



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**ANÁLISIS DEL FLUJO ENERGÉTICO 3D EN COLECTORES  
CONCENTRADORES SOLARES DE DIVERSAS GEOMETRÍAS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**RODRIGO EDUARDO MEDINA CARRASCO**

**PROFESOR GUÍA:  
ROBERTO ROMÁN LATORRE**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ  
RODRIGO PALMA BEHNKE**

**SANTIAGO DE CHILE  
NOVIEMBRE 2010**

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: RODRIGO MEDINA C.  
FECHA: 08/11/2010  
PROF. GUIA: Sr. ROBERTO ROMÁN L.

## **“ANÁLISIS DEL FLUJO ENERGÉTICO 3D EN COLECTORES CONCENTRADORES SOLARES DE DIVERSAS GEOMETRÍAS”**

El objetivo general del presente trabajo de título, fue la creación de un software de trazado de rayos para realizar un análisis del flujo energético captado por colectores concentradores catóptricos, de geometrías definidas, desde el punto de vista óptico - geométrico.

Se utilizó una técnica computacional de trazado de rayos aleatorios, tipo Monte Carlo, para analizar la distribución del flujo energético generado por los colectores concentradores. Este flujo energético se analizó en torno a la variable más relevante de los sistemas concentradores: el factor de concentración de flujo.

Se abarcaron geometrías estándar y otras más innovadoras, a través de un programa modular y flexible diseñado en Matlab, el cual permite una utilización sencilla para el usuario, y cuenta con la funcionalidad de guardar los resultados de las simulaciones llevadas a cabo en planillas de datos Excel y en tres formatos de imagen, lo cual facilita un post análisis.

Los resultados obtenidos fueron validados analíticamente para cada uno de los colectores concentradores considerados, obteniéndose resultados satisfactorios, de acuerdo a las hipótesis planteadas y a los resultados entregados por la literatura. Además se verificó la integridad del software diseñado sometiénolo a diferentes pruebas de funcionamiento.

Se concluye que el software creado constituye una poderosa herramienta de evaluación para los sistemas concentradores estudiados, el cual permite calcular a priori, diversas aberraciones ópticas que pudiesen afectar el desempeño final de los mismos. Se recomienda finalmente la extensión de las funcionalidades del software, con el fin de poder analizar más geometrías, y agregarle modelos termodinámicos, para realizar en conjunto análisis de tipo ópticos y térmicos.

## Agradecimientos

---

Al finalizar esta importante etapa de mi vida, quisiera agradecer a muchas de las personas que hicieron que este tiempo no sólo fuera un camino de crecimiento, sino que también estuviese lleno de incontables momentos de gran felicidad. Me refiero a todas las personas que me han entregado cariño, ayuda, apoyo, sabiduría y alegría a lo largo de este y otros períodos.

Termino esta etapa orgulloso, por haber logrado mis objetivos y a la vez humildemente al tener en cuenta que este triunfo no es sólo mío, sino que de todos los que estuvieron a mi alrededor apoyándome de una u otra forma.

Agradezco en forma especial a mis padres, por entregarme todo lo que necesité para lograr llegar a este punto; A mi familia, por estar desde siempre ahí para mí; A mis amigos, con los cuales viví pasajes inolvidables, llenos de risas y anécdotas; A la familia Leiva Quezada, los cuales me han acogido como un hijo más y a mi polola Viviana, el Sol que me irradia amor y que me inunda de felicidad.

Finalmente, doy las gracias a René Carrasco, el cual me enseñó a ser por sobre todo, un buen ser humano, capaz de afrontar la vida y sus problemas con fuerza, corazón, humildad y con verdadera alegría a pesar de lo difícil que se pueda tornar. Descansa en paz tatita. Te quiero y se te extraña mucho.

## Tabla de Contenido

---

1.	Introducción.....	7
1.1	Planteamiento General.....	8
1.2	Objetivos.....	10
1.3	Alcances y limitaciones.....	11
2.	Antecedentes.....	12
2.1	Uso de la energía solar en sistemas con concentración.....	12
2.1.1	Breve historia.....	12
2.2	Clasificación de los concentradores solares.....	13
2.2.1	De acuerdo a la superficie reflectora.....	13
2.2.2	Según la Naturaleza de la Concentración.....	14
2.2.3	De acuerdo al tipo de concentración.....	16
2.3	Características físicas de los concentradores solares.....	17
3.	Análisis Teórico de la concentración.....	19
3.1	Definiciones Básicas.....	19
3.1.1	Diámetro aparente del sol.....	19
3.1.2	Luminancia del disco solar.....	19
3.1.3	Ley de Snell, principios de reflexión y refracción.....	21
3.1.4	Reflexión especular y reflexión difusa.....	21
3.2	Análisis Básico de la concentración.....	22
3.2.1	Limite teórico de la concentración.....	23
3.2.2	Temperatura limite de operación.....	24
3.2.3	Dispersión de la imagen.....	25
3.3	Óptica del concentrador solar.....	26
3.3.1	Eficiencia del sistema concentrador.....	28
3.3.2	Factor de concentración ideal.....	28
3.3.3	Factor de concentración geométrico.....	28
3.3.4	Factor de concentración de flujo.....	29
3.3.5	Insolación total.....	29
3.3.6	Eficiencia de radiación directa.....	29
3.3.7	Errores o aberraciones ópticas.....	29
3.4	Análisis energético del concentrador solar.....	34
3.5	Métodos de análisis del flujo en la zona focal.....	35
3.5.1	Directos.....	36
3.5.2	Indirectos.....	37
3.5.3	Analíticos.....	38
3.5.4	Numéricos.....	40
3.6	Trazado de rayos.....	40
3.6.1	Estado del arte.....	41
3.6.2	Principios básicos para implementar un método de trazado de rayos.....	43
4.	Desarrollo.....	47
4.1	Descripción del Programa.....	47
4.1.1	Hipótesis.....	48

4.1.2	Alcances.....	48
4.2	Estructura externa del Programa.....	49
4.2.1	Selección del concentrador.....	51
4.2.2	Ingreso de parámetros Rayos.....	51
4.2.3	Ingreso de parámetros Concentrador.....	54
4.2.4	Ingreso de parámetros Receptor.....	57
4.2.5	Opciones adicionales para trazado de Rayos.....	58
4.2.6	Ejecución de trazado de Rayos.....	58
4.2.7	Ingreso de parámetros para análisis energético.....	59
4.2.8	Opciones de visualización para Análisis energético.....	59
4.2.9	Ejecución de Análisis energético.....	59
4.2.10	Opción de guardar datos.....	60
4.2.11	Finalización de programa.....	61
4.3	Estructura interna del programa.....	61
4.3.1	Creación de interfaz gráfica de usuario.....	64
4.3.2	Ejecución de trazado de rayos por usuario.....	64
4.3.3	Cálculo de plano de lanzamiento.....	64
4.3.4	Creación de gráficos 3D par concentrador – receptor.....	66
4.3.5	Variables para contabilización energética.....	69
4.4	Motor de creación de conos solares.....	69
4.4.1	División del disco solar en secciones de igual área.....	70
4.4.2	Creación de matriz con vectores dirección subrayos.....	71
4.4.3	Cálculo de energía según área dentro del disco solar asignada.....	74
4.4.4	Creación de matriz con energía asignada a cada subrayo.....	75
4.5	Motor de trazado de rayos.....	75
4.5.1	Cálculo de intersección Rayo – Concentrador.....	78
4.5.2	Cálculo de intersección Rayo – Receptor.....	79
4.5.3	Evaluación de intersecciones.....	79
4.5.4	Trazado de rayos.....	80
4.6	Motor de análisis energético.....	81
4.6.1	Creación de Matriz malla energética y asignación de energía.....	82
4.6.2	Cálculo de índices generales de concentración.....	83
4.6.3	Cálculo de índices de concentración en cada sector de malla.....	83
5.	Verificación y Validación del programa.....	85
5.1	Verificación punto a punto.....	85
5.1.1	Verificación de construcción de concentradores y receptores.....	85
5.1.2	Verificación de congruencia de rayos y conos de luz.....	86
5.1.3	Verificación de intersecciones y rebotes de rayos.....	87
5.1.4	Verificación de gráficos de distribución energética.....	88
5.1.5	Verificación de errores de programación.....	88
5.2	Validación con casos seleccionados.....	89
5.2.1	Validación utilizando Concentrador Cilindro Parabólico.....	91
5.2.2	Validación utilizando Concentrador de Casquete Hemisférico.....	92
5.2.3	Validación utilizando Concentrador Paraboloides de Revolución.....	93
5.2.4	Validación utilizando Concentrador Cónico.....	93
5.2.5	Validación utilizando Concentrador Parabólico Compuesto Bidimensional.....	94
5.2.6	Validación utilizando Concentrador Parabólico Compuesto Tridimensional.....	95
5.2.7	Discusión de resultados obtenidos.....	96

