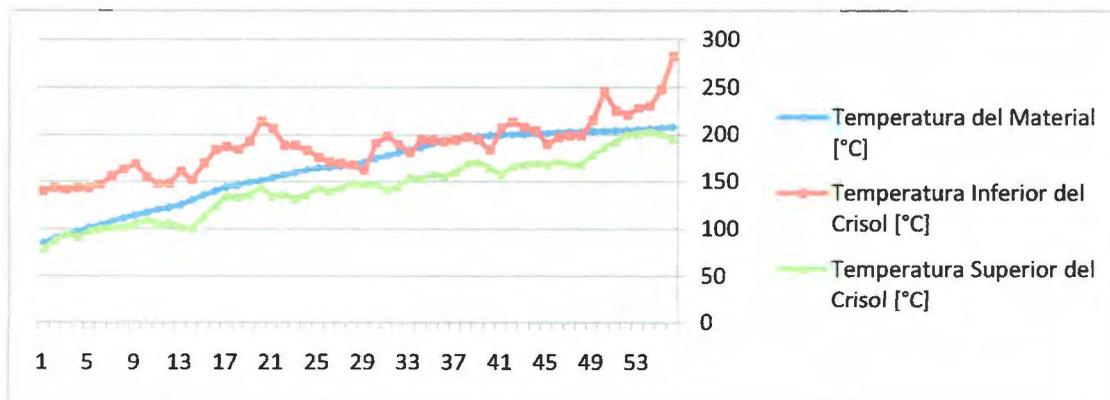
En el experimento se obtuvieron los siguientes resultados:

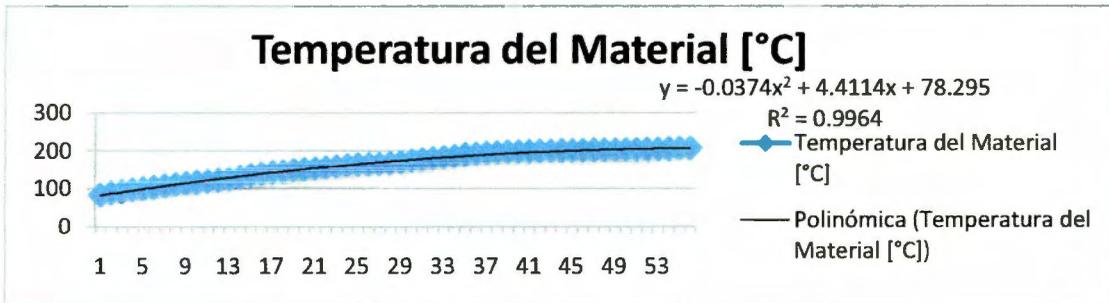
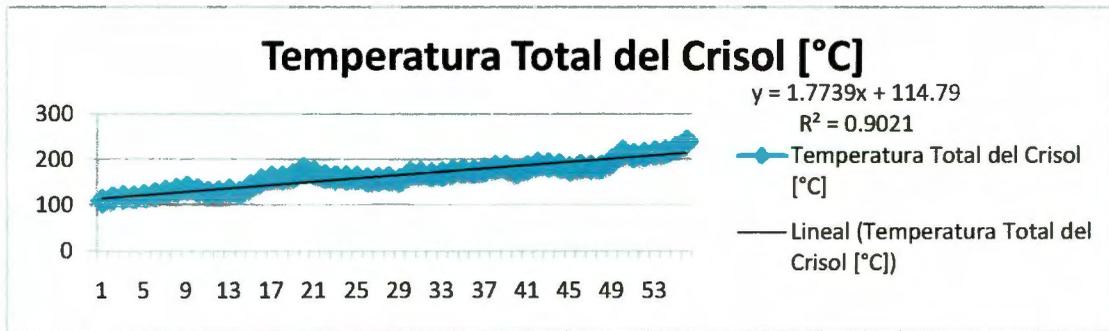
Se realizaron tres pruebas experimentales con baja radiación solar directa. En las gráficas que se muestran a continuación se muestra la variación de temperatura promedio en el receptor así como la variación de temperatura en el material con respecto al tiempo. Esto se realiza durante el proceso de calentamiento del sistema. Para la prueba 1 se tenía una radiación solar directa promedio de 1096.62 W/m^2 , para la prueba 2 la radiación solar directa promedio de 808.32 W/m^2 y finalmente para la prueba 3 de 964.14 W/m^2 . Estas mediciones se realizaron ubicando un piranómetro en la misma dirección que el eje Z del sistema de prueba, esto con el propósito de medir la radiación recibida por el sistema en la posición inclinada en la que es utilizado.

En todas las pruebas se hace un ajuste lineal en las curvas de temperatura puesto que lo que se busca es encontrar si el aumento de la misma tiene un comportamiento lineal conforme aumenta el tiempo de exposición. Esto es con el fin de justificar un uso lineal en los cálculos posteriores de energía requerida para la fundición del material y calcular las cantidades que se pueden tratar con este sistema.

1. PRUEBA 1

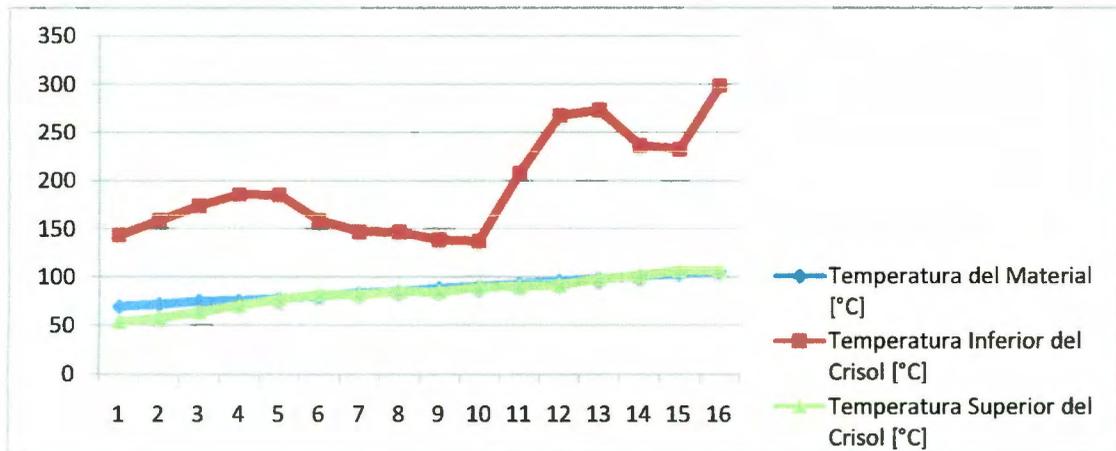
Para este caso se presentaron temperaturas desde 109.3°C y hasta 239°C en un tiempo de 275 segundos.

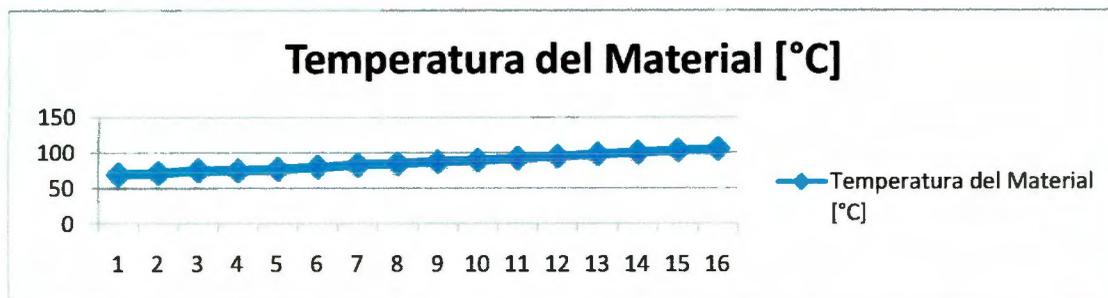
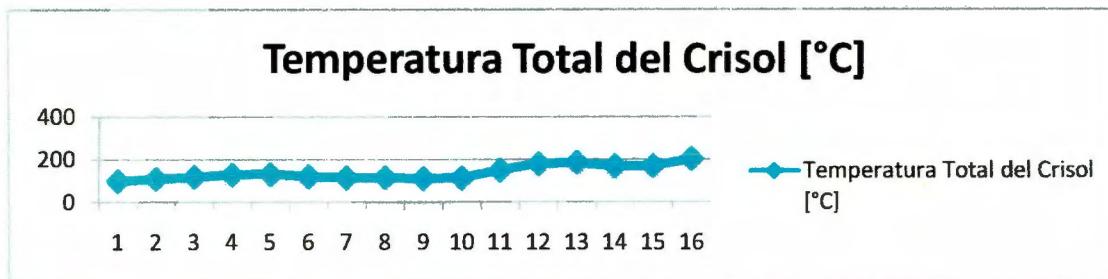




2. PRUEBA 2

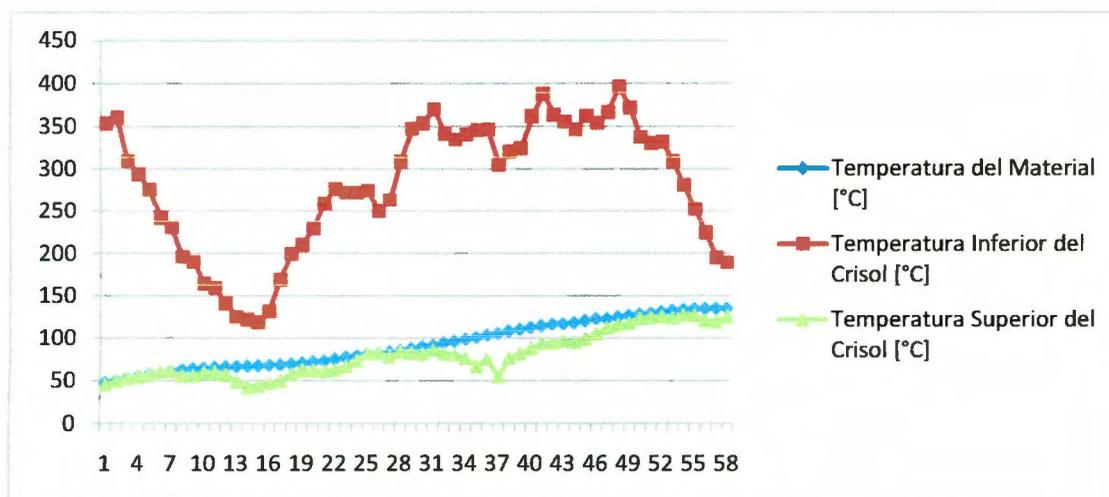
Para este caso se presentaron temperaturas desde 37.95°C y hasta 202.7°C en un tiempo de 135 segundos.

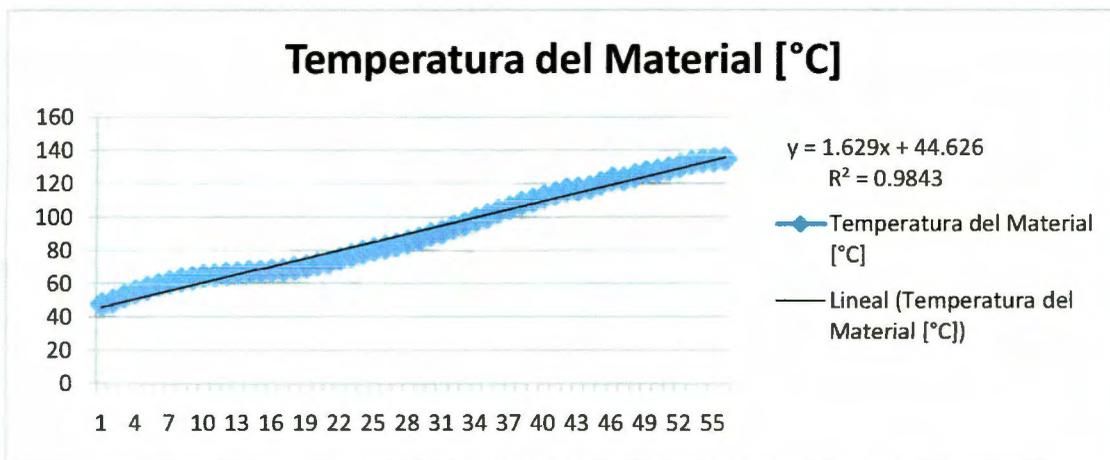
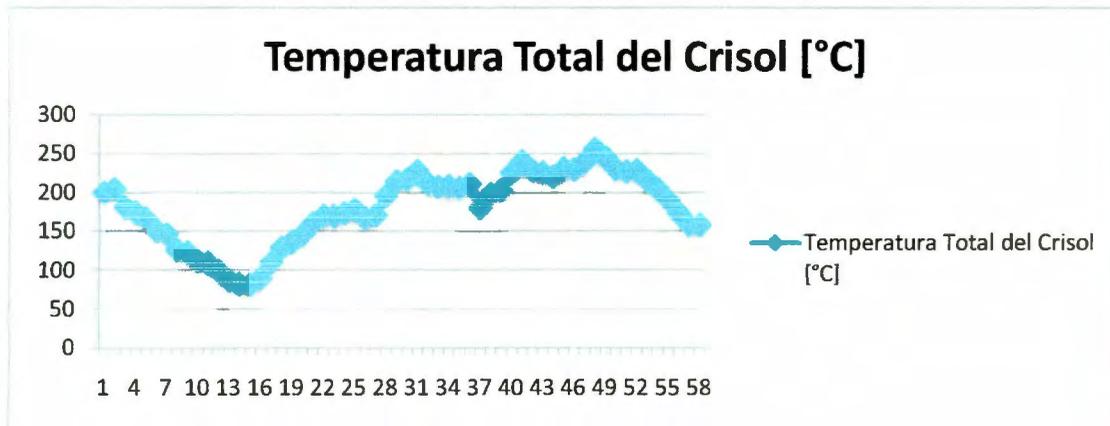




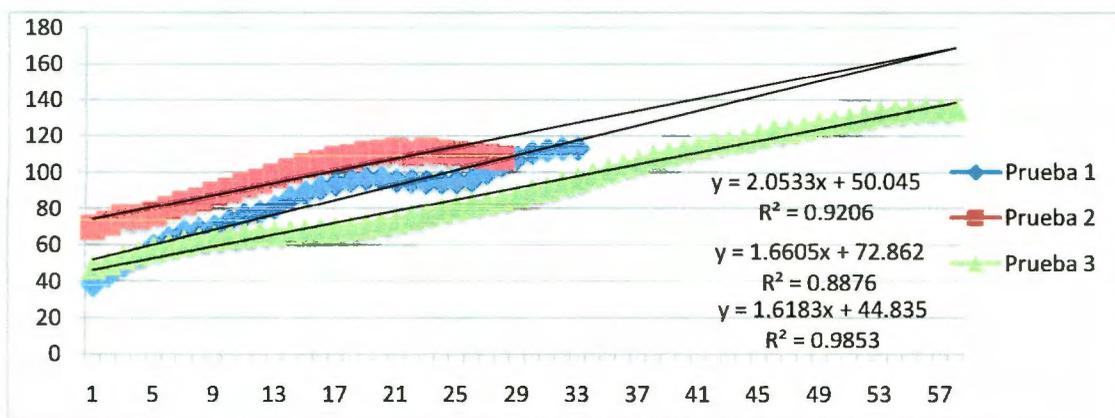
3. PRUEBA 3

Para este caso se presentaron temperaturas desde 81.3°C y hasta 255.7°C en un tiempo de 275 segundos.





El gran incremento de temperatura se debe principalmente a que el receptor está construido de aluminio el cual presenta una alta conductividad, sin embargo lo más deseable es que sea de cobre pues presenta mayor conductividad térmica lo que ayuda a que la distribución de calor sea más uniforme.



El valor de T_{sky} promedio que se tomó como referencia para los cálculos es de -20°C y una temperatura ambiente promedio de 20°C .

De acuerdo con las ecuaciones 96 a 10 y considerando radiación solar directa promedio (G_b) de 800 W/m^2 se tienen los siguientes valores:

¹ T_i	² β_i	³ μ_i [kg/m-s]	⁴ k_i [W/m-K]	⁵ ρ_i	⁶ ν_i
40	0.0033	0.00001872	0.02588	0.8625	0.00002171
60	0.003195	0.00001918	0.02662	0.8349	0.00002297
80	0.003096	0.00001963	0.02735	0.8091	0.00002427
100	0.003003	0.00002008	0.02808	0.7848	0.00002559
120	0.002915	0.00002052	0.02881	0.7619	0.00002694
140	0.002833	0.00002096	0.02953	0.7403	0.00002831
160	0.002755	0.00002139	0.03024	0.7199	0.00002971
180	0.002681	0.00002181	0.03095	0.7006	0.00003113
200	0.002611	0.00002223	0.03165	0.6823	0.00003258

⁷ Pra_i	⁸ Ra_i	⁹ $Nuss_i$	¹⁰ h_i	¹¹ Q_i	¹² Tf_i
0.7282	1.728E+06	21.39	4.613	1444	30
0.7255	2.975E+06	24.5	5.435	2438	40
0.7228	3.860E+06	26.15	5.961	3594	50
0.7202	4.474E+06	27.14	6.35	4907	60
0.7177	4.884E+06	27.74	6.658	6382	70
0.7154	5.139E+06	28.09	6.912	8028	80
0.7132	5.278E+06	28.28	7.127	9857	90
0.7111	5.331E+06	28.35	7.312	11882	100
0.7092	5.319E+06	28.33	7.474	14118	110

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los datos obtenidos con la experimentación y el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor por convección se puede obtener un valor aproximado del calor útil y de las pérdidas de calor en el sistema.

Inicialmente a partir de las ecuaciones 93 y 95 se calculan las pérdidas de calor por radiación y las pérdidas de calor por convección y finalmente las pérdidas de calor al ambiente debidas a la transferencia de calor por convección y radiación se asumen como pérdidas globales de calor (Q_p).

Tabla 5. Pérdidas de calor

Q_p	Convección	Radiación
2686.40811	11.4906893	15.3733918
4662.2695	18.7614908	27.8612042
7102.59573	26.4702052	44.5557521
10078.6618	34.4765918	66.3100266
13675.7752	42.7019348	94.0558172
17989.5659	51.0919475	128.803712
23125.7154	59.6140579	171.643096
48934.5302	72.5795365	253.650665
40332.3459	81.3215081	322.001951
81449.4127	94.534896	448.461188
250037.28		

Mediante el balance de energía en el sistema tenemos la ecuación

Ecuación 99. Calor total

$$Q_{tot} = A_c G_b (t_f - t_o)$$

Y con esto se puede obtener el valor del calor útil dentro del sistema de la siguiente manera:

Ecuación 100. Calor útil

$$Q_{\text{útil}} = Q_{\text{abs}} - Q_p$$

Tabla 6. Calores total y útil

Q _{tot}	Q _{útil}
636172.51	386135.23

Una vez obtenido el total de energía útil del sistema, se hizo un cálculo aproximado de la masa que se podría fundir teóricamente con dicha cantidad de energía para diferentes tipos de materiales con la siguiente ecuación:

Ecuación 101. Calor útil

$$Q_{\text{útil}} = m_r C_{p_r} (T_{r_f} - T_a) + m_m C_{p_m} (T_{e_f} - T_a)$$

$$m_r = 0.23087 \text{Kg}$$

$$C_{p_r} = 900 \text{ J/Kg}^\circ\text{K}$$

T_{r_f} = temperatura final del receptor

T_{e_f} = temperatura de fusión del material

Considerando una relación lineal de la temperatura desde 100°C hasta 500°C con el tiempo, el periodo de calentamiento del material se estima de 1100 segundos. El cálculo de la cantidad de material que se puede fundir con la energía contenida en el sistema tiene como resultado los datos contenidos en la tabla 7:

Tabla 7. Materiales a fundir

Material	Cp (J/Kg·K)	T fusión	Masa
estaño	228	505.08	2.740
cobre	385	1357.77	0.588
oro	1291	1337.33	0.178
hierro	450	1808	0.377
plomo	127	661	3.722
zinc	390	692.68	1.155
magnesio	1020	923	0.329

De acuerdo a las pruebas experimentales una vez que se calculó el $Q_{\text{útil}}$ del sistema se obtiene la eficiencia del colector con la ecuación:

Ecuación 102. Eficiencia del colector

$$\eta_c = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{abs}}}$$

**Eficiencia
del colector**

0.61

Una vez calculada la eficiencia en el colector que es de 61% se puede ver que está muy por debajo de la eficiencia obtenida en los sistemas similares ya existentes, ya que en éstos últimos se han llegado a obtener eficiencias de entre 80% y 90%.

Tabla 8. Comparación de eficiencia de receptores

RECEPTOR						
Nombre	Vanguard	MDAC	German Saudi	SBP 7.5-m	CPC 7.5-kW	Aisun Miyako
Tipo	Irradiación directa del tubo	Tubo de calor de sodio	Irradiación directa del tubo			
Díametro de Apertura	20 cm	20 cm	70 cm	12 cm	18 cm	18.5 cm
Flujo pico	75 W/cm ²	78 W/cm ²	50 W/cm ²	80 W/cm ²	30 W/cm ²	30 W/cm ²
Temp. en el tubo (max.)	310 °C	--	800 °C	850 °C	675°C++++	720 °C
Eficiencia	90%	90%	80%	36%	36%	65%

VII. PROBLEMAS

A. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA ALCANZADA

Uno de los mayores problemas a los que nos enfrentamos al momento de hacer las pruebas para determinar las temperaturas fue la falta de un instrumento de medición que tuviera un rango lo suficientemente grande para hacer las mediciones exactas. En ambos casos, el instrumento de medición en cierto punto nos marcó fuera de rango con lo cual no nos fue posible encontrar la temperatura máxima real que pudo alcanzar el sistema.

Además del hecho de que ambos instrumentos nos marcaran fuera de rango, también nos encontramos con que el termómetro infrarrojo era difícil de maniobrar, además de que éste no servía en materiales que fueran reflejantes, por lo tanto las mediciones realizadas con el mismo no eran muy precisas, ya que dependían de quien estuviera tomando la temperatura y de la reflectividad del material que se quisiera medir.

B. MECANISMOS DE SEGUIMIENTO DEL SOL Y DE FRENADO

Una de las partes más importantes al momento de construir un sistema como el que se presenta en este trabajo, es la del seguimiento del sol, ya que de éste depende la eficiencia que pueda tener el colector. Dado que la antena está diseñada para que los rayos incidan paralelos al eje z de la misma, es importante que exista un sistema que siga lo más fielmente la posición del sol, dependiendo del día del año y de la hora del día para así poder aprovechar realmente la radiación solar.

Como se mencionará más adelante, la parte del mecanismo de seguimiento se encuentra en el trabajo futuro, y para nuestro caso el posicionamiento de la antena se realizó de manera manual. Es por esto que la existencia del freno que detuviera la antena en la ubicación que se necesitaba era de extrema importancia. La mayor dificultad que tuvimos en este aspecto se encuentra que no encontramos, sino hasta el final, una manera de hacer que la parábola quedara inmóvil una vez colocada en la posición deseada. El sistema actual fue precedido por dos configuraciones similares que no funcionaron en mayor parte debido a la mala elección del material que se utilizó para los mismos.

C. CAMBIOS CLIMÁTICOS

Uno de los factores que más nos afectó al momento de hacer las pruebas fueron los cambios climáticos. Siendo una condición que no se puede controlar, muchas veces nos encontramos en la necesidad de hacer pruebas sin la posibilidad de poder hacerlas. A pesar de que se gozó de varios días en los que las condiciones eran excelentes, muchas veces éstas solo duraban un par de horas, cuando el trabajo requería que se hicieran pruebas a lo largo del día. También nos encontramos con que a pesar de tener

condiciones favorables por más horas en ciertos días, la radiación no era tan buena como para realizar las pruebas y que se obtuvieran buenos resultados.

D. COLOCACIÓN DEL RECIBIDOR

En las pruebas realizadas un factor de extrema importancia es la incidencia de los rayos concentrados en el receptor, ya que de esto depende una transferencia efectiva de calor hacia el material que se intenta fundir. Al inicio de las pruebas se colocó la base del receptor exactamente donde se encontraba el foco, para que éste recibiera la mayor concentración de los rayos. Conforme se fueron realizando más pruebas nos pudimos dar cuenta de que al ser un área de concentración muy pequeña el receptor tardaba demasiado en calentarse lo suficiente para fundir el material de manera rápida y efectiva. Una vez que pudimos darnos cuenta de esto, se decidió mover el receptor a una distancia un poco alejada del foco, para que el área de concentración fuera mayor y así pudiera calentar el mismo de manera más rápida y efectiva.

E. DETERMINACIÓN DEL RECIBIDOR

En un inicio se pensó que se podría tener un contenedor que serviría como crisol, aunque las primeras pruebas no se hicieron con el mismo. Al momento de hacer las pruebas nos pudimos dar cuenta que era necesario calcular exactamente de qué tamaño sería el mismo, para no tener pérdidas innecesarias provocadas por el exceso de tamaño en el mismo. También nos encontramos con la dificultad de encontrar un material que no reflejara demasiado y que absorbiera la mayor parte del calor para poder tener una transferencia de calor eficaz, que fuera un material que soportara temperaturas mayores a los 600°C además de ser ligero. Después de utilizar varios materiales, se decidió utilizar el aluminio pintado con pintura térmica que soportara las altas temperaturas y que además le diera una absorbencia mayor al material.

VIII. CONCLUSIONES

La necesidad imperiosa de aprovechar los recursos que tiene nuestro país fue uno de los más importantes motivos por los cuales se decidió desarrollar este proyecto. Siendo el sol la más grande fuente de energía renovable, es importante sacar todo el provecho que se pueda, utilizando dicha energía no solo en un campo como es el de la generación de energía eléctrica, sino en muchos otros que aún no se ha hecho énfasis y que pueden ser de gran utilidad y que además cumplen con un plan de sustentabilidad.

El proyecto aquí presentado se realizó con el objetivo de establecer los alcances que tiene la aplicación de la energía solar concentrada en un campo novedoso, como lo es la fundición de metales. Se ha comprobado con este trabajo la efectividad obtenida al realizar la fundición de metales cuyo punto de fusión se encuentra entre 200 y 500 grados centígrados. Aunado a ello, este trabajo sirve para hacer conciencia en toda la variedad de aplicaciones que la energía solar puede llegar a tener, además de desarrollar una base para la continuación de lo que puede ser un proyecto de un plazo más largo-

A lo largo del proceso que se siguió para el desarrollo del mismo, nos pudimos dar cuenta de las dificultades que se pueden encontrar cuando no existe suficiente información. También nos pudimos dar cuenta de todo el conocimiento previo que se debe adquirir para poder iniciar a hacer pruebas que más adelante nos ayudarían a determinar cómo sería el sistema que propondríamos. A final de cuentas, resultó un proceso más largo del que se esperaba, dada la incertidumbre que existía debida a la falta de información precisa que nos ayudara a desarrollar las pruebas necesarias para hacer el diseño del sistema propuesto.

IX. TRABAJO FUTURO

A través del desarrollo del proyecto, se han determinado algunos puntos importantes a desarrollar a corto y mediano plazo para obtener un funcionamiento del sistema que permita trabajar con mayor comodidad para los propósitos de fundición y soldadura para el que fue diseñado, así como los trabajos necesarios para adaptarlo a otras aplicaciones

La primera meta es encontrar los materiales que permitan el funcionamiento óptimo del sistema. Esto es, encontrar el material que permita la mayor reflexión de luz visible en la superficie del colector, así como la menor absorción de la misma. Por otra parte, también se debe encontrar el material que pueda resistir altas temperaturas y cuya emisividad en el infrarrojo sea muy baja. Una vez detectados los materiales que permitan el funcionamiento óptimo del sistema y con los cuales la eficiencia se mantenga alta, será necesario proceder a construir el sistema propuesto.

Otro de los puntos importantes a desarrollar es una estructura que permita mayor estabilidad del sistema. Así mismo, se debe integrar un sistema de seguimiento solar para que el funcionamiento del colector y receptor permita la mayor eficiencia posible. Como se ha mencionado en el marco teórico del documento, el seguimiento preciso del sol es indispensable para obtener mayores eficiencias del sistema.

Una vez listo el sistema propuesto, será necesario realizar las pruebas para determinar los valores reales de emisividad en el infrarrojo, reflectancia, temperaturas alcanzadas, razón concentración, eficiencia óptica y térmica entre otros. Una vez halladas estas características se puede proceder a realizar las modificaciones necesarias para un funcionamiento más práctico del sistema.

Entre las modificaciones que se proponen y que son de gran importancia también para el aprovechamiento del sistema, está principalmente la de realizar una segunda reflexión en el foco de la parábola para obtener la energía solar concentrada en un punto sobre un plano horizontal en el cual se pueda colocar el material a fundir y desplazar el material a soldar.

X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TEXTO

Çengel, A.Y. (2ª Ed.) (2003). Thermal Radiation. En *Heat transfer: a practical approach* (pp. 562-585). New York; Mexico: McGraw-Hill.

Duffie, J.A. y Beckman W.A. (1991). Flat-Plate Collectors. En *Solar engineering of thermal processes* (pp. 250-329). New York: Wiley.

Duffie, J.A. y Beckman W.A. (1991). Concentrating Collectors. En *Solar engineering of thermal processes* (pp. 330-381). New York: Wiley.

Goswami, D.Y., Kreith, F. y Kreider, J.F. (2000). Methods of solar collection and thermal conversion. En *Principles of solar engineering* (pp. 81-172). Philadelphia, PA: Taylor & Francis.

Meinel, A.B. (1977). Concentrating Collectors. En A.A.M Sayigh (Ed.), *Solar energy engineering* (pp. 183-216). United Kingdom, London: Academic Press.

Sakurai, T. (1977). Solar Furnaces. En A.A.M Sayigh (Ed.), *Solar energy engineering* (pp. 233-262). United Kingdom, London: Academic Press.

Welford, W.T. y Winston, R. (1989). *High collection nonimaging optics*. United Kingdom, London: Academic Press.