5.3	Validación de distribución de concentraciones en superficie receptora .....	96
6.	Conclusiones.....	98
6.1	Conclusiones Generales .....	98
6.2	Conclusiones de resultados obtenidos por el programa.....	99
6.3	Proyecciones y mejoras recomendadas al programa .....	100
7.	Referencias .....	101

**ANEXOS DIGITALES: TABLA DE CONTENIDO CD-ROM**

A.	Carpeta con software ejecutable.....	\EXE
B.	Carpeta lista para compilar.....	\extension
C.	Carpeta código de funciones software.....	\funciones
D.	Carpeta de instalación.....	\instalar
E.	Carpeta código de motores de ejecución de Trazado y Análisis.....	\motores

## Introducción

---

Chile y en especial el norte de Chile, por su privilegiada climatología, se ve particularmente favorecido para el uso de energía solar. Esta energía puede aprovecharse directamente, o bien ser convertida en otras formas útiles como electricidad o energía térmica. La energía solar se puede aprovechar de diversas formas, entre las que destacan las aplicaciones fotovoltaicas (celdas solares para conversión a energía eléctrica) y sistemas colectores concentradores para aplicaciones térmicas.

Los sistemas con concentración solar, al tener un área receptora menor que el área de apertura, poseen la ventaja de poder trabajar con mayores flujos de energía solar y por ende a mayor temperatura. Sin embargo, también poseen desventajas, la más fundamental, es su nula o casi nula capacidad de captar radiación difusa. Esto no es un problema en el norte de Chile, donde la mayoría de la radiación global solar que cae es de tipo directa.

Dentro de los sistemas con concentración solar, existen 3 grandes familias: Los dióptricos, los catóptricos y los catadióptricos. Los primeros se caracterizan por usar refracción de lentes para concentrar la energía, los segundos utilizan espejos y los terceros son una mezcla entre los dióptricos y los catóptricos.

Existe además otra subclasificación de los sistemas concentradores solares: los concentradores con imagen y sin imagen. Los con imagen superponen el sol en el área focal receptora y los sin imagen, utilizan reflexiones sucesivas del sol para llegar hasta el receptor.

En este trabajo de memoria, se estudiarán solamente sistemas con concentración tipo catóptricos, dadas las ventajas en cuanto al coste y simplicidad de construcción de estos concentradores en relación a los dióptricos, ya que utilizan espejos para la reflexión y receptores más pequeños, que concentran la misma cantidad de energía que un concentrador plano.

Para determinar las características de un colector es necesario un estudio de la eficiencia, comportamiento y operación de éste. Existen varios métodos de análisis, los cuales se clasifican en fotométricos, calorimétricos, analíticos y numéricos. Entre los métodos numéricos, destaca el trazado de rayos, "ray tracing", que se utilizará en el desarrollo del trabajo de memoria. Éste método se basa en el seguimiento de rayos dentro del colector solar, calculando el aporte energético individual de cada rayo. Este método posee ventajas, ya que permite estudiar colectores con geometrías complejas, analizarlos en casi cualquier estado de insolación y permite conocer las características de estos antes de su construcción, pudiendo así, determinar modificaciones a bajo costo. También este método permite estudiar qué ocurre cuando el reflector no está perfectamente orientado hacia el sol.

En memorias anteriores, los rayos fueron lanzados en forma de barridos ordenados. En este trabajo se creará un programa que analice colectores con concentradores en tres

dimensiones, utilizando un método estadístico tipo Monte Carlo para la generación de rayos aleatorios y que muestre el flujo energético hacia el receptor. El sistema aleatorio de generación de rayos, permitirá una distribución en la cual no se privilegie ciertos sectores, tanto del sol como fuente emisora de energía y del receptor, eliminando los errores sistemáticos que se podrían inducir por el uso de un sistema de barrido ordenado.

Se pretende que el programa desarrollado, constituya una potente herramienta dada su naturaleza numérica, con lo cual se podrán estudiar gran cantidad de casos, en comparación a los que se pueden estudiar por métodos analíticos, ya que por lo general, estos permiten estudiar solo situaciones ideales y que entregue valores de acuerdo a los métodos físicos. Para esto, se implementará el programa en el software Matlab, debido a su capacidad de graficar en 3 dimensiones, su amplio uso en el mundo científico y la modularidad de este. Se abarcarán un significativo número de geometrías conocidas y usualmente utilizadas. El programa no admitirá o no estará pensado para que el usuario defina una geometría no especificada de forma automática, ya que cada geometría implica una manera de interacción específica con los rayos modelados, la cual debe ser resuelta para cada caso.

## **1.1 *Planteamiento General***

Hoy en día la utilización de energía solar como alternativa a las fuentes convencionales de generación, es un hecho. Numerosos países del globo han incursionado en el uso y explotación del recurso solar, tanto para uso doméstico como para generación de potencia, sin embargo la cantidad de energía generada por este medio, aún sigue siendo una pequeña fracción en comparación a la que se genera a través de combustibles fósiles. A pesar de este irrefutable hecho, la inversión en este tipo de tecnologías es cada vez mayor, ya que las reservas de combustibles fósiles tienen una vida limitada y tarde o temprano deberán ser reemplazadas por otras formas de generación.

Esta vida limitada no es de estimación simple. Es difícil hacer este cálculo porque depende de muchas variables desconocidas. No se sabe cuántos depósitos nuevos se van a descubrir. Tampoco cual va a ser el ritmo de consumo, porque es probable que cuando vayan escaseando y sus precios suban se busque con más empeño otras fuentes alternativas de energía y su ritmo de consumo disminuya. Por esto las cifras que se suelen dar son muy poco fiables. En 1970 había reservas conocidas de petróleo para unos 30 años (hasta el año 2000) y de gas natural para unos 40 años. En cambio en 1990 había suficientes depósitos localizados de petróleo para otros 40 años (hasta el 2030) y de gas natural para unos 60 años; es decir, en estos años se ha descubierto más de lo que se ha consumido. Por todo esto se puede decir que hay reservas para un tiempo comprendido entre varias decenas y unos 100 años.

Chile particularmente, posee en el norte grande una de las zonas con mayor radiación solar en el mundo, con mejor índice de transparencia<sup>1</sup> y porcentaje de horas de sol, por lo que en este amplio sector, las condiciones son ideales para generar energía a través del sol.

Así mismo, las demandas energéticas de todo Chile podrían ser hoy en día cubiertas con la instalación de plantas energéticas solares en esta zona[1], sin embargo existen aún muchas trabas para la implementación de este tipo de tecnología:

a) Costos:

Los costos de generación de energías renovables han ido bajando paulatinamente y ya son competitivos con los métodos tradicionales de petróleo o gas natural. Principalmente las plantas solares han alcanzado un alto grado de competitividad en comparación a años anteriores, cuando el precio era bastante más elevado que las hidroeléctricas, por ejemplo. Esto se debe en gran medida al alza de los combustibles tradicionales, pero cabe destacar la baja en el precio de las ERNC, que se han posicionado como una alternativa viable dentro del punto de vista económico.

Las proyecciones energéticas más certeras hablan de que si China e India logran aplicar positivamente las políticas de eficiencia energética que están implementando hoy, van a duplicar su consumo de aquí al 2030; si no fuesen efectivas, triplicarían. Considerando la posibilidad que los precios de combustibles tradicionales sigan subiendo, la decisión de involucrarse en energía solar para producción de energía eléctrica podría traer beneficios en alrededor de cinco años o más, pero el escenario actual sigue posicionando a las energías renovables como una alternativa cara en comparación a los combustibles fósiles.

b) Mediciones certeras y precisas de radiación directa:

Lo importante de este tipo de tecnologías es que concentran la radiación solar, por lo que funcionan solamente con radiación solar directa (rayos del sol), es decir, deben instalarse en zonas de escasa nubosidad. El Desierto de Atacama presenta condiciones ideales para la instalación de estos sistemas, pero no hay mediciones detalladas de radiación solar directa en la zona. Para diseñar un sistema de este tipo, el primer paso es la medición, luego el cálculo del nivel de concentración y posteriormente al diseño de los concentradores requeridos, pero hoy no existen datos duros, salvo mediciones realizadas por privados.

c) Suministro energético no constante:

---

<sup>1</sup> El índice de transparencia se define como el cociente entre la insolación promedio en un plano horizontal y la radiación incidente sobre el mismo en ausencia de atmósfera

Uno de los grandes problemas que presentan las plantas de energía solar es que si no hay sol, éstas no generan. Es entre las 12 del día y las 14 horas cuando hay mayor radiación solar, pero no es el momento cuando se requiere más electricidad. La hora peak es entre las 18 y 23 horas, pero en ese período el sol ya se ha puesto.

Es necesario acoplar bien la generación con la demanda y no pensarlos como sistemas aislados. Al no producir energía, entran en combinación con los sistemas tradicionales a través del Sistema Interconectado, ya que no puedes pedirle más a una central eólica o solar si no tienes viento o radiación. Lo importante son estas horas de desfase entre la cantidad máxima de energía solar que hay en algún momento del día, con la alta necesidad que se produce en la tarde. Hay sistemas de acumulación a través de aceite caliente y con fundición de sal, pero ambos no están completamente desarrollados.

La política chilena recién comienza a considerar con mayor relevancia la seguridad energética. La variable de seguridad de suministro ha tomado gran importancia, alcanzando un lugar similar al de nivel de costos. No se puede contar con energía barata que no sea segura, y si bien la energía solar es más cara que las tradicionales, la probabilidad de que el sol siga brillando es altísima y más segura que una posible baja en los combustibles tradicionales.

Por todo lo anterior, el diseño de herramientas que ayuden y promuevan el desarrollo de la energía solar, es de gran importancia, pues tarde o temprano será una alternativa potente, dadas las proyecciones actuales de consumo y reservas energéticas.

## **1.2 Objetivos**

El objetivo fundamental del trabajo, es desarrollar un software computacional, para el estudio tridimensional del flujo energético captado por colectores concentradores solares catóptricos, de geometrías definidas.

Los siguientes objetivos específicos son requeridos para lograr el objetivo principal:

- a) Realizar estudio bibliográfico sobre la concentración solar, los concentradores en general y los métodos utilizados para medir la energía que concentran, entre éstos el método de trazado de rayos.
- b) Diseñar un método de trazado de rayos tridimensional en Matlab, utilizando un método aleatorio de tipo Montecarlo.
- c) Programar el método desarrollado en un software modular y flexible, que permita realizar una estimación cualitativa y cuantitativa en torno a las variables geométricas que inciden, en la cantidad de energía captada de los colectores revisados.

d) Entregar información en forma de imágenes que muestre de forma clara la distribución del flujo energético y tablas con el flujo calculado.

### **1.3 Alcances y limitaciones**

a) El programa puede realizar el trazado de rayos sólo para 6 tipos de concentradores solares junto con 6 receptores asociados.

b) No es capaz de recibir cualquier tipo de geometría y analizarla directamente. Para lograr analizar una nueva geometría es necesario programar funciones que resuelvan la interacción Rayo-Superficie de manera satisfactoria, parametrizar y luego utilizar el algoritmo base del Motor de trazado de Rayos.

c) El tiempo de ejecución de cada simulación depende del CPU utilizado y de la cantidad de rayos simulados. Este tiempo varía en forma lineal con respecto a la cantidad de rayos trazados.

## **2. Antecedentes**

---

### **2.1 *Uso de la energía solar en sistemas con concentración***

#### **2.1.1 Breve historia**

La luz del sol concentrada ha sido utilizada a partir del tiempo de la antigua Grecia. Una leyenda sostiene que Arquímedes utilizó "un cristal ardiente" para concentrar la luz del sol en la flota Romana invasora y expulsarlos de de Siracusa. En 1973 un científico griego, el Doctor Ioannis Sakkas, curioso sobre si Arquímedes realmente podría haber destruido la flota romana en 212 a.C. alineó a casi 60 marineros griegos, cada uno sosteniendo un espejo oblongo inclinado para coger los rayos del Sol y dirigirlos en una silueta de madera contrachapada cubierta por alquitrán de 160 pies de distancia. El barco prendió fuego después de unos minutos; sin embargo, los historiadores siguen dudando de la historia de Arquímedes.

En 1866, Auguste Mouchout usó una artesa parabólica para producir vapor para el primer motor solar de vapor. La primera patente para un Colector Solar fue obtenida por el Italiano Alejandro Battaglia, en Génova, Italia, en 1886. Durante los años siguientes, inventores como John Ericsson y Frank Shuman desarrollaron dispositivos concentradores de energía solar para irrigación, refrigeración, y locomoción. En 1913 Shuman completó la construcción de una estación de energía solar parabólica de 55HP en Meadi, Egipto para la irrigación. Otro genovés, Profesor Giovanni Francia (1911-1980), diseñó y construyó la primera planta solar de concentración solar la cual entró en operación en Santilario, cerca de Génova, Italia en 1968. Esta planta tenía la arquitectura de plantas solares concentradoras actuales con un receptor solar en el centro de un campo de colectores solares. La planta fue capaz de producir 50kW con el vapor sobrecalentado a 100 bar y 500 grados Celsius.

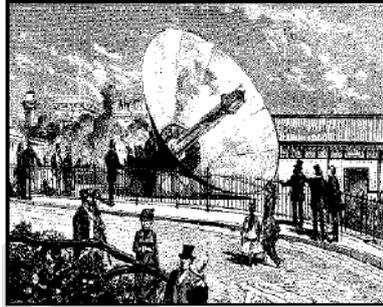
Luego en California del Sur, Estado Unidos, en 1981 se desarrolló una planta de energía solar con concentración del tipo torre, la "Solar One", de 10 MW. Pero la tecnología de concentración parabólica de los Sistemas de Generación de Energía Solar (SEGS), comenzada en 1984, resultó ser más realizable. Con 354MW, SEGS es todavía la planta de energía solar más grande en el mundo.

España sin embargo, ha desarrollado en este último tiempo varias plantas de concentración, con una potencia total instalada a la fecha de 332MW y actualmente en construcción plantas con capacidades nominales totales de 1900MW<sup>2</sup>, lo cual situará a este país como líder mundial en generación solar.

---

<sup>2</sup> Asociación Española de la Industria Solar Termoeléctrica: <http://www.protermosolar.com/>

Motor solar de Mouchot en la  
Exposición Universal de Paris (1861)



Primer captador cilindro-parabólico construido  
por Shuman en El Cairo en 1912 (62m x 4m)

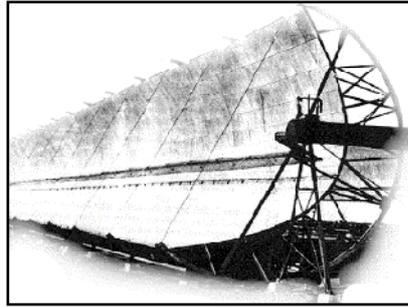


Figura 1: Sistemas concentradores pioneros.<sup>3</sup>

## 2.2 Clasificación de los concentradores solares

Existen diversas maneras de clasificar los sistemas de concentración solar, las siguientes son las más empleadas y comprenden a todos los sistemas utilizados en la actualidad:

### 2.2.1 De acuerdo a la superficie reflectora

#### a) Concentradores bi-dimensionales o lineales:

La concentración en dos dimensiones, corresponde a aquella en que la superficie reflectora posee curvatura con respecto a un solo eje. El foco de estos concentradores es lineal. Ejemplo de este tipo de concentradores son, CPC y cilindro parabólico, entre otros (Figura 2).



Figura 2: Concentrador bi-dimensional o lineal<sup>4</sup>

---

<sup>3</sup> Fuente: Presentación “Introducción a la energía solar térmica” Dr. Marcelino Sanchez.

<sup>4</sup> Fuente: <http://www.solartermica.net/concentradores-solares>

b) *Concentradores tri-dimensionales:*

Las superficies reflectoras poseen curvatura con respecto a dos ejes ortogonales. Por lo general, el foco de este tipo de concentradores es puntual. Entre estos concentradores, tenemos a los de tipo paraboloidal y casquete hemisférico, entre los más utilizados (Figura 3).



Figura 3: Concentrador tridimensional puntual<sup>5</sup>

## 2.2.2 Según la Naturaleza de la Concentración

a) *Catópticos:*

Se basan en la concentración mediante la reflexión de los rayos solares sobre espejos; entre los más utilizados, están los de tipo plano y curvos, estos últimos con geometría cilíndrica o esférica. La concentración puede ser directa al captor, o hacia una segunda superficie reflectora (Figura 4).



Figura 4: Concentrador catóptico<sup>6</sup>

---

<sup>5</sup> Fuente: [http://www.solarnavigator.net/solar\\_power.htm](http://www.solarnavigator.net/solar_power.htm)

<sup>6</sup> Fuente: <http://www.overpass.co.za/solar-products.htm>

b) Dióptricos:

Se basan en la concentración de los rayos solares a través de su refracción en lentes, los más utilizados son los de tipo Fresnel y lente convexo (Figura 5).