Rojas Morín, A., *Diseño mecánico de una estructura tipo ecuatorial y caracterización térmica del receptor de un concentrador solar de foco puntual con ángulo de apertura de 90°*, Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, 2006.

ARTÍCULOS

Barba, A., Vázquez, A., Sierra, C., Llorente, J., Rodríguez, G. *Avances y perspectivas del empleo de energía solar para el tratamiento de superficies*.

L.A. Stoynov, Prasad K.D.V. Yarlagadda (2003) *Joining of engineering thermoplastics by concentrated beam insolation—a feasibility study*. School of Mechanical, Manufacturing and Medical Engineering, Queensland University of Technology, 2, George Street, GPO Box 2434, Brisbane, Qld 4001, Australia .

McCluney, R. (2001, 24 de enero). *FSEC Solar Cooker Design: optical ray trace analysis*, [en línea]. Florida, EEUU: Florida Solar Energy Center. Recuperado el 20 de enero de 2009, de

http://www.fsec.ucf.edu/en/research/solarthermal/solar_cooker/documents/analysisreport1.pdf

McCluney, R. (2001, 18 de junio). *Solar Cooker Reflector Optical Evaluation and Design Evolution*, [en línea]. Florida, EEUU: Florida Solar Energy Center. Recuperado el 20 de enero de 2009, de <http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/FSEC-GP-214-01.pdf>

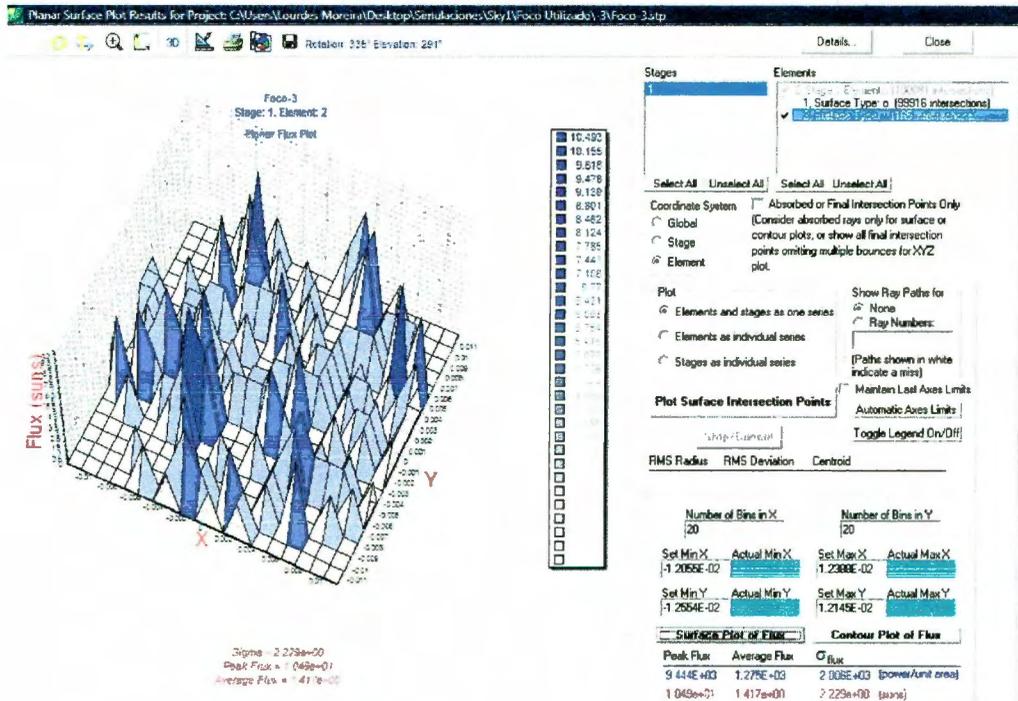
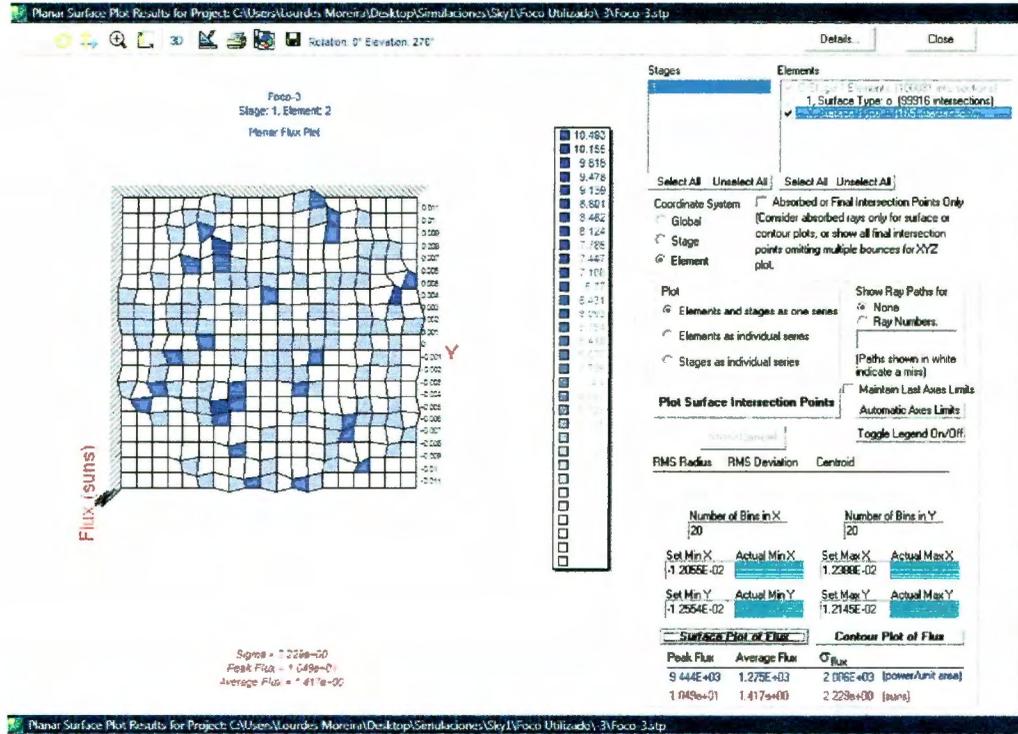
Ramos, C., Ramírez, R., Lagunas, J. y Huacuz, J.M. (2007). *Parabolic dish development in Mexico*. Cuernavaca, México: Instituto de Investigaciones Eléctricas

Yum. Lytvynenko And D.V. Schur (1999) *Utilization The Concentrated Solar Energy For Process Of Deformation Of Sheet Metal* .Institute for Problems of Materials Science of Ukrainian National Academy of Sciences, 3 Krzhizhanovsky Str., 252680. Kyiv. Ukraine

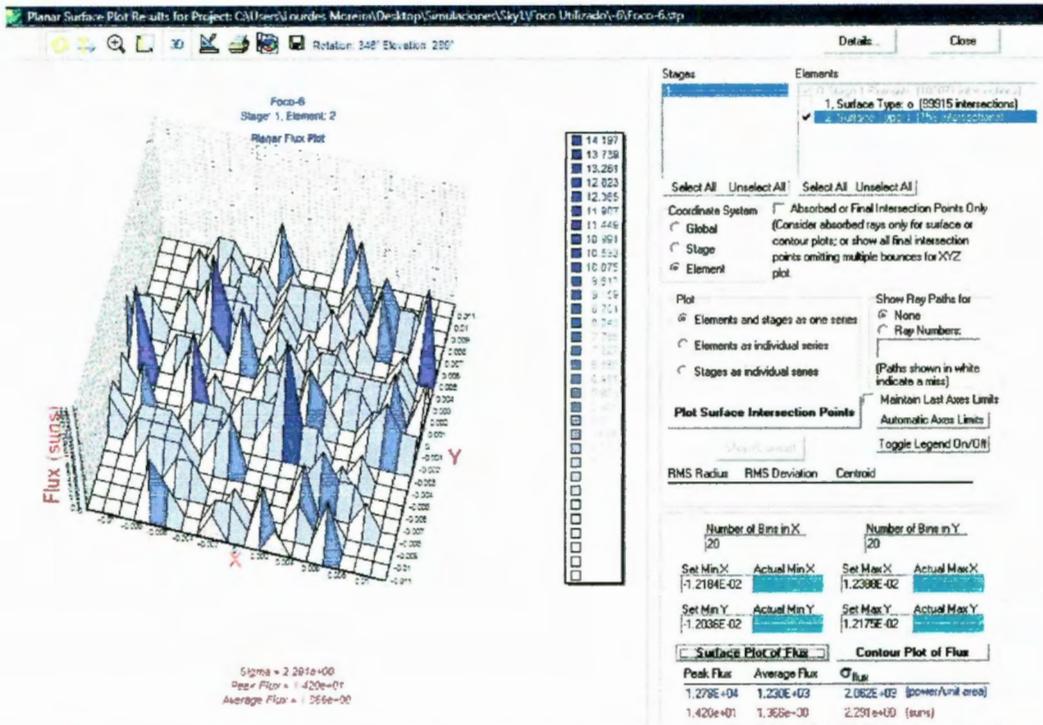
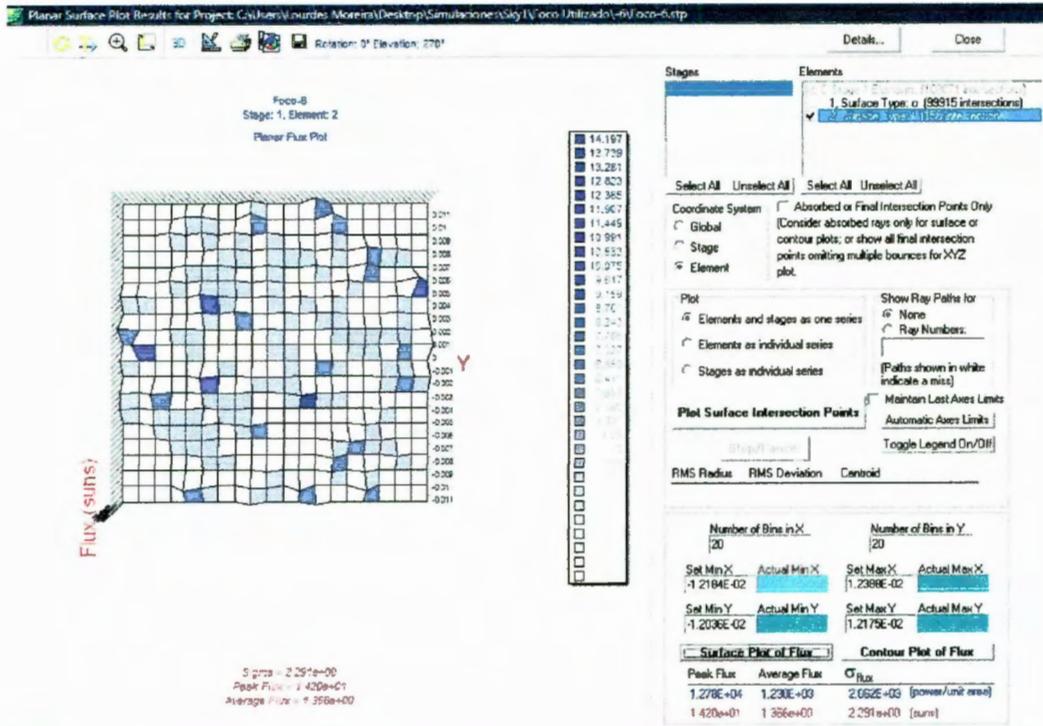
XI. ANEXOS

ANEXO 1. FLUJO SOLAR INCIDENTE EN SISTEMA DE PRUEBA

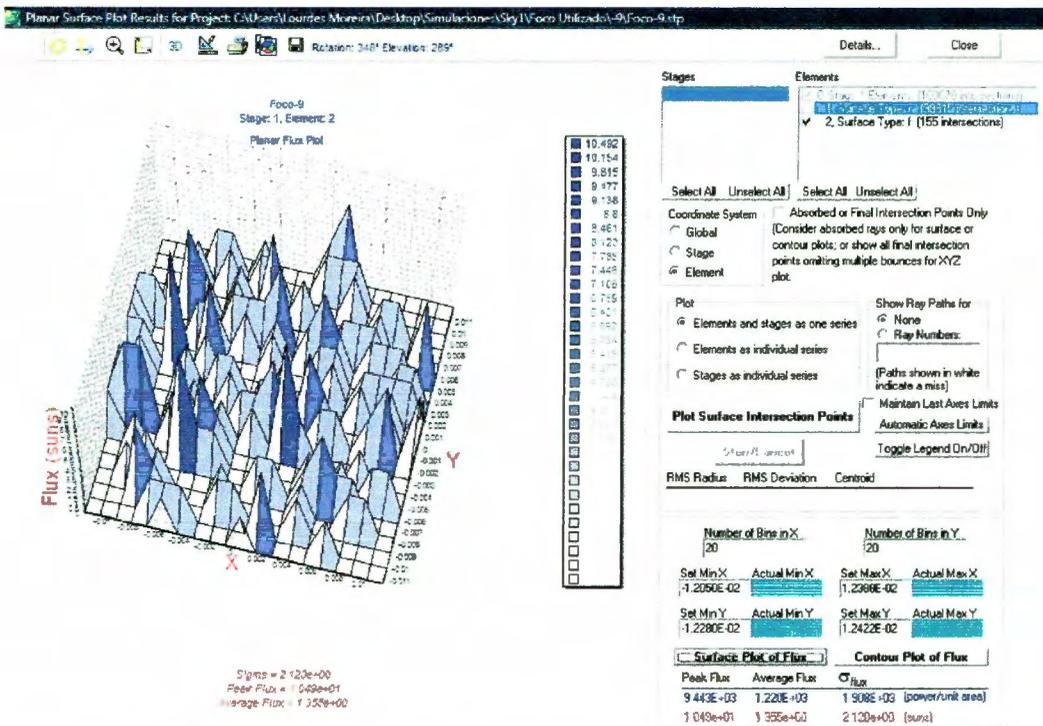
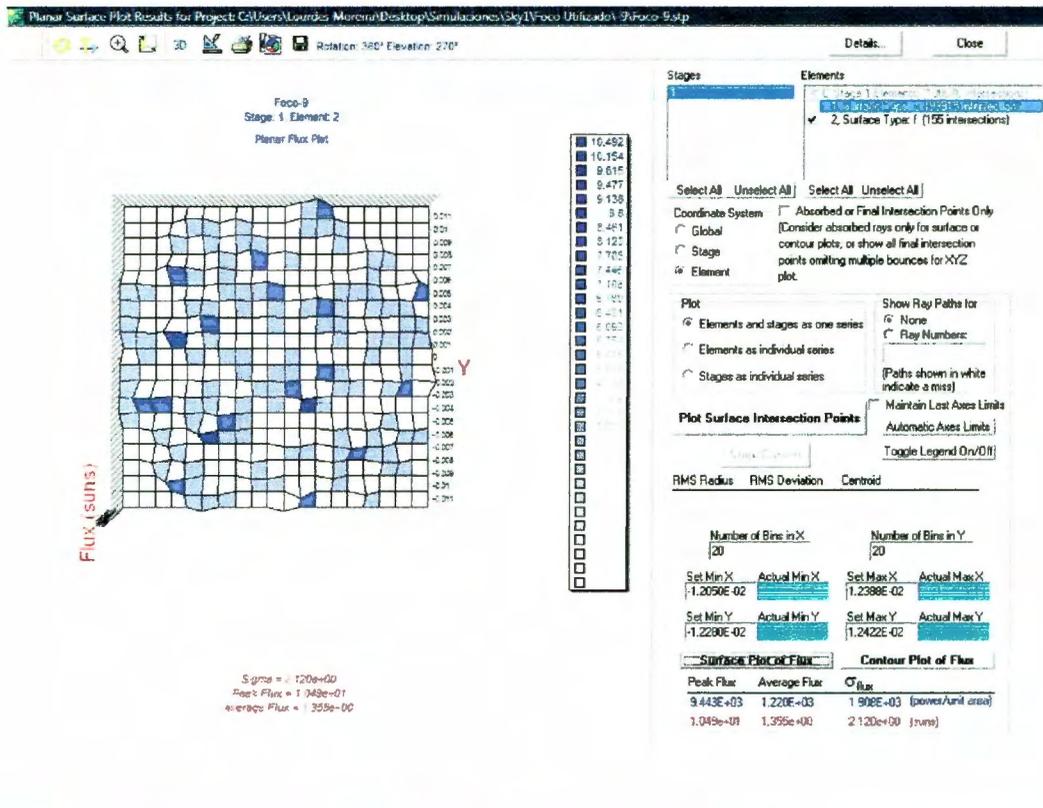
Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra 3cm lejos del foco (coordenada z):