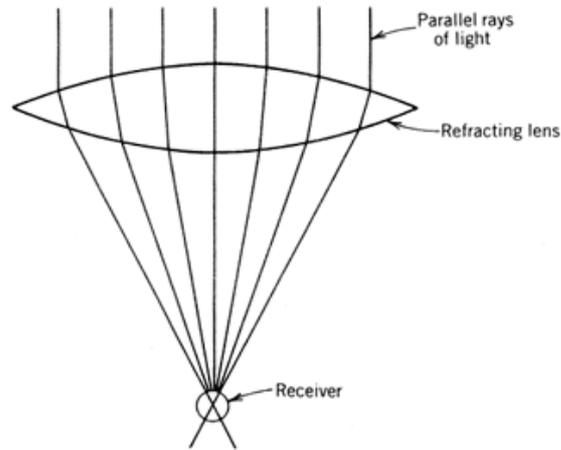


Figura 5: Concentradores Dióptricos<sup>7</sup>

c) Catadióptricos:

Estos sistemas, concentran los rayos solares mediante una combinación de reflexión y refracción de estos a través de sistemas de espejos y lentes especialmente concebidos para este efecto. (Figura 6).

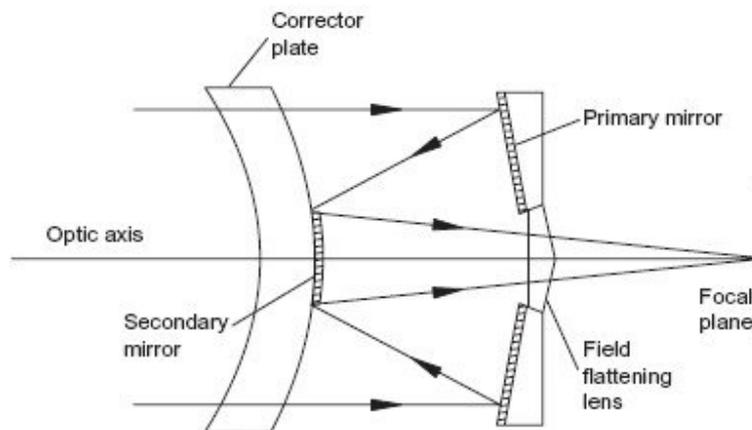


Figura 6: Concentradores Catadióptricos<sup>8</sup>

<sup>7</sup> Fuente: <http://www.powerfromthesun.net>

<sup>8</sup> Fuente: <http://www.answers.com/topic/catadioptric>

### 2.2.3 De acuerdo al tipo de concentración

#### a) Con imagen:

Son aquellos sistemas en que el foco de la superficie reflectora está definido como una superposición de imágenes del sol:

- i. **Foco puntual:** Casquetes hemisféricos, paraboloides, Fresnel. (Figura 7)

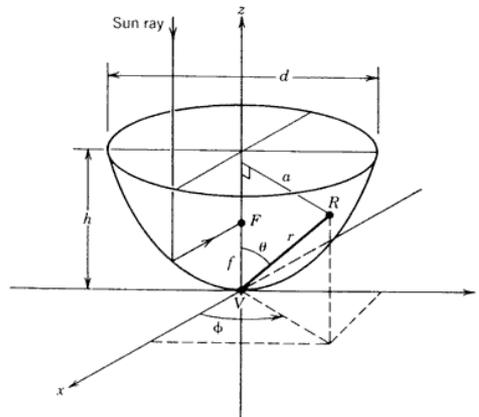


Figura 7: Concentradores con Foco Puntual<sup>9</sup>

- ii. **Foco lineal:** Entre estos se tiene a los cilindros parabólicos, cónicos, etc. (Figura 8).

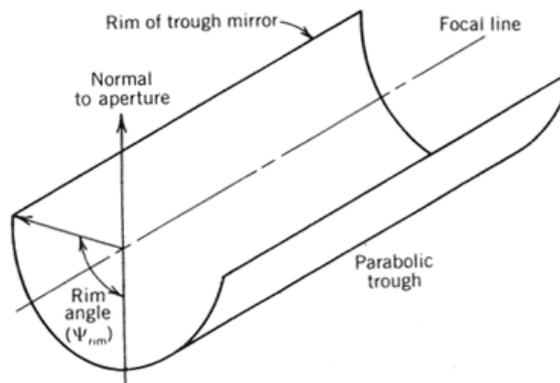


Figura 8: Concentradores con Foco Lineal<sup>10</sup>

<sup>9</sup> Fuente: <http://www.powerfromthesun.net/Chapter8/Chapter8new.htm>

<sup>10</sup> Fuente: <http://www.powerfromthesun.net/Chapter8/Chapter8new.htm>

b) Sin imagen:

En estas superficies reflectoras, los rayos reflejados no convergen hacia su foco, como los CPC puntuales y CPC lineales. (Figura 9)

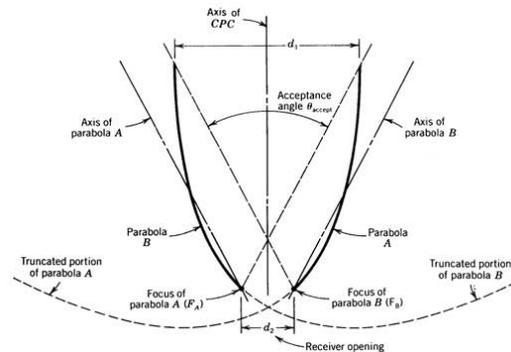


Figura 9: Concentrador Sin Imagen<sup>11</sup>

### 2.3 Características físicas de los concentradores solares

A continuación se enumeran y describen las partes que constituyen un sistema de concentración solar tipo paraboloide (Figura 10).

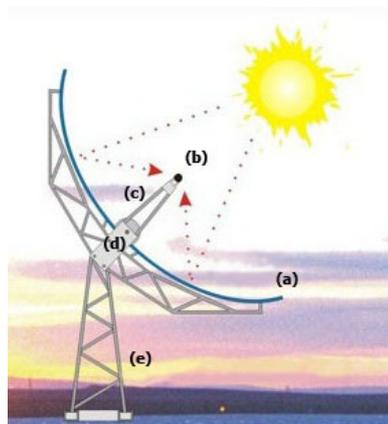


Figura 10: Partes Constitutivas de un Concentrador Solar<sup>12</sup>

a) *Superficie Reflectora:*

Es uno de los dos elementos principales del sistema de concentración. Tiene la función de reflejar los rayos luminosos y producto de su forma geométrica, producir su concentración en una zona denominada mancha focal, donde se coloca la superficie absorbente (receptor).

<sup>11</sup> Fuente: <http://www.powerfromthesun.net/Chapter9/Chapter9new.htm>

<sup>12</sup> Fuente: <http://www.solartronenergy.com/>

b) *Absorbente:*

Es el segundo elemento esencial del sistema de concentración, cuyo objetivo es absorber con las menores pérdidas posibles la energía que la superficie reflectora ha concentrado en su área.

c) *Tubo de Soporte del Absorbente:*

Este elemento, tiene dos funciones. La primera, sostener en posición al absorbente o receptor con respecto a la superficie reflectora y la segunda, llevar dentro de sí el medio de transporte de la energía concentrada por la superficie reflectora. Este medio es un fluido caloportador.

d) *Montura de Seguimiento:*

El sistema concentrador normalmente necesita disponer de movilidad para orientarse adecuadamente con respecto a la posición del sol. La montura permite el movimiento en uno o dos ejes de orientación:

- i. *Mecanismo de elevación:* Para producir la elevación de la superficie reflectora, por sus dimensiones y masa, es necesario disponer de un mecanismo manual o automático para facilitar este movimiento.
- ii. *Mecanismo de movimiento según el azimut:* Esta es otra de las posibles direcciones a seguir para mantener la orientación exacta solar, este mecanismo al igual que el anterior puede ser manual o mecánico.

e) *Columna Soportante:*

El sistema debe ser soportado firme y de manera estable, para lo cual se necesitan estructuras como columnas o torres soportantes de todos los elementos anteriores.

### 3. Análisis Teórico de la concentración

---

#### 3.1 Definiciones Básicas

##### 3.1.1 Diámetro aparente del sol

Se denomina diámetro aparente de un astro al ángulo formado por dos visuales tangentes al mismo. Su valor se expresa en grados, minutos y segundos de arco.