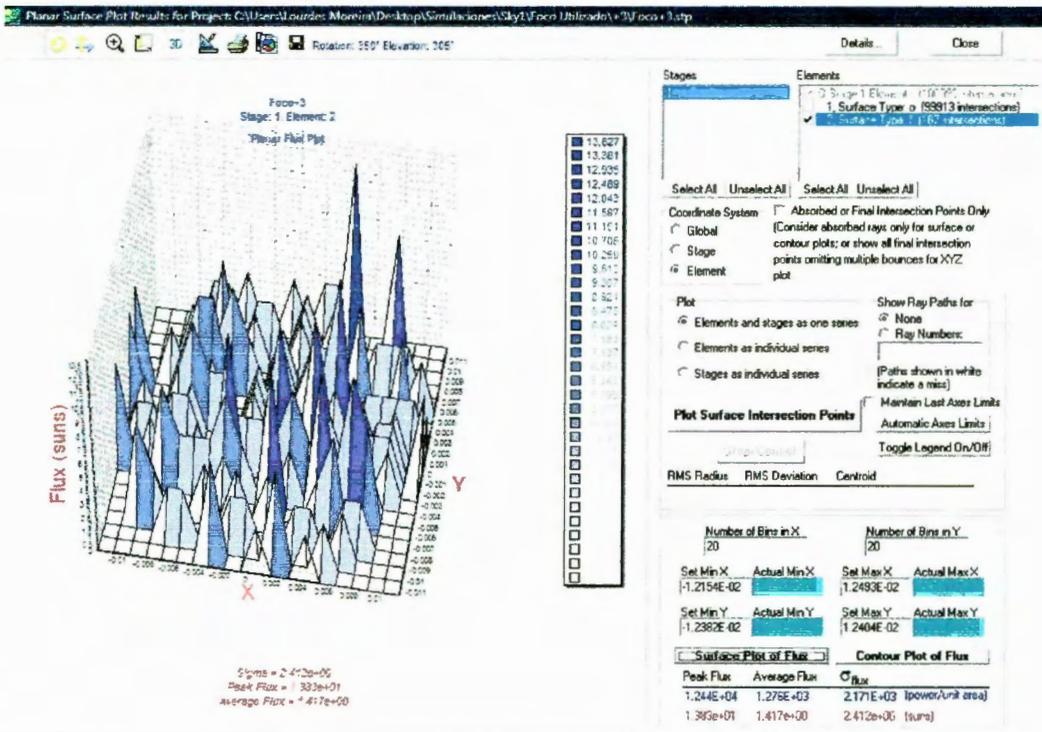
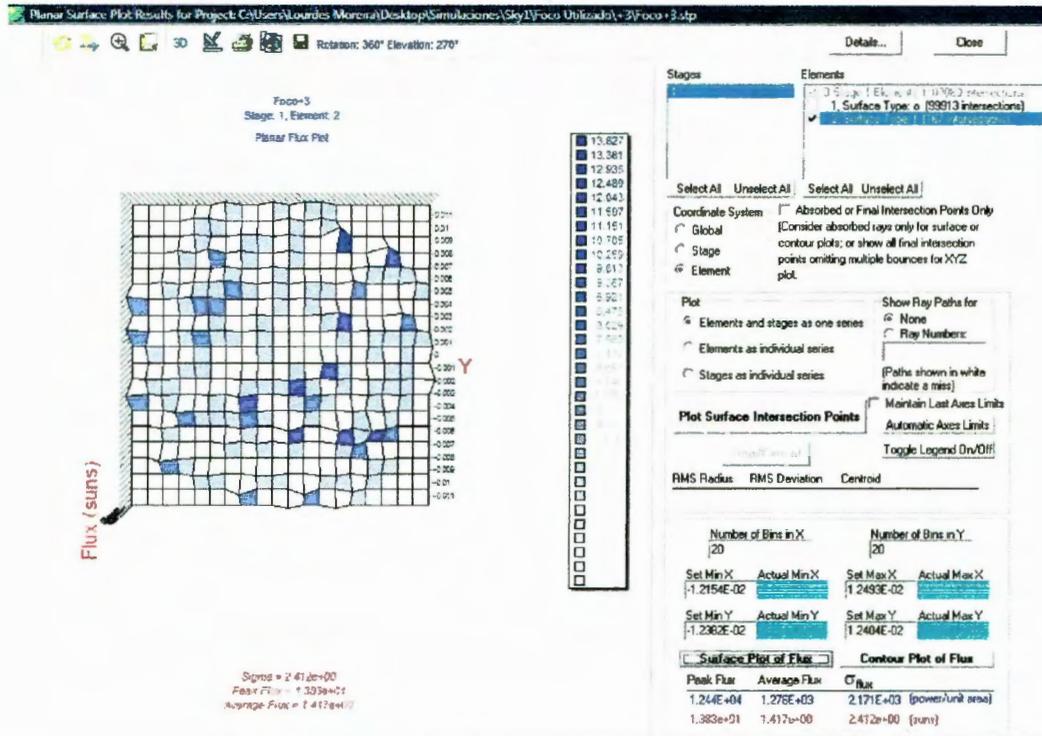
Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra a 6cm del foco (coordenada -z):



Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra a 9cm del foco (coordenada -z):



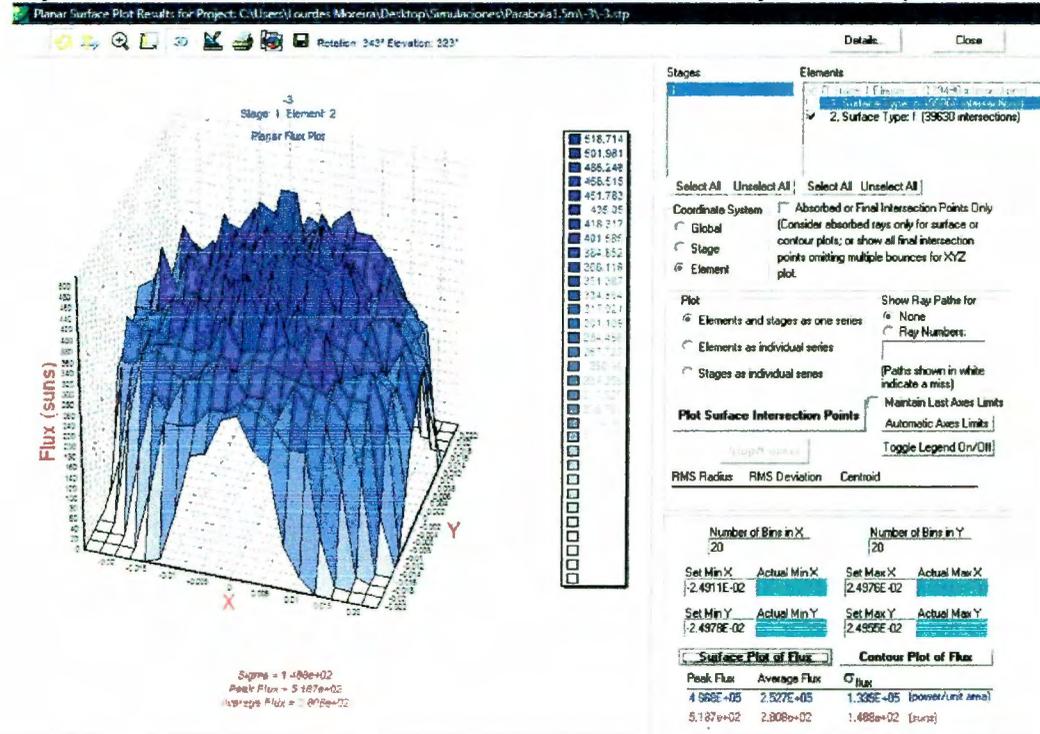
Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra a 3cm del foco (coordenada z):

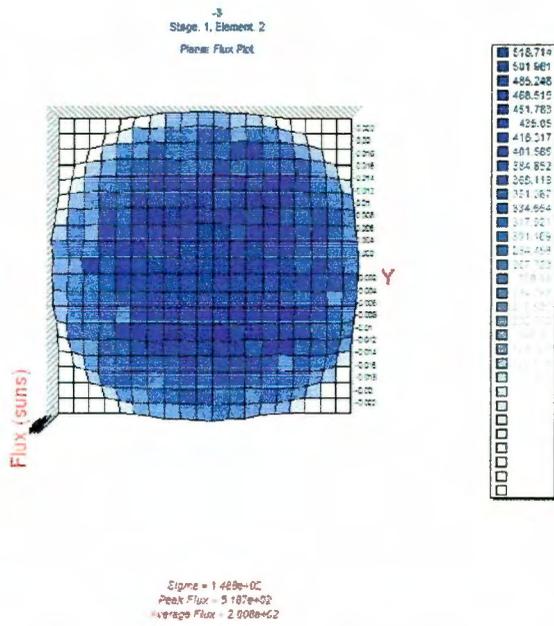


ANEXO 2. RESULTADOS FLUJO SOLAR INCIDENTE EN PARABOLOIDES

1. PARABOLOIDE DE 1.5M

Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra 3cm lejos del foco (coordenada -z):





Stages Elements

0 Stage 1 Element: 1 (153430 intersections)
2. Surface Type: f (35630 intersections)

Select All Unselect All Select All Unselect All

Coordinate System Absorbed or Final Intersection Points Only
 Global
(Consider absorbed rays only for surface or contour plots; or show all final intersection points omitting multiple bounces for XYZ plot.)

Plot Elements and stages as one series
 Elements as individual series
 Stages as individual series

Show Ray Paths for None
 Ray Numbers:
(Paths shown in white indicate a miss)

Plot Surface Intersection Points Maintain Last Axes Limits
 Automatic Axes Limits
Toggle Legend On/Off

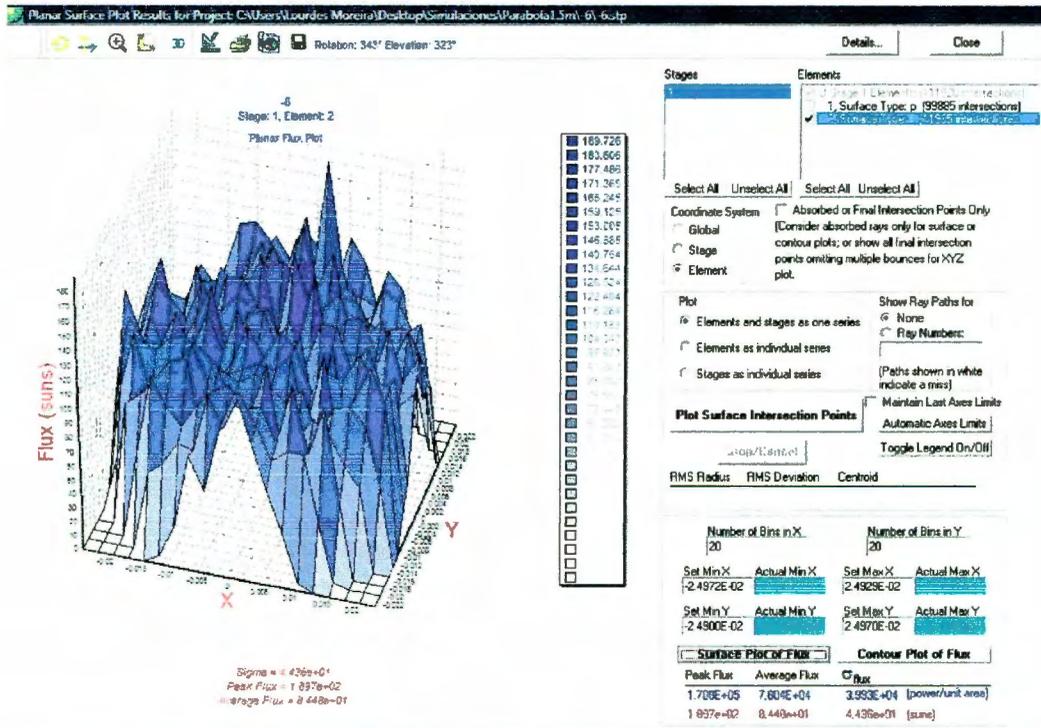
RMS Radius RMS Deviation Centroid

Number of Bins in X		Number of Bins in Y	
20	20	20	20
Set Min X	Actual Min X	Set Max X	Actual Max X
-2.4911E-02		2.4976E-02	
Set Min Y	Actual Min Y	Set Max Y	Actual Max Y
-2.4978E-02		2.4956E-02	

Surface Plot of Flux Contour Plot of Flux

Peak Flux	Average Flux	Flux
4.668E+05	2.927E+05	1.395E+05 (power/unit area)
5.197e+02	2.908e+02	1.469e+02 (suns)

Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra 6cm lejos del foco (coordenada -z):



Stages Elements

1. Surface Type: p (99995 intersections)

Select All Unselect All Select All Unselect All

Coordinate System Absorbed or Final Intersection Points Only
 Global
(Consider absorbed rays only for surface or contour plots; or show all final intersection points omitting multiple bounces for XYZ plot.)