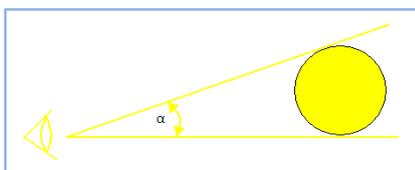


Figura 11: Diámetro aparente.<sup>13</sup>

El diámetro aparente de un astro es inversamente proporcional a la distancia que lo separa del observador. Los diámetros aparentes de dos astros diferentes, situados a igual distancia del observador, son directamente proporcionales a sus diámetros verdaderos.

El sol es una fuente luminosa situada a una distancia media de  $150 \times 10^6$  Km de la tierra. Su diámetro aparente visto desde la Tierra es de  $32'$  de arco aproximadamente, es decir  $0.0093$  radianes, por esto, podemos aproximarlo a un disco radiante de diámetro angular medio  $32'$  de arco.

##### 3.1.2 Luminancia del disco solar

Debido a la absorción por la atmósfera solar, el brillo de este astro es menor hacia los bordes que hacia su centro, siguiéndose una distribución como la que se señala a continuación [6]:

$$L(u) = L_0 \times \left[ 0,39 + 0,61 \times \sqrt{1 - \left( \frac{\sin u}{\sin \varepsilon_0} \right)^2} \right] \quad (3.1)$$

Donde:

$L(u)$ :	Brillo de la imagen solar en un punto del disco con radio angular $u$ ,	$[\text{W}/\text{cm}^2]$
$L_0$ :	Brillo máximo de la imagen solar (se encuentra al centro del disco),	$[\text{W}/\text{cm}^2]$
$\varepsilon_0$ :	Radio angular aparente del sol, se considera igual a $16'$ de arco,	$[\circ]$
$u$ :	Es el radio angular desde el centro hacia su superficie ( $u \leq \varepsilon_0$ ),	$[\circ]$

---

<sup>13</sup> Fuente: <http://www.astrodomi.com.ar/guia/definiciones/definiciones.htm>

Esta ecuación (3.1) entrega información sobre el perfil de distribución de la luminancia en el disco solar en función del radio considerado  $u$ . Para conocer la cantidad de energía que contiene el disco solar o parte del disco, se debe realizar una integración de esta expresión a modo de calcular “el volumen” energético que posee este disco en función del mismo radio  $u$ .

La integración no es directa, pues se debe calcular el volumen de la superficie de revolución que se forma, siendo  $u=x$  y  $L(u)=f(x)$ , la integración a proceder es de la forma:

$$V(x) = 2\pi \int_a^b xf(x)dx \quad (3.2)$$

Siendo  $a$  y  $b$  los límites para el radio  $u$  considerados y  $V(x)$  la energía asociada a la porción de disco solar considerado.

Desde la tierra, el diámetro del disco solar es variable de acuerdo a la época del año y las condiciones atmosféricas imperantes, por esto, es necesario adecuar las ecuaciones anteriores a situaciones generales de insolación:

El factor  $L_0$ , se reemplaza por  $L_r$  que es el máximo brillo en el centro del disco solar observado desde la tierra,

$$L_r = \frac{0,0539372}{\sin \epsilon'^2} \left[ \frac{W}{cm^2} \right] \quad (\epsilon' \geq \epsilon_0) \quad (3.3)$$

Siendo  $\epsilon'$  [°], el radio angular de este disco solar.

De estas definiciones, se desprende que la incidencia sobre la tierra de los rayos solares, se realiza en forma de conos cuya base es el disco solar y el vértice está en el punto de incidencia sobre nuestro planeta.

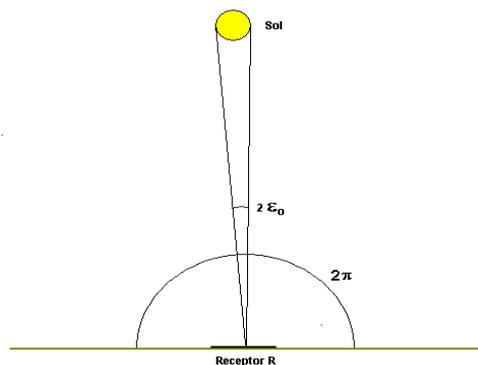


Figura 12: Cono de luz formado por sol<sup>14</sup>

<sup>14</sup> Fuente: Tecnología-Solar-Chile-Mayo2010.pptx, Roberto Román L.

### 3.1.3 Ley de Snell, principios de reflexión y refracción.

Los procesos básicos que ocurren cuando la luz se encuentra con una superficie de un material transparente son mostrados en la Figura 13. Una porción del rayo incidente se puede reflejar desde la superficie tal como se muestra, formando un ángulo  $\theta_i$  con respecto a la normal a la superficie en dicho punto. Parte de la luz incidente pasará a través de la superficie y entrará en el material. Al hacer esto, la dirección de la luz cambiará (i.e., es refractada) de acuerdo a la ley de Snell:

$$N_1 \sin \theta_i = N_2 \sin \theta_{rfr} \quad (3.4)$$

Los símbolos son definidos en Figura 13.

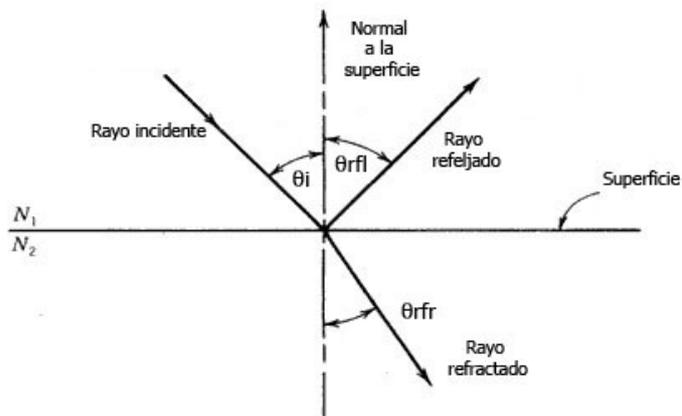


Figura 13: Ley de Snell<sup>15</sup>

A medida que la luz pasa a través del material, parte de esta puede ser absorbida, con lo que decrece la energía contenida en la luz refractada. La capacidad de un material para dejar pasar la luz es llamada transmitancia o transmisividad. Las propiedades físicas de la reflexión, la refracción y la transmitancia definen el comportamiento de los colectores concentradores solares y se examinarán en las siguientes secciones.

### 3.1.4 Reflexión especular y reflexión difusa

Reflexión especular es aquella que se produce sobre superficies lisas y sin imperfecciones en ésta; se caracteriza por tener el rayo reflejado una dirección única, cumpliendo las leyes clásicas de este fenómeno; lo contrario a este tipo de reflexión es la reflexión difusa, en que la superficie reflectora es de tipo rugoso y con imperfecciones, por esta causa la reflexión se realiza en múltiples direcciones.

<sup>15</sup> Fuente: <http://www.powerfromthesun.net/Chapter8/Chapter8new.htm>

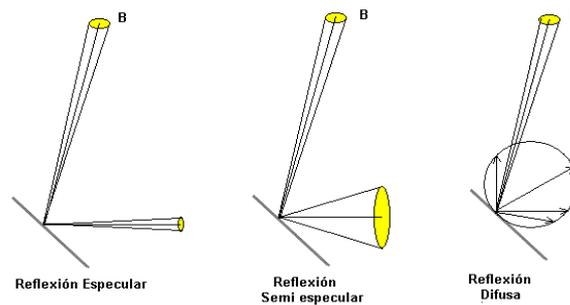


Figura 14: Reflexión especular, semi especular y difusa.<sup>16</sup>

### 3.2 Análisis Básico de la concentración

Considérese un sistema compuesto por un reflector y un receptor, orientado hacia el Sol en un ángulo conocido, en un instante dado. Los rayos solares parten desde una zona del Espacio, el disco solar, y tienen forma de conos.

Un punto cualquiera del reflector recibe, como se ha indicado, un cono de rayos solares, y refleja una fracción de la energía incidente. El rayo reflejado es también un cono de similares características, cuyo vértice es el punto de intersección con el reflector. Los ángulos entre los ejes de los conos cumplen con la ecuación (3.4).

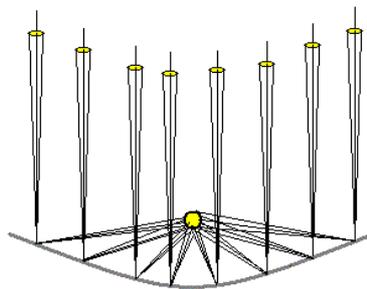


Figura 15: Reflexión especular en sistema concentrador solar.<sup>17</sup>

Los defectos ópticos del reflector producen dos efectos importantes en el rayo reflejados primero, el semi ángulo del cono no es igual al del rayo incidente (reflexión difusa); segundo, el ángulo de reflexión sufre también una pequeña desviación causada por defectos micro y macroestructurales.