Plot Elements and stages as one series
 Elements as individual series
 Stages as individual series

Show Ray Paths for None
 Ray Numbers:
(Paths shown in white indicate a miss)

Plot Surface Intersection Points Maintain Last Axes Limits
 Automatic Axes Limits
Toggle Legend On/Off

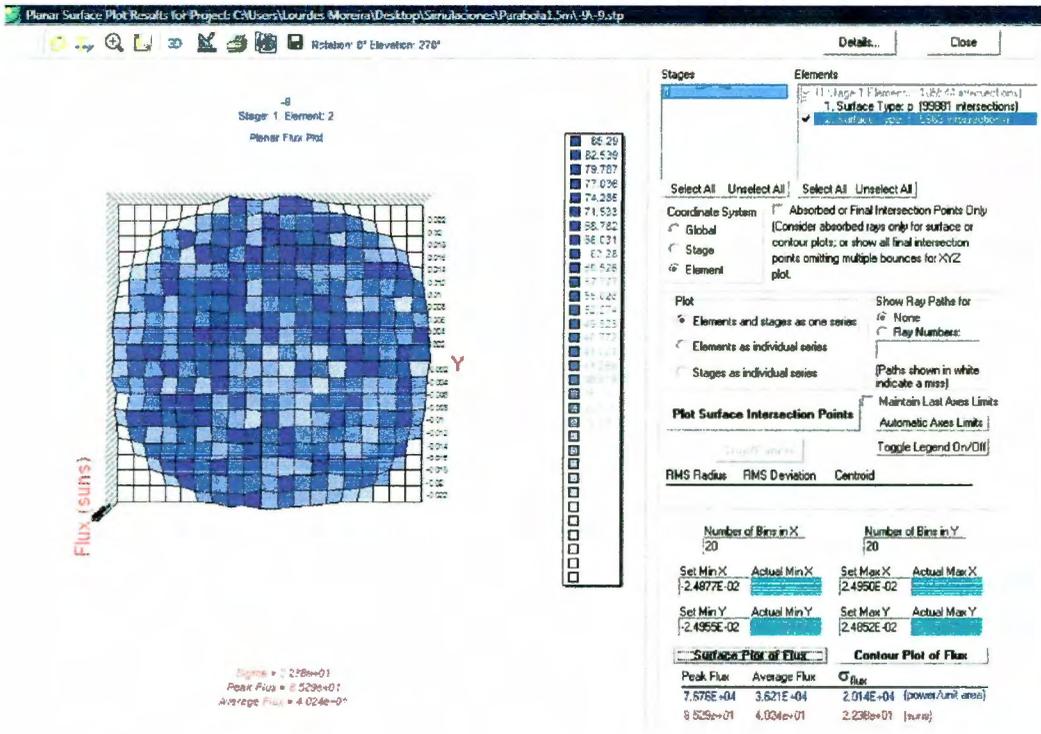
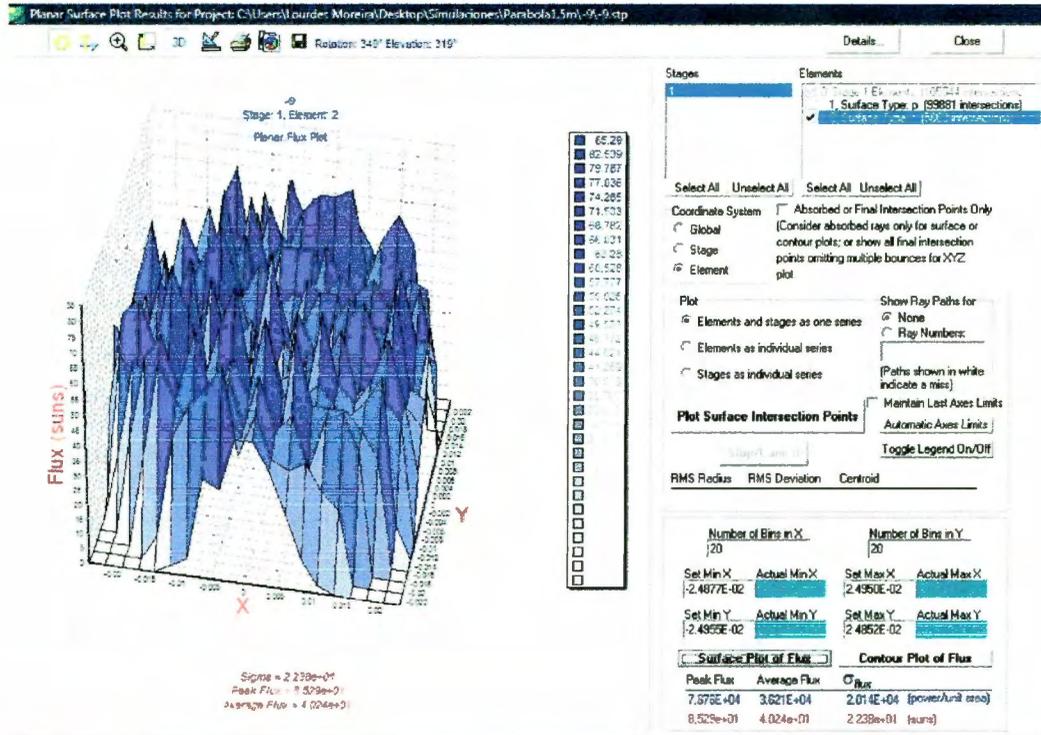
RMS Radius RMS Deviation Centroid

Number of Bins in X		Number of Bins in Y	
20	20	20	20
Set Min X	Actual Min X	Set Max X	Actual Max X
-2.4972E-02		2.4929E-02	
Set Min Y	Actual Min Y	Set Max Y	Actual Max Y
-2.4900E-02		2.4970E-02	

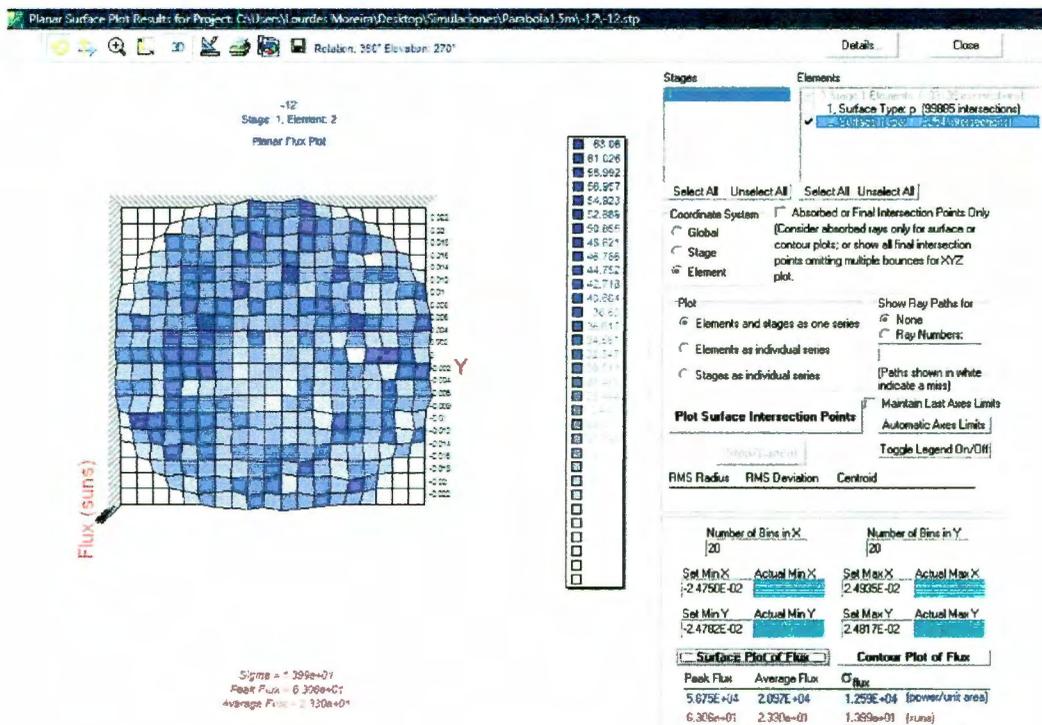
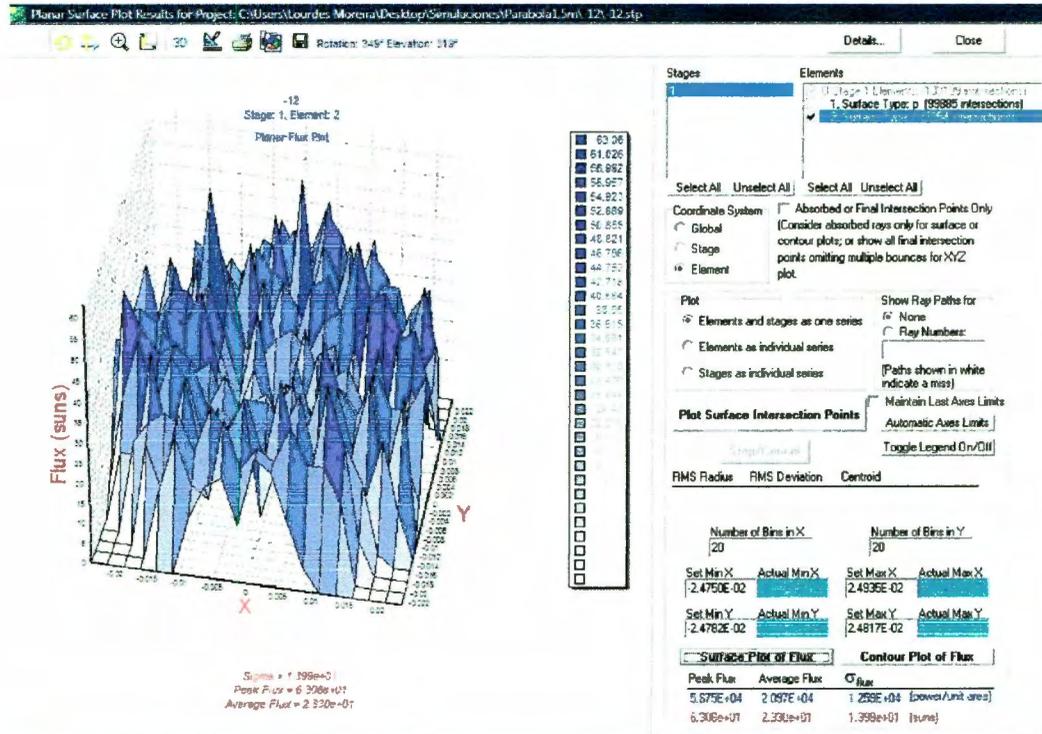
Surface Plot of Flux Contour Plot of Flux

Peak Flux	Average Flux	Flux
1.709E+05	7.604E+04	3.953E+04 (power/unit area)
1.897e+02	8.448e+01	4.426e+01 (suns)

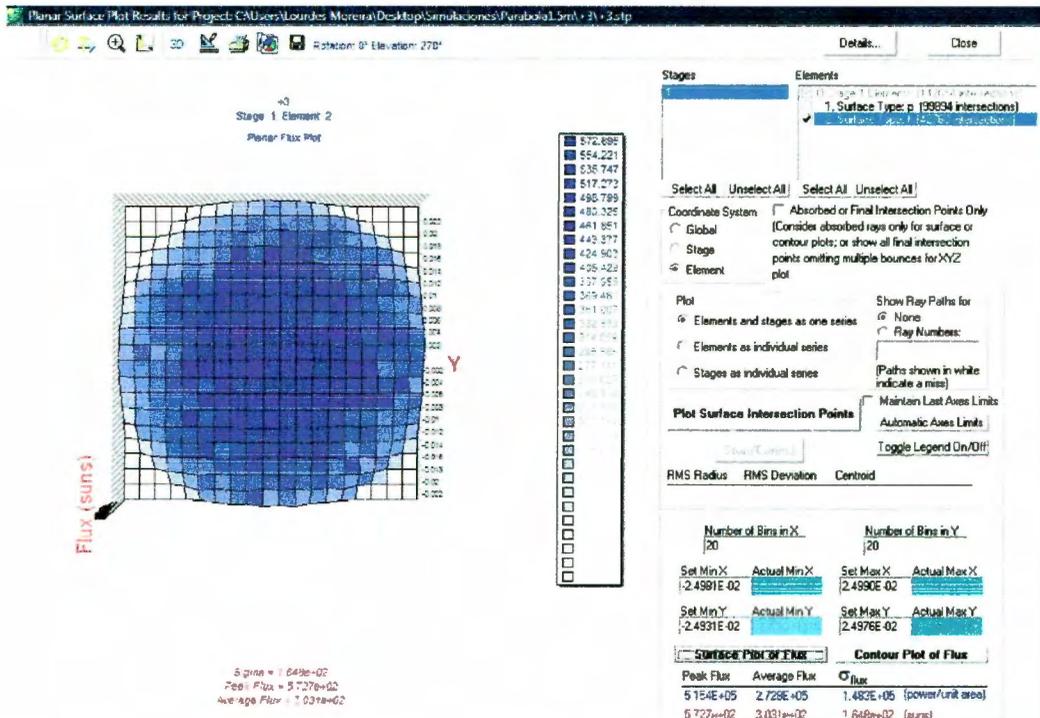
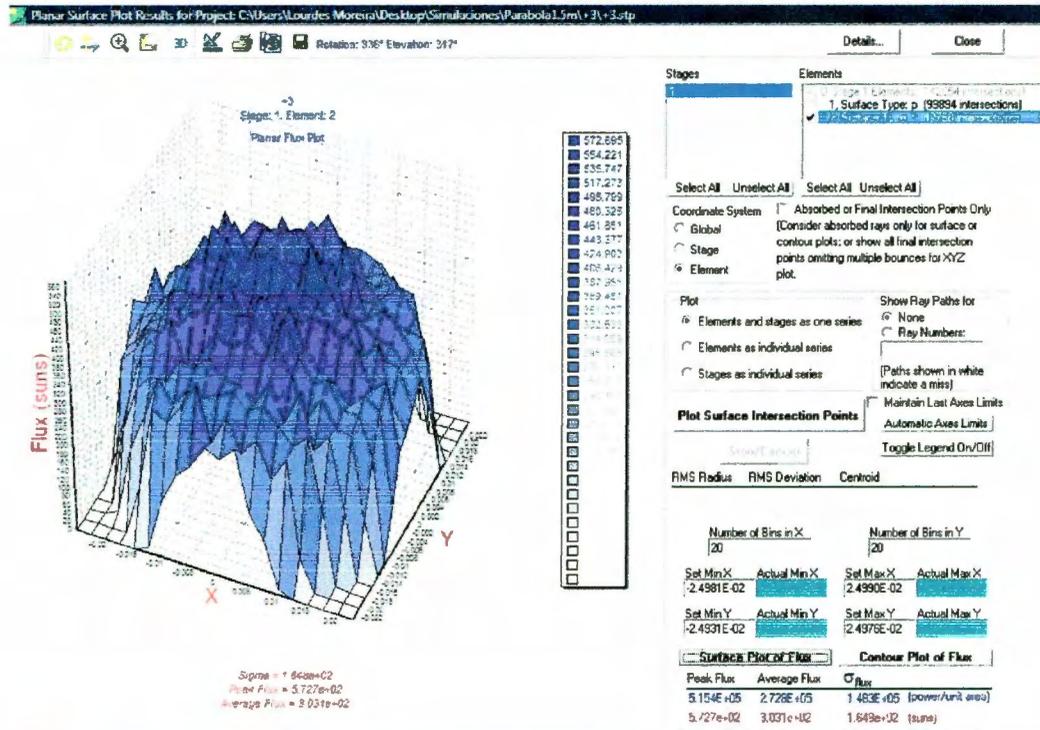
Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra 9cm lejos del foco (coordenada -z):