Si este rayo reflejado intercepte el absorbente, este producirá un intercambio de energía térmica. Si por el contrario, este rayo intercepta al reflector, se producirá una nueva reflexión.

<sup>16</sup> Fuente: Tecnología-Solar-Chile-Mayo2010.pptx, Roberto Román L.

<sup>17</sup> Fuente: Tecnología-Solar-Chile-Mayo2010.pptx, Roberto Román L.

Por último, si el rayo reflejado no intercepta a ninguno de los dos, se devuelve al espacio, y su energía no es aprovechada.

Las diversas situaciones descritas (reflexión-absorción, reflexión-expulsión, reflexión-reflexión-absorción), se repiten en toda la superficie reflectora, configurando un intercambio global de energía.

### 3.2.1 Limite teórico de la concentración

Si el flujo que atraviesa el área de apertura  $A$  es  $I_i$  y el flujo que finalmente llega al absorbente es  $I_a$  entonces el factor de concentración se define como:

$$C = \frac{I_a}{I_i} \quad (3.5)$$

Diversas orientaciones del reflector, posiciones del absorbente, condiciones solares y atmosféricas, afectan notablemente el factor de concentración. Sin embargo, existen condiciones ideales, en las cuales se alcanza una concentración máxima.

Si toda la radiación que ingresa por la apertura puede ser transferida, sin pérdidas, al absorbente, entonces el factor de concentración es:

$$C = \frac{A_{ap}}{A_{abs}} \quad (3.6)$$

Donde:

$C$ : factor de concentración

$A_{ap}$ : área de apertura

$A_{abs}$ : área del absorbente

Sin embargo, si realmente toda la energía pudiese ser transferida, el receptor podría alcanzar la temperatura del Sol. Esta situación no está permitida por la II ley de la Termodinámica. Existe, por lo tanto, un límite termodinámico al factor de concentración.

La demostración de este límite no es presentada en esta memoria, pero puede ser obtenida de [2]. De aquí se concluye que :

$$C \leq \frac{1}{\sin^2 \theta_s} \quad (3.7)$$

Donde:

$\theta_s$  = radio angular del sol. Este se aprecia en la figura siguiente:

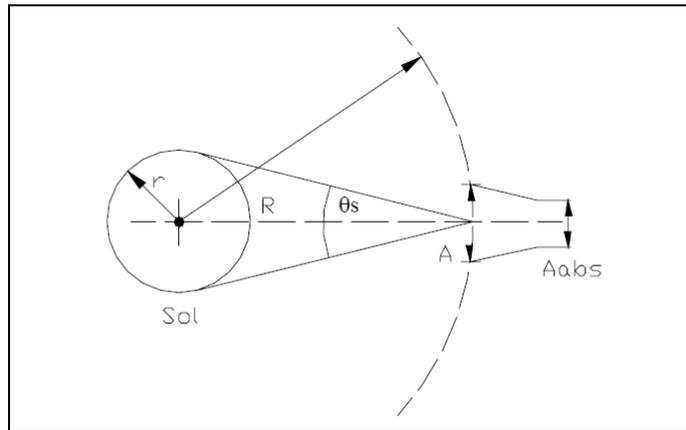


Figura 16: Sistema Sol-absorbedor propuesto por A. Rabl [3]

En la práctica las magnitudes de los niveles de concentración obtenidos en los sistemas concentradores son de 1.5 a 2 los de baja concentración, 2 a 200 los de concentración media, llegando los de alta concentración hasta 40.000 veces esta razón.

A mayor concentración de la radiación solar, se obtiene en esa área un mayor flujo energético, y por ende una mayor temperatura (útil para procesos industriales o termodinámicos en general), de ahí la importancia de obtener buenas razones de concentración de la radiación solar y de sistemas eficientes.

### 3.2.2 Temperatura límite de operación

La II ley de la termodinámica limita la temperatura del receptor a una cota superior: la temperatura de la fuente. Sin embargo, condiciones adicionales de pérdida limitan aun mas esta temperatura.

Esto es particularmente importante para el diseño de colectores, ya que los parámetros de diseño (principalmente el factor de concentración) condicionan la máxima temperatura de operación.

La siguiente expresión permite calcular una cota para la temperatura de operación:

$$T_{abs} = T_s \times [(1 - n) \times t \times \frac{\alpha}{\epsilon} \times \frac{C}{C_{max}}] \quad (3.8)$$

Donde:

$T_{abs}$ = Temperatura del absorbente o receptor.

$T_s$ = Temperatura en la superficie del sol.

$n$ = fracción de energía perdida luego de ser captado por el receptor ( $0 \leq n \leq 1$ ).

$t$ =  $1-p$  ( $p$ =pérdidas ópticas en apertura y colector).

$\alpha$ = absortividad del receptor para la radiación solar.

$\epsilon$ =emitancia a la radiación infrarroja.

$$C=A_{ap}/A_{abs}$$

$$C_{max}=1/\sin^2\theta_s,$$

Siendo la temperatura de la superficie del Sol aproximadamente 6000 °K, y conociendo los otros parámetros, se puede calcular fácilmente una cota de la temperatura de operación. Las propiedades ópticas del material de que está construido el absorbente quedan caracterizadas por  $\alpha$  y  $\epsilon$  ; con la fórmula anterior se cuantifica cómo influyen éstas en el comportamiento del colector.

### 3.2.3 Dispersión de la imagen

La imagen formada en los diversos concentradores solares con imagen, no es de tipo puntual. Esto se debe a la forma cónica de los rayos incidentes y a errores de diversos tipos. En el mejor de los casos, se producirá una imagen de tamaño  $2f\epsilon_0$  llamada imagen de Gauss, donde  $f$  es la distancia focal y  $\epsilon_0$  el semiángulo del Sol.

Otros errores afectan también a la imagen, cuantificándose su aporte a la dispersión por medio de métodos estadísticos. A cada factor que afecta la mancha se le asocia un promedio cuadrático  $s$ , y la suma de los diversos errores es la suma de los cuadrados de estos promedios.

Los errores más frecuentes son:

a) Distribución angular de la radiación:

Como la radiación solar tiene una distribución de intensidades, se calcula un diámetro medio  $d$ , de brillo constante, cuyo valor queda dado por:

$$d^2 = \frac{\int E^2(\theta) \times \theta^3 \times d\theta}{\int \theta^3 \times d\theta} \quad (3.9)$$

Donde:

$d$ : diámetro medio

$\theta$ : distancia angular, en radianes, al centro del sol

$E(\theta)$ : función distribución de la radiación

En trabajos anteriores [5] se utilizó este tipo de aproximación, pero para obtener resultados que cumplan de manera más estricta con la teoría, se utilizarán las ecuaciones (1) (2) y (3) para calcular esta distribución angular energética.

b) Errores superficiales y microestructurales:

Se representan también por un valor  $s$  de dispersión cuadrática, obtenido mediante métodos estadísticos. Materiales más lisos y una construcción más precisa, hacen decrecer el valor de  $s$ .

Se mencionó que la concentración máxima (ideal) para un colector bidimensional es 200 y para uno tridimensional, 40.000. En la práctica estos factores se reducen, y la imagen se dispersa debido a errores en la fabricación, en el diseño óptico de lentes y espejos, ángulo de rastreo y la radiación difusa producida por la atmósfera.

Se han hecho intentos por cuantificar la influencia de las imperfecciones superficiales sobre el factor de concentración utilizando métodos estadísticos y se han encontrado expresiones de  $C$  modificadas por estas imperfecciones.

Otra forma de cuantificar el error de enfoque debido a la superficie, consiste en suponer un reflector perfecto, y asimilar los errores microestructurales mediante un ángulo sólido solar mayor. De este modo, el cono reflejado tiene las mismas dimensiones que el incidente, y es posible emplear las leyes clásicas de la reflexión. Este fue el método empleado en el desarrollo del programa. Ahora, el problema reside en encontrar el valor de este ángulo sólido mayor. Para esto, se probaron valores iterativamente, comparando con resultados de factores de concentración obtenidos mediante otro tipo de mediciones.

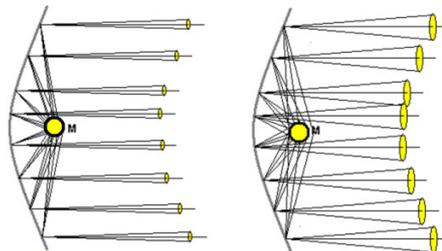


Figura 17: Modelo del sol con mayor diámetro.<sup>18</sup>

### 3.3 Óptica del concentrador solar

El funcionamiento de cualquier colector de energía solar térmica se puede describir como un balance de energía entre la energía solar absorbida por el colector y la energía térmica eliminada o perdida en el colector. Si no se proporciona un mecanismo alternativo para la extracción de energía térmica, las pérdidas de calor por el receptor del colector deben ser igual a la energía solar absorbida.

---

<sup>18</sup> Fuente: Tecnología-Solar-Chile-Mayo2010.pptx, Roberto Román L.

La temperatura del receptor aumenta hasta que la pérdida de calor por convección y la radiación del receptor son iguales a la energía solar absorbida. La temperatura a la que esto ocurre se denomina *temperatura de estancamiento del colector*.

Para controlar la temperatura del colector y obtener puntos más fríos que la temperatura de estancamiento, se debe eliminar calor en forma activa. Este calor queda entonces disponible para su uso en un sistema de energía solar. La tasa a la cual este calor es removido del colector determina su temperatura de operación. Para remover una gran fracción de la energía solar absorbida en forma de calor útil, la cantidad de calor perdido por el receptor debe ser pequeña.

Las pérdidas de calor del receptor se pueden reducir operando el colector cerca de la temperatura ambiente (por ejemplo, con los colectores de placa plana de baja temperatura) o mediante la construcción del colector de tal manera que la pérdida de calor a temperaturas elevadas sea reducido. La forma más común de reducir la pérdida de calor en el receptor a temperaturas elevadas es reducir el tamaño de la superficie caliente (es decir, el receptor), ya que la pérdida de calor es directamente proporcional a su área. Los colectores con concentración reducen la superficie del receptor mediante la reflexión (o refracción) de la luz que incide sobre un área grande (la abertura del colector) en un receptor de área pequeña. Con la pérdida de calor reducida, los colectores de concentración pueden funcionar a temperaturas elevadas y todavía proporcionar cantidades significativas de energía térmica útil.

Una segunda razón para utilizar la concentración en el diseño de los colectores solares es que, en general, las superficies reflectoras son menos costosas que las superficies receptoras. Por lo tanto, grandes cantidades de área de bajo costo de la superficie reflectante pueden colocarse en un vasto espacio, concentrando la energía solar incidente en las pequeñas superficies absorbentes. Sin embargo, muchos colectores con concentración deben seguir el movimiento del sol a través del cielo, añadiendo un coste significativo para la construcción de un sistema de este tipo.

Para cada nivel de concentración, hay teóricamente un sinnúmero de superficies posibles para obtener buenos rendimientos energéticos, tanto en lo que se refiere a los absorbentes como a los reflectores; lo importante es minimizar las pérdidas de energía en cada una de las fases de este proceso, manteniendo el costo del sistema lo más bajo posible.

Este es justamente el sentido del presente trabajo. Desde el punto de vista óptico, desarrollar una herramienta para estudiar, para una secuencia de estados de insolación, el tamaño, forma y ubicación de los distintos componentes del sistema de concentración y así optimizar su rendimiento.

### 3.3.1 Eficiencia del sistema concentrador

a) Eficiencia del sistema colector:

$$\eta_{sc} = \frac{q_u}{I_{acc}} \quad (3.10)$$

b) Eficiencia óptica:

$$\eta_{op} = \frac{q_{abs}}{I_{acc}} \quad (3.11)$$

Donde:

$I_{acc}$ : Radiación incidente sobre la apertura del colector	[W/cm <sup>2</sup> ]
$q_u$ : Energía absorbida por el receptor.	[W/cm <sup>2</sup> ]
$q_u = q_{abs} - q_{Perd}$	[W/cm <sup>2</sup> ]
$q_{abs}$ : Energía incidente sobre el absorbente,	[W/cm <sup>2</sup> ]
$q_{Perd}$ : Pérdidas térmicas en el absorbente,	[W/cm <sup>2</sup> ]

### 3.3.2 Factor de concentración ideal

$$CR_{ideal} = \frac{1}{\sin \theta_c} \text{ (dos dimensiones)} \quad (3.12)$$

$$CR_{ideal} = \frac{1}{\sin^2 \theta_c} \text{ (tres dimensiones)} \quad (3.13)$$

Donde:

$\theta_c$  :ángulo de aceptación, ángulo por sobre el cual todos los rayos solares reflejados en la superficie reflectora, inciden sobre el área del absorbente, sin mover parte o la totalidad del concentrador.

### 3.3.3 Factor de concentración geométrico

$$CR_{area} = \frac{A_a}{A_r} \quad (3.14)$$

Donde:

$A_a$ : Área de apertura del concentrador,	[cm <sup>2</sup> ]
$A_r$ : Área del absorbente,	[cm <sup>2</sup> ]

### 3.3.4 Factor de concentración de flujo

$$CR_{flujo} = \frac{I_r}{I_a} \quad (3.15)$$

Donde:

$I_r$ : Flujo energético que incide sobre el área del absorbente, [W/cm<sup>2</sup>]

$I_a$ : Flujo energético que atraviesa el área de apertura del reflector, [W/cm<sup>2</sup>]

### 3.3.5 Insolación total

$$I_t = I_b + I_d \quad (3.16)$$

Donde:

$I_b$ : Componente directa de la radiación solar incidente, [W/cm<sup>2</sup>]

$I_d$ : Componente difusa de la radiación solar incidente, [W/cm<sup>2</sup>]

### 3.3.6 Eficiencia de radiación directa

$$\eta_d = \frac{I_{acc}}{I_b} \times \eta_{op} - \frac{q_{perd}}{I_b} \quad (3.17)$$

### 3.3.7 Errores o aberraciones ópticas

Como se expuso en la sección 3.2.1 en teoría se pueden alcanzar concentraciones del orden de 40.000 para concentradores perfectos y llegar a tener el mismo flujo que en la superficie del sol, sin embargo al usar reflectores y receptores reales, existen una serie de fenómenos que hacen que el factor de concentración real sea significativamente menor. Los errores que afectan a los concentradores solares corresponden a diferentes fuentes y afectan de diferente manera la eficiencia del sistema concentrador. Se definirán previamente dos parámetros que facilitarán el posterior análisis.

a) *El factor de Intercepción ( $\tau$ ):*

Corresponde a la fracción de la radiación especular reflejada que es interceptada por la superficie absorbente. Este es un factor muy importante en el balance energético, ya que es una propiedad del concentrador y de su orientación con respecto a la radiación solar incidente, así como la posición relativa del absorbente al concentrador, para formar la imagen de intercepción en la ubicación adecuada del absorbente. Por minimizadas que hayan sido las pérdidas térmicas u ópticas en el sistema concentrador, siempre el coeficiente de reflexión será menor que la unidad.

b) *Reflectancia Especular ( $R$ ):*

Corresponde a la razón entre el ángulo del cono incidente de la radiación solar con respecto al ángulo del cono reflejado, estando la causa de esta diferencia angular en la naturaleza o rugosidad de la superficie reflectora. El ángulo sólido solar incidente es de  $32'$  de arco, por lo tanto el ángulo sólido reflejado será de  $32' + 2\Delta\theta$  de arco ( $0 < \Delta\theta$ ), estando  $R$  dado por:

$$R(\Delta\theta) = \frac{R_1}{\sigma_r \times \sqrt{2\pi}} \times \exp\left(\frac{-\Delta\theta^2}{2 \times \sigma_r}\right) \quad (3.18)$$

$$\varepsilon' = 32' + 2\Delta\theta \quad (3.19)$$

Donde:

$R_1$ : reflectancia utilizada para el cálculo, depende del material de la superficie reflectora, toma valores entre 0.44 y 0.95.

$\sigma_r$ : Es la desviación estándar de las longitudes de onda de la radiación solar.

$\Delta\theta$ : Es la desviación angular desde el rayo central.

A partir de estas definiciones, se analizarán los defectos producidos en el sistema de concentración.

La distribución real del flujo de la radiación solar en la superficie absorbente difiere de la distribución ideal esperada, esta distorsión es producida por las siguientes causas:

1) Errores de pequeña escala o irregularidades en la superficie del reflector:

Lo que causa dispersión de la imagen, esto causa una disminución de la reflectancia especular  $R$ . Este fenómeno es producido por la naturaleza de la superficie reflectora y en

particular, su rugosidad. Estos defectos, producen un aumento en el área de la mancha focal, con la consiguiente pérdida de flujo energético local. Este efecto de dispersión aumenta según el radio máximo del reflector y el largo del foco. Para minimizar este efecto, se han usado materiales que ayudan a obtener superficies exentas, o bien que minimizan estos fenómenos, como hojas de aluminio anodizado, películas de plástico metalizado al vacío (como las películas de polyester aluminizado), y superficies de vidrio laminado.