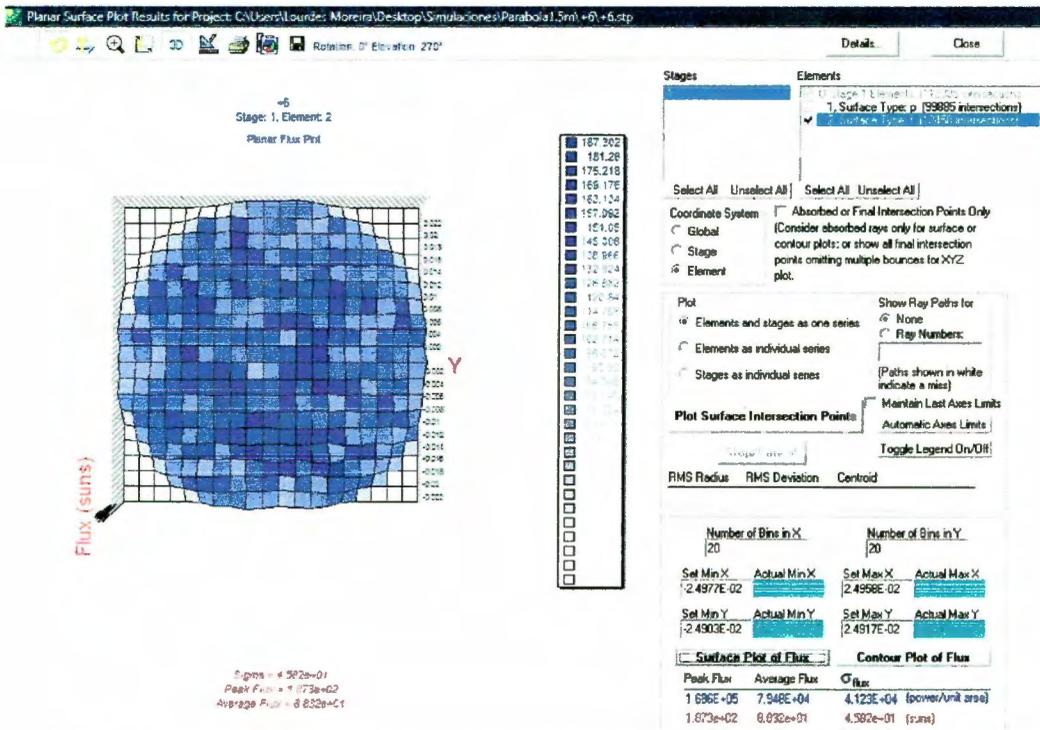
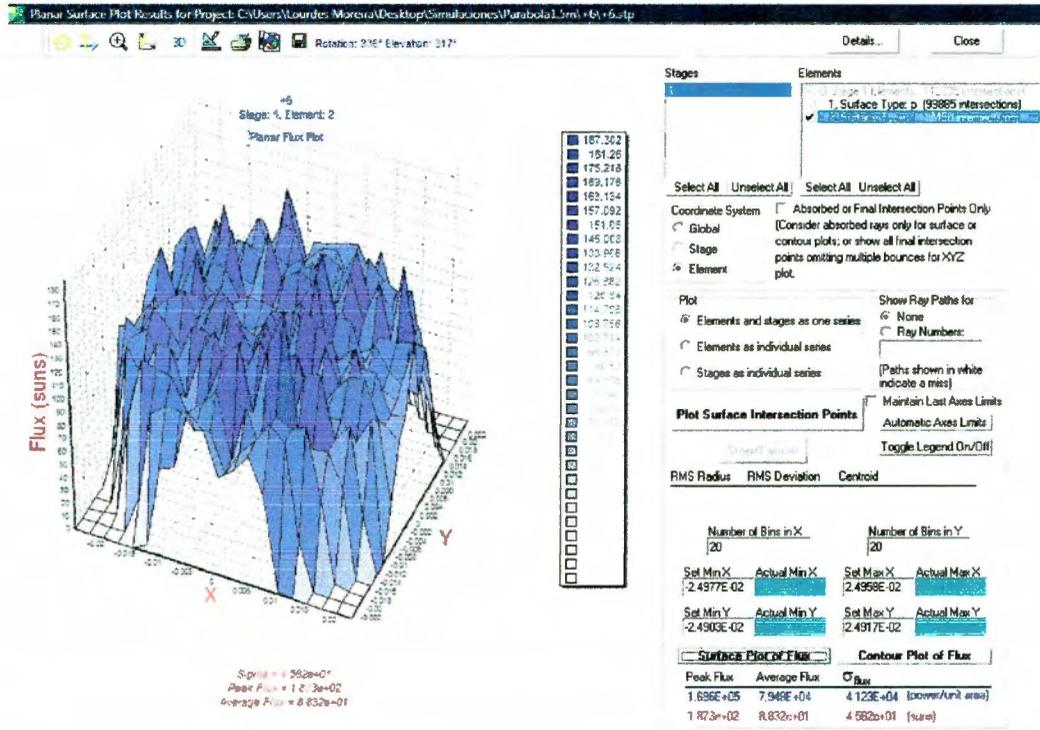
Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra 12cm lejos del foco (coordenada -z):



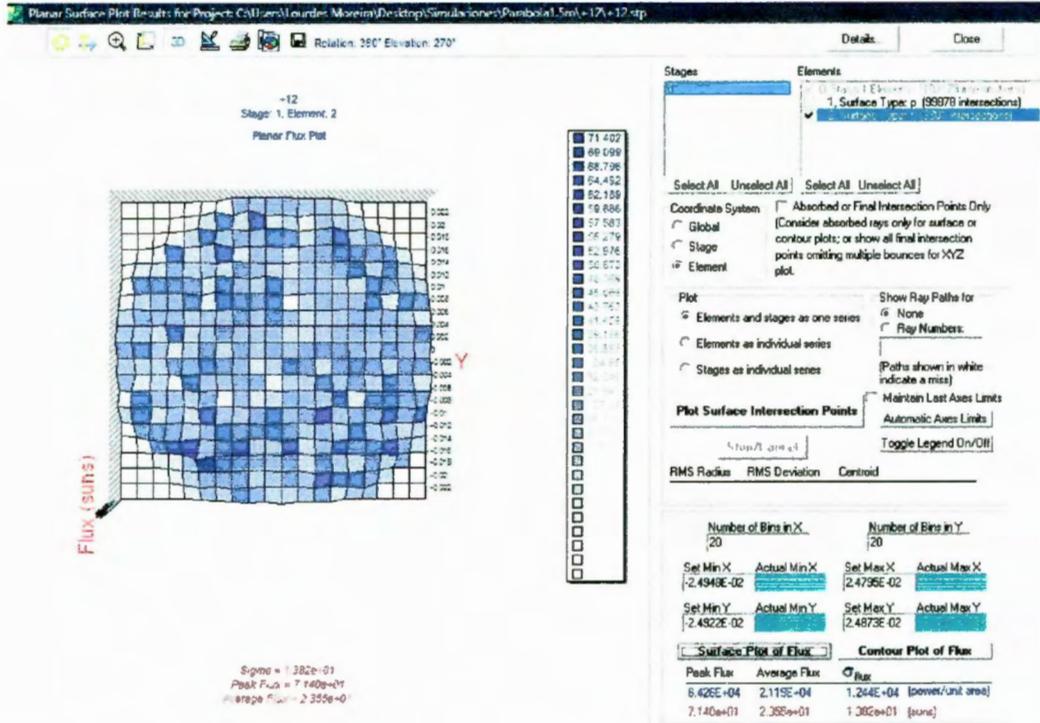
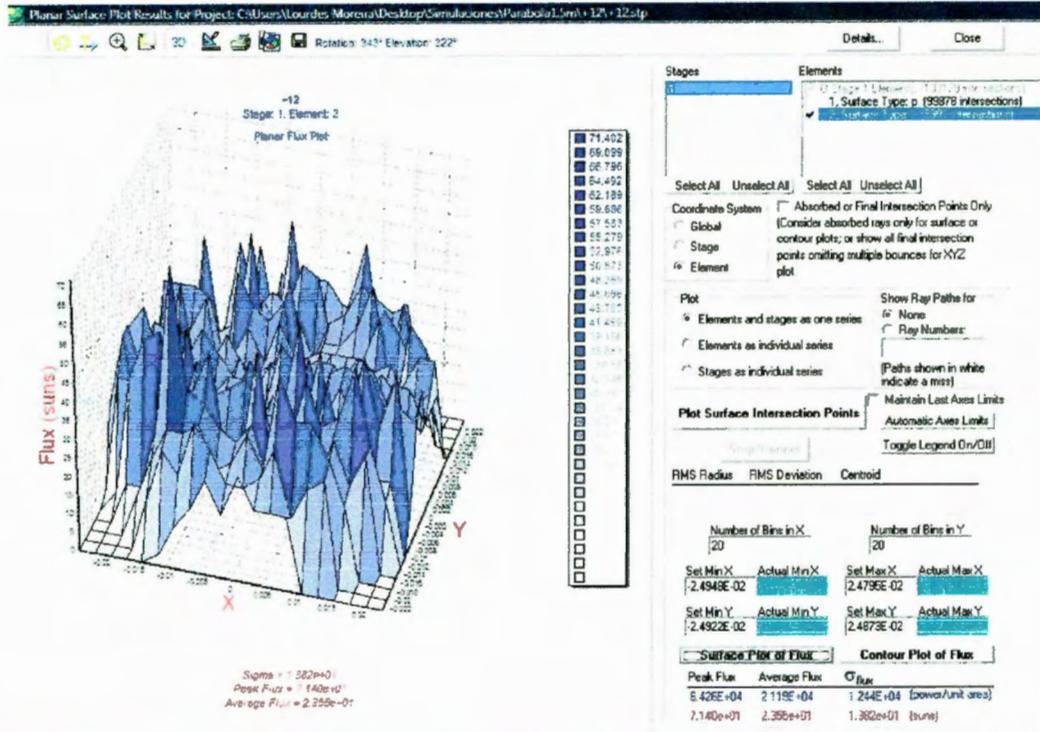
Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra 3cm lejos del foco (coordenada +z):



Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra 6cm lejos del foco (coordenada +z):

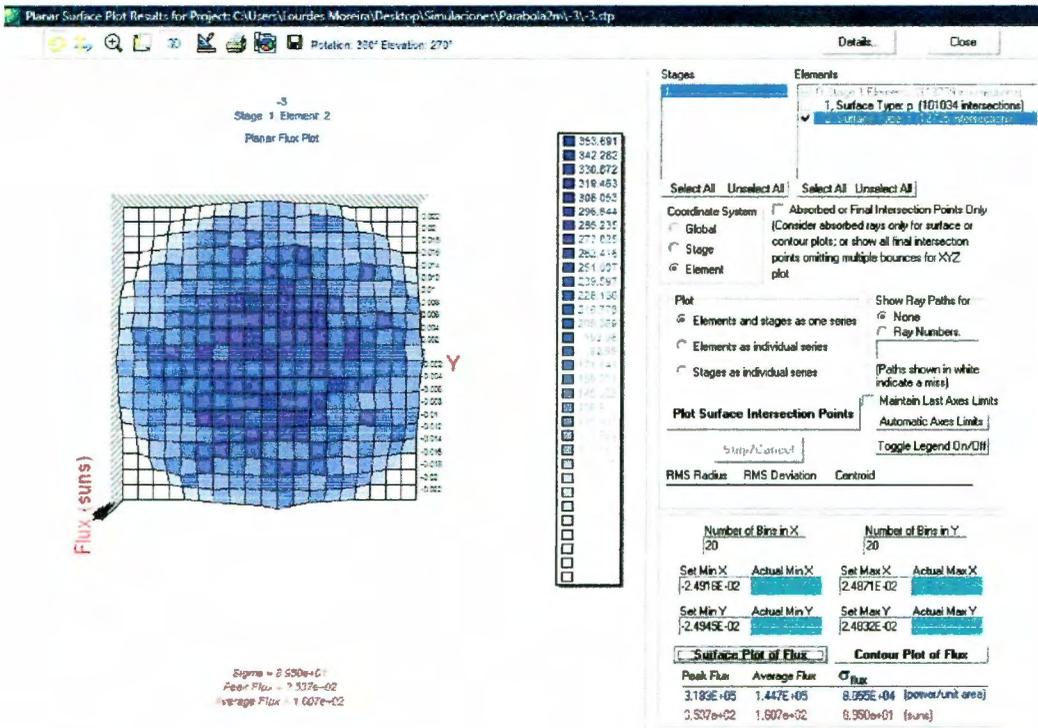
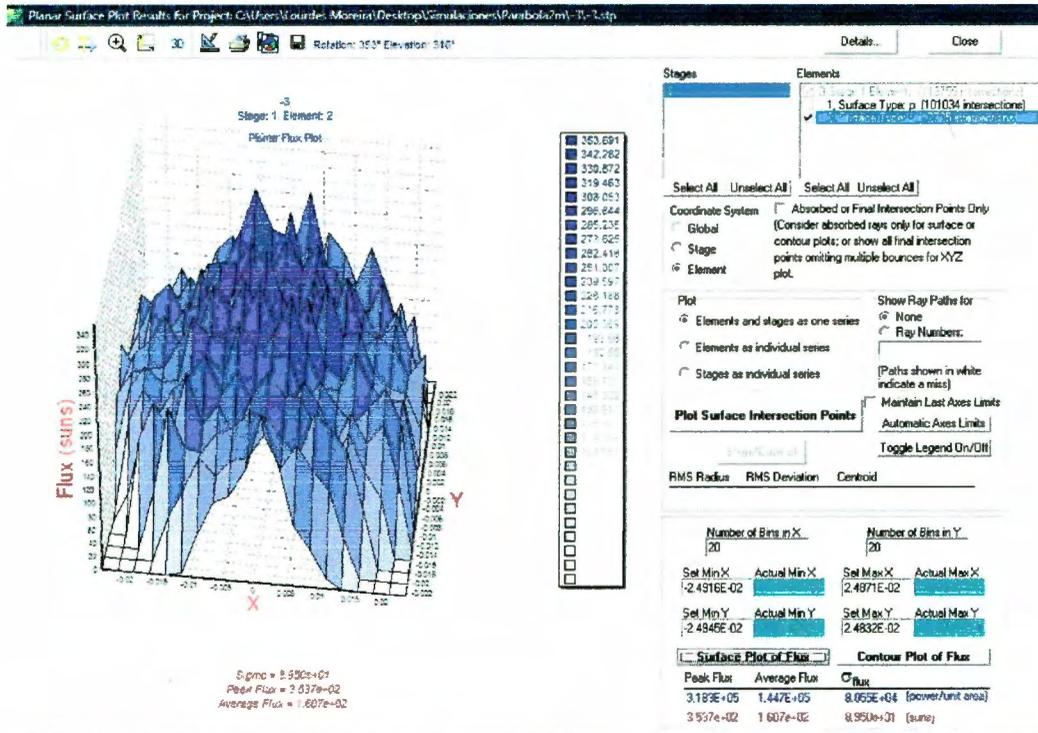


Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra 9cm lejos del foco (coordenada +z):

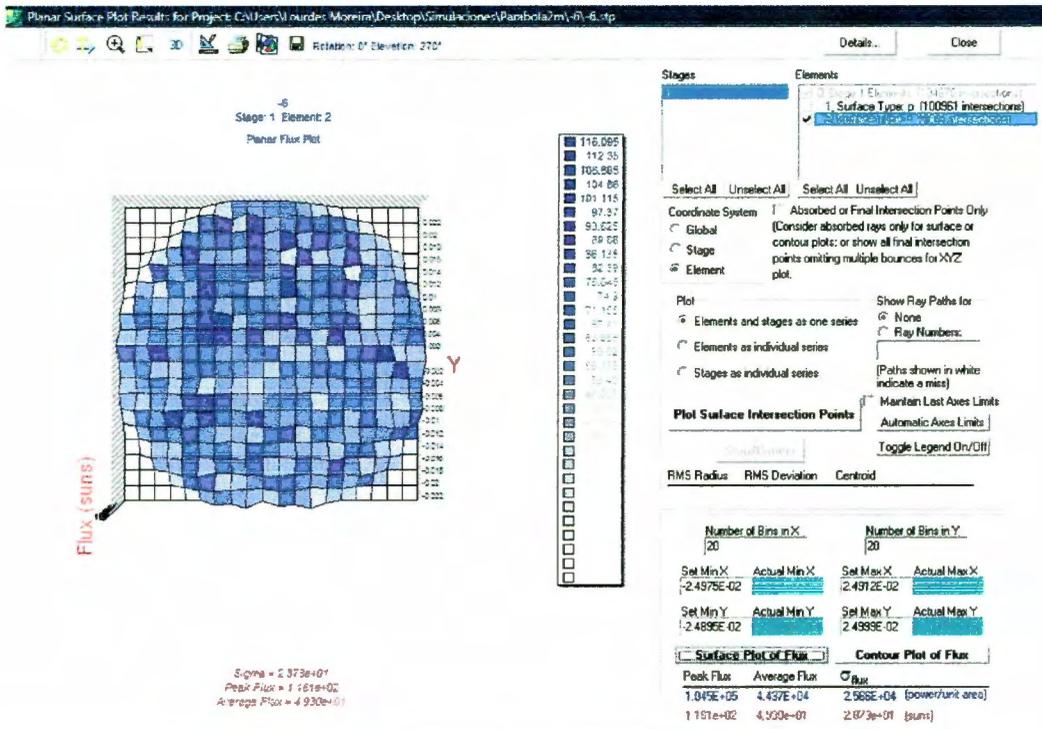
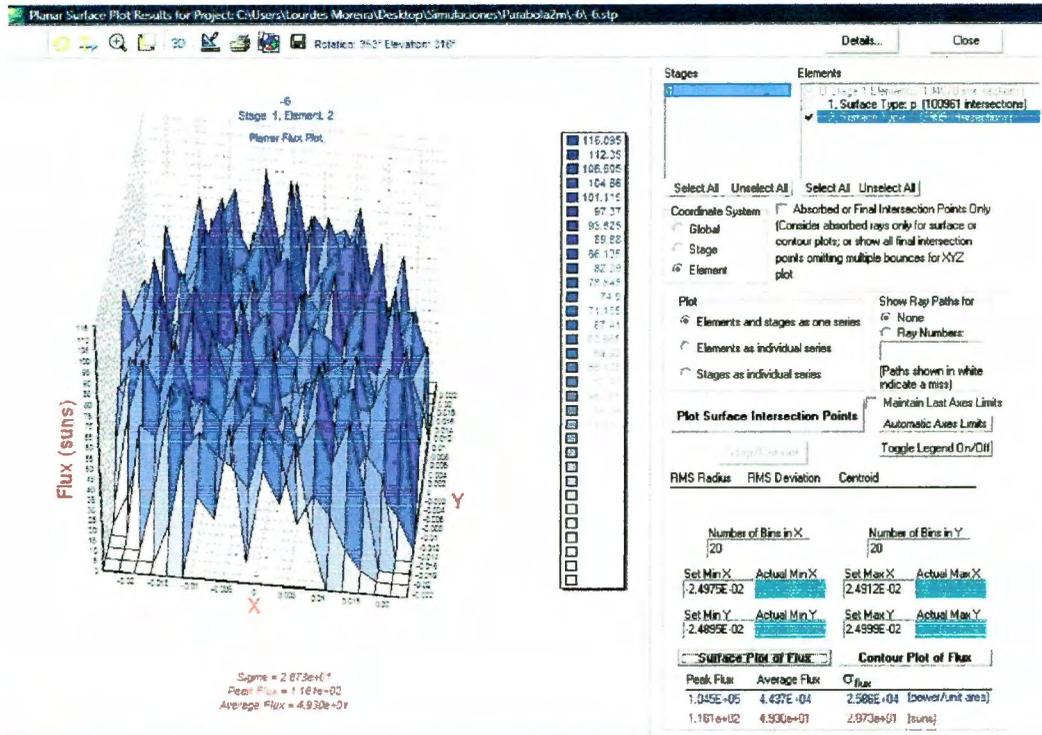


2. PARABOLOIDE DE 2M

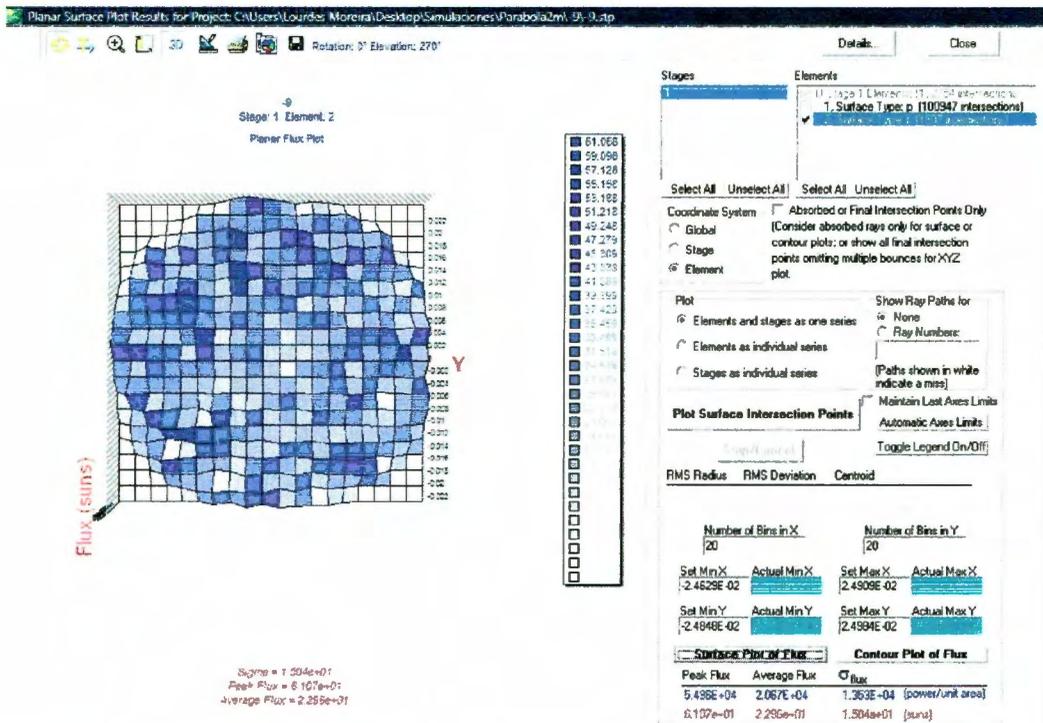
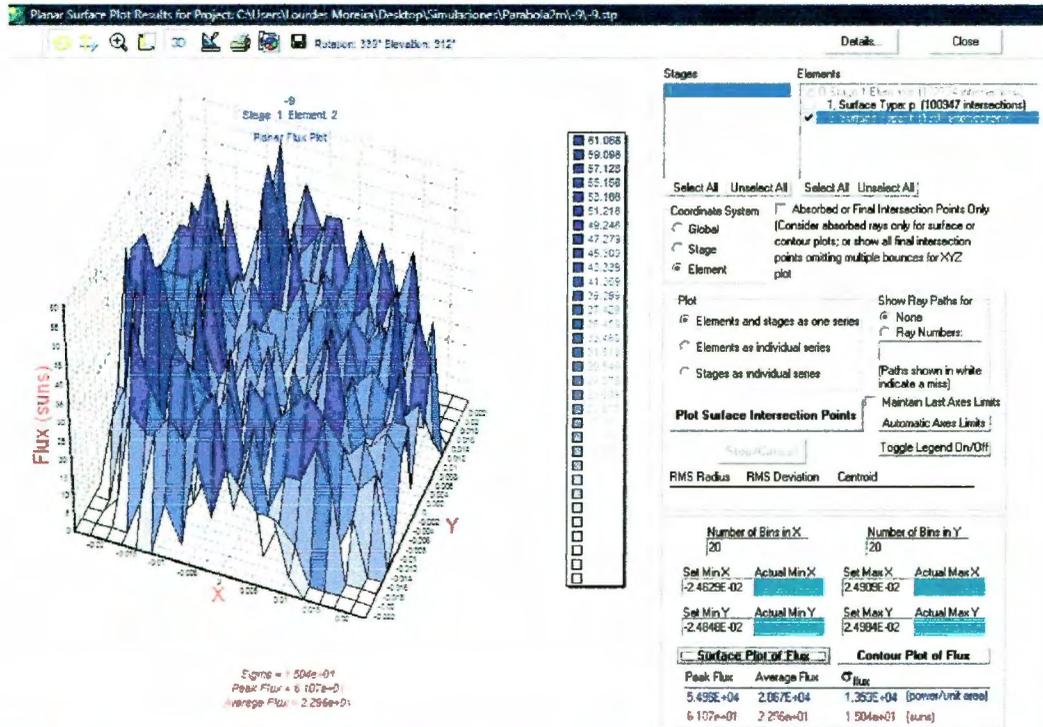
Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra 3cm lejos del foco (coordenada -z):



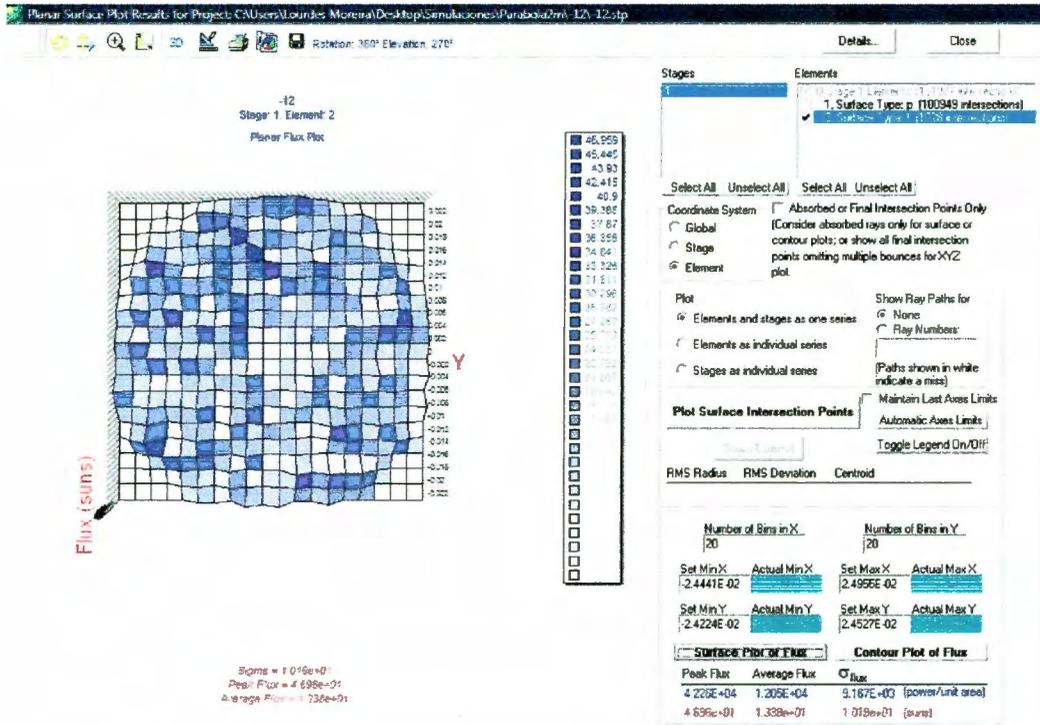
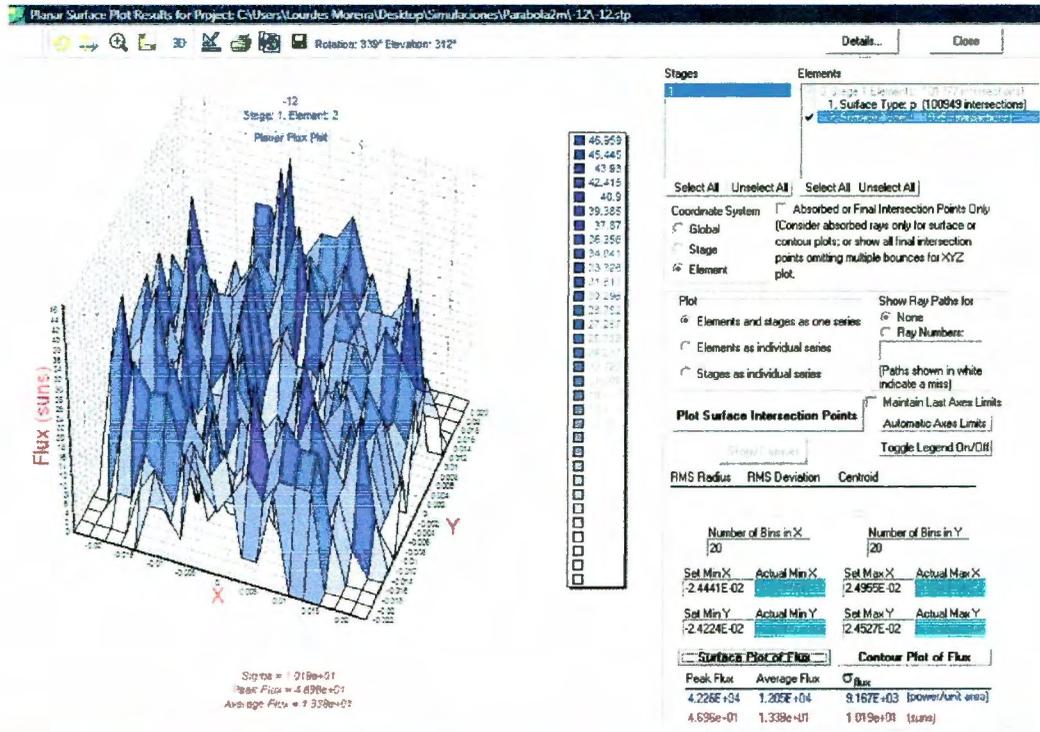
Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra 6cm lejos del foco (coordenada -z):



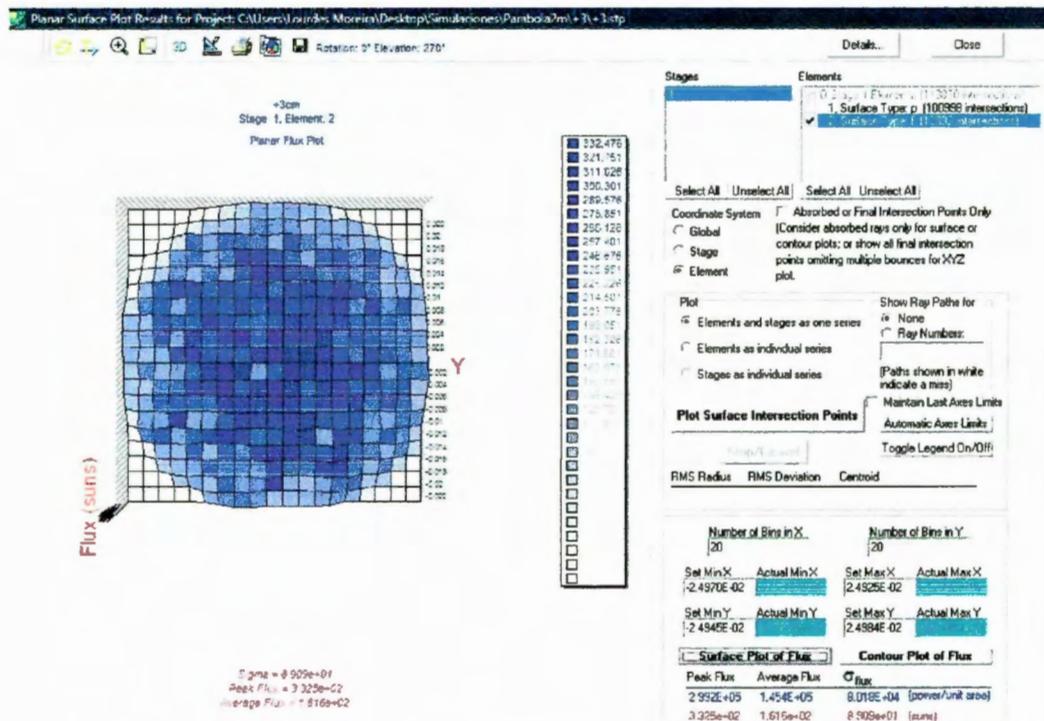
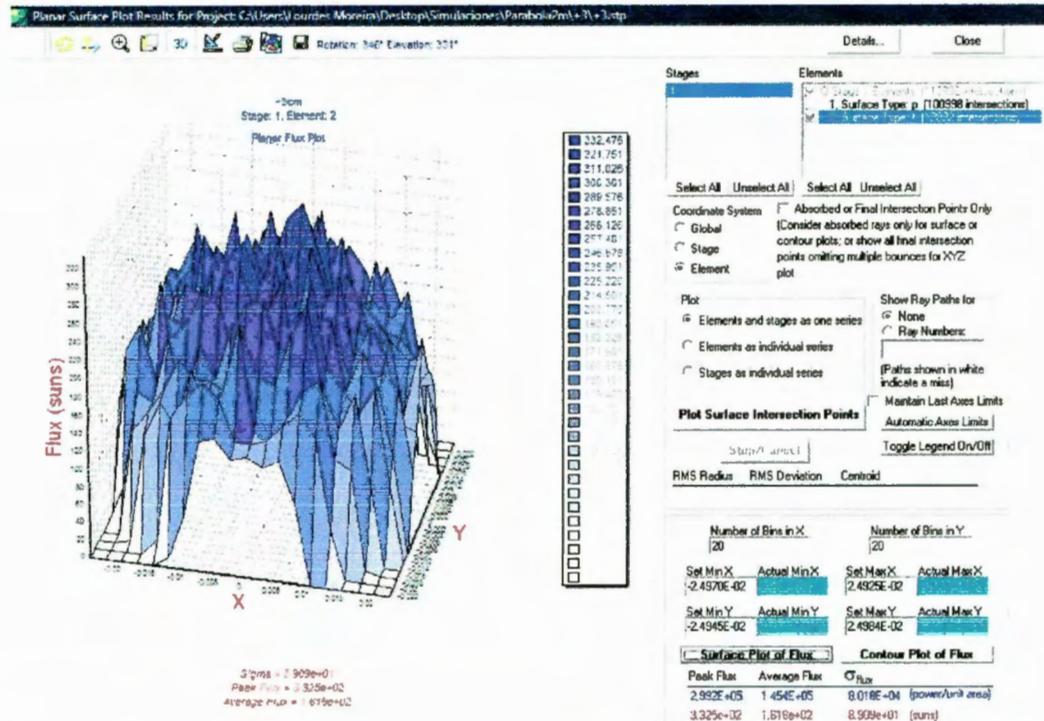
Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra 9cm lejos del foco (coordenada -z):



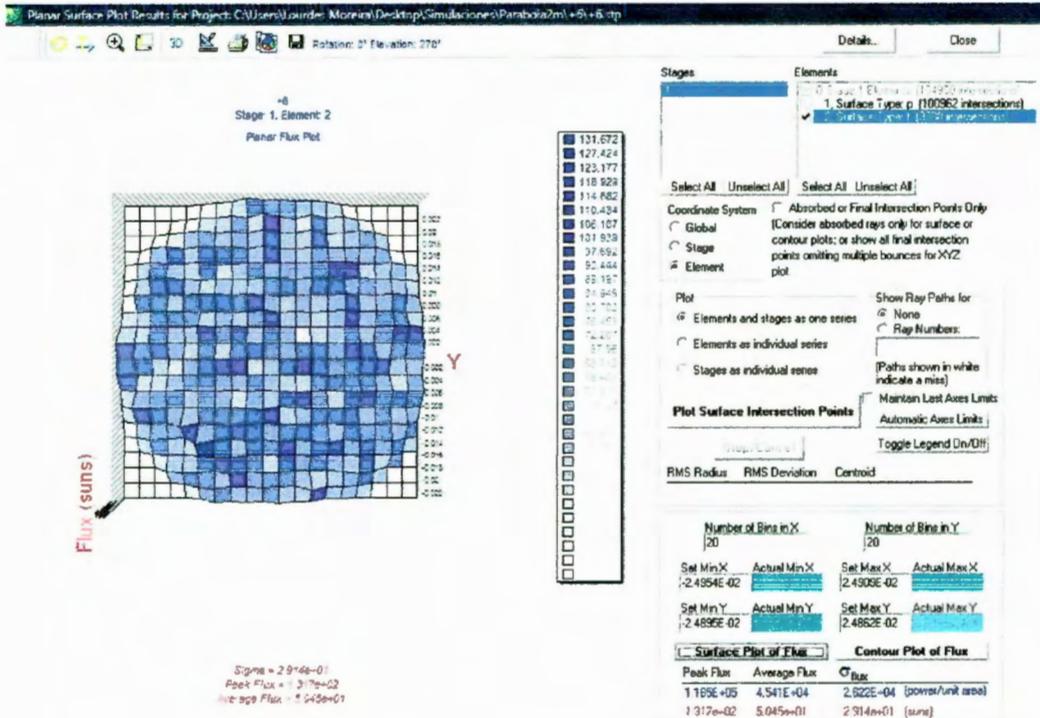
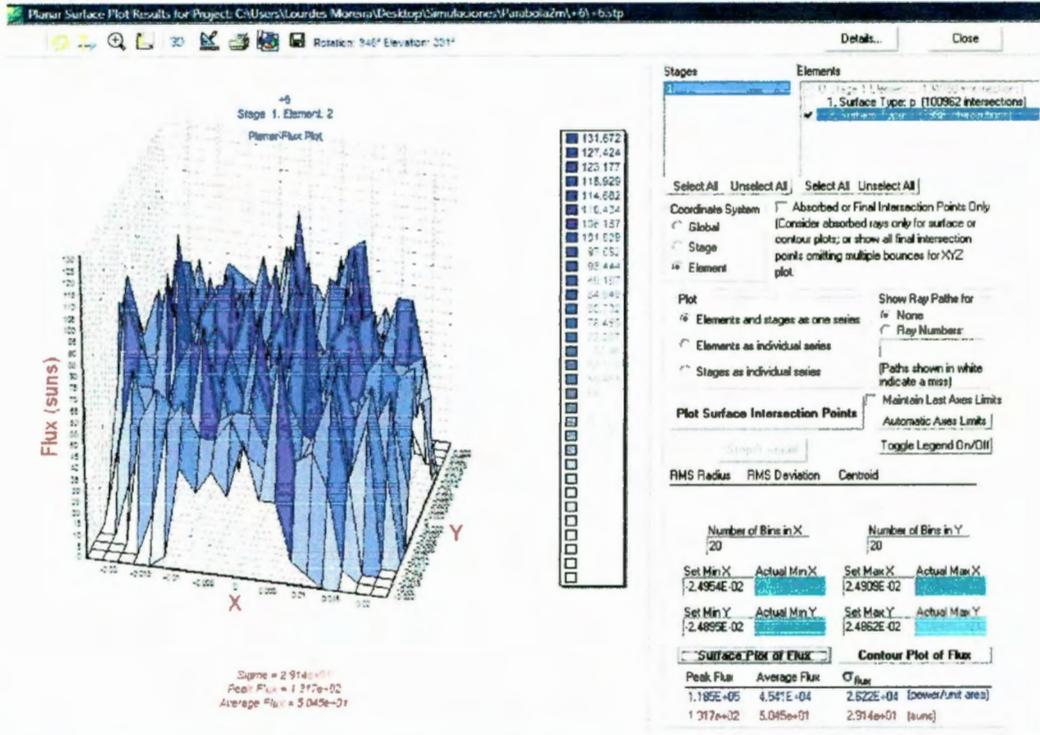
Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra 12cm lejos del foco (coordenada -z):



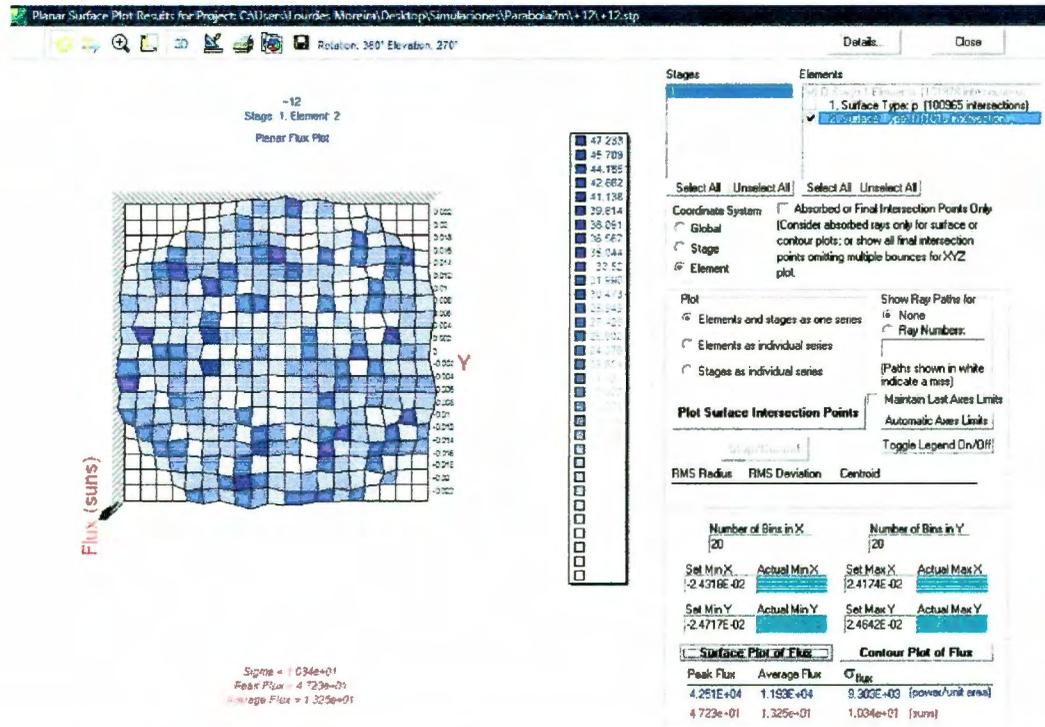
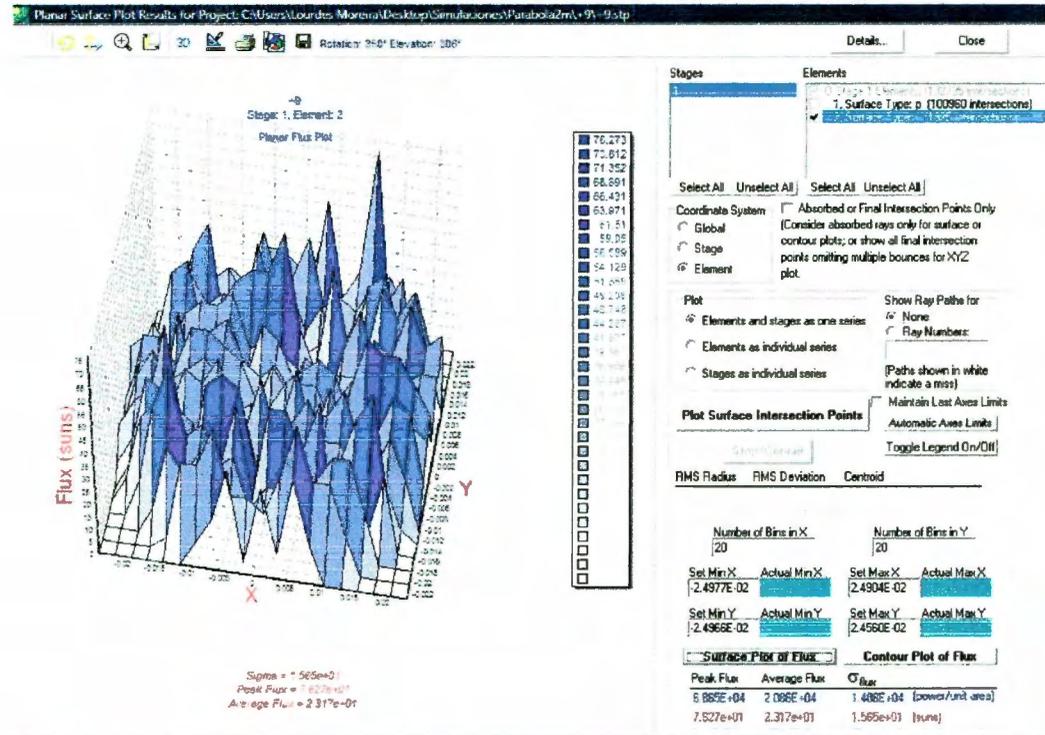
Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra 3cm lejos del foco (coordenada +z):



Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra 6cm lejos del foco (coordenada +z):



Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra 9cm lejos del foco (coordenada +z):



Flujo resultante en el receptor cuando éste se encuentra 12cm lejos del foco (coordenada +z):