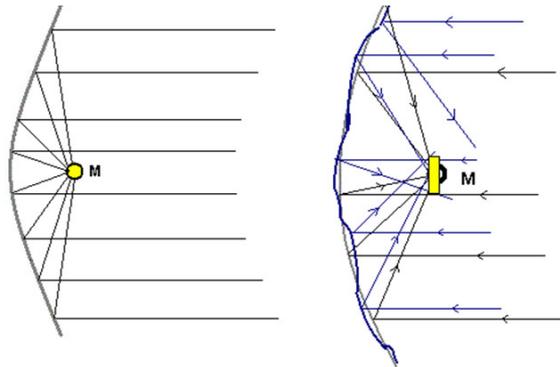


Figura 18: Irregularidades en superficie reflector.<sup>19</sup>

## 2) Errores macroscópicos en el reflector que producen distorsión en la imagen solar:

Estos pueden tener su origen en la manufactura de éste, rigidez de la estructura soportante y otros factores que afectan a su forma. Estos errores producen una reflexión de la radiación solar defectuosa medida en la zona focal, y corresponden a defectos a nivel local. Es difícil predecir este tipo de deficiencias para estimar la distribución energética en el absorbente, pero es razonable asumir que esta distribución es una distribución normal ya que los errores de manufactura son aleatorios. El área bajo la curva correspondería al flujo radiativo total en el absorbente. Se debe tener cuidado, en todo caso con la posible presencia de errores sistemáticos en los métodos de manufactura de los componentes del sistema, con lo que esta distribución normal no sería válida y se debería considerar otra distribución corregida, pero al menos son defectos medibles y corregibles con la adecuada atención.

## 3) Errores en la posición relativa del absorbente frente al reflector:

Este tipo de errores producirán un aumento en el área de la imagen en la zona del absorbente, y sumado al aumento de ésta debido a los errores en el reflector, se obtendrá una reducción de la intensidad energética en el área focal y parte del flujo caerá fuera del receptor.

---

<sup>19</sup> Fuente: Tecnología-Solar-Chile-Mayo2010.pptx, Roberto Román L.

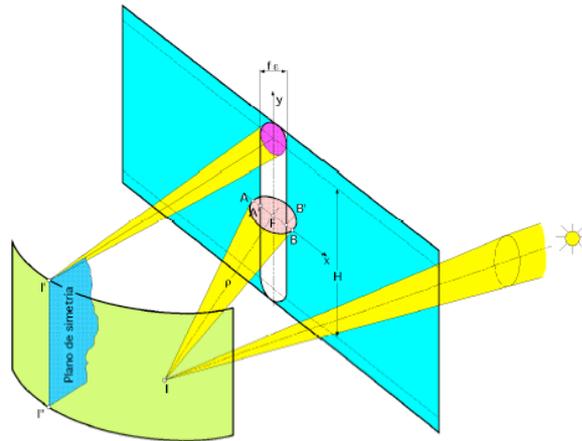


Figura 19: Errores ópticos derivados de la geometría reflector-receptor.<sup>20</sup>

#### 4) Errores en la orientación del sistema colector:

Producen un aumento del área focal y simultáneamente, un desplazamiento de ésta (lográndose, por consiguiente, una disminución de la densidad energética en esta área). Para una determinada magnitud del error de orientación, el cambio del factor de interceptación ( $\tau$ ) variará directamente con la distancia focal del sistema y la razón de concentración. Experimentalmente, los efectos de los errores de la orientación angular del sistema de concentración, pueden ser estimados a través de mapas de flujos. Es claro que entre los factores de mayor importancia a considerar para mantener la mejor eficiencia en el sistema concentrador, se encuentra su adecuada posición relativa respecto al disco solar. Esto se consigue al minimizar el ángulo de incidencia de los rayos solares respecto al eje de la superficie concentradora, y mantener la imagen solar centrada en el absorbente a medida que el sol se mueve a través del cielo.

Para esto, existen diversos sistemas de seguimiento, de acuerdo a los niveles energéticos que se desea obtener:

- a) *Sistemas de Seguimiento Activo:* Consiste en realizar mediciones periódicas del efecto de la incidencia de los rayos solares, si la alineación no es la apropiada, activa mecanismos que corrigen la orientación del colector. El sistema de medición más utilizado, es a través de celdas fotovoltaicas; estos sensores deben ser colocados en el absorbente, y revisan si la posición de éste corresponde a la posición de la mancha focal.

---

<sup>20</sup> Fuente: <http://libros.redsauce.net/>

- b) *Sistemas de Control Pasivo:* Corresponden a seguimientos preprogramados en la dirección del movimiento solar, estos se ejecutan cada cierto lapso de tiempo también pre-definido. Se cuenta para esto usualmente con un microcomputador que trabaja paralelamente a un reloj y está programado de tal manera que calcula la posición necesaria del colector en función de la hora del día y la fecha en el año.
- c) *Sistemas Combinados:* Estos sistemas presentan la posibilidad de integrar lo mejor de los dos anteriormente descritos; el sistema de control activo mantiene al concentrador en la dirección de seguimiento adecuada, mientras el computador, utilizando la información entregada, corrige desalineaciones producto de errores electrónicos o malas interpretaciones producto de fenómenos atmosféricos como nubes, etc. Existen a su vez, otros sistemas de alta sofisticación que controlan la temperatura de ciertos componentes, el flujo de fluido caloportador, y el funcionamiento de partes del sistema, y en el caso de presentarse anomalías, corrige o bien detiene su funcionamiento. El seguimiento del disco solar en un sistema concentrador, se puede realizar de las siguientes formas:

- Movimiento simultáneo y solidario de la superficie reflectora y el captor.
- La superficie reflectora móvil y el captor se mantiene fijo en una determinada posición.
- La superficie reflectora permanece en una posición fija, y el captor es móvil para seguir la imagen solar y así mantener en un alto nivel la eficiencia del sistema.
- Sistemas heliostáticos, los que son sistemas de seguimiento solar en que se fija el foco y se reduce el reflector a un gran número de espejos discretos, cada uno de ellos orientado hacia el punto imagen, inciden en el foco. En la imagen, el brillo superficial, depende del ángulo de convergencia de los rayos al foco.
- Ajustes periódicos, consisten en que el eje óptico del colector es orientado continuamente hacia la posición del sol en el cielo. Este tipo de seguimiento colecta la máxima radiación solar posible respecto a otros sistemas de seguimiento.

Las direcciones de seguimiento solar a programar, básicamente corresponden a las siguientes:

- a) Fija, siendo normal a los rayos del sol a mediodía en los equinoccios.
- ii) Rotación en torno a un eje horizontal este-oeste, con una regulación diaria, permitiendo que la normal a la superficie de apertura coincida con los rayos solares a medio día, todo el año.

- iii) Rotación en torno a un eje horizontal este-oeste con ajustes continuos para obtener la máxima energía incidente.
- iv) Rotación en torno a un eje horizontal norte- sur con ajuste continuo para obtener la máxima energía incidente.
- v) Rotación en torno a un eje paralelo al eje terráqueo con ajuste continuo para obtener máxima energía incidente.
- vi) Rotación con respecto a dos ejes perpendiculares, con ajuste continuo para permitir que la normal de la superficie de apertura coincida con la radiación solar en cada momento.

### **3.4 *Análisis energético del concentrador solar***

Las pérdidas en los sistemas de concentración, corresponden a pérdidas térmicas (radiación, conducción, y convección) y pérdidas ópticas, en la superficie reflectora como en el absorbente del sistema con respecto al medio que los rodea, las que van en desmedro de su eficiencia.

Estas pérdidas dependen directamente de los materiales con que están manufacturadas las diferentes partes del sistema reflector así como el absorbente, y las temperaturas circundantes, por lo tanto, para minimizar las pérdidas térmicas es muy importante saber elegir adecuadamente dichos componentes.

No es posible presentar un método general para estimar las pérdidas térmicas. Cada geometría absorbente debe ser analizada aisladamente.

Cuantitativamente, las pérdidas por conducción y convección hacia el aire circundante del absorbente son significativas, por lo tanto si se desea minimizarlas o eliminarlas, se hace necesario mantener el absorbente en vacío.

Es difícil el diseño de estos elementos en estas condiciones por el ciclo térmico que debe cumplir el absorbente.

Manteniendo la presión a  $10^{-2}$  a  $10^{-3}$  atm en la zona de vacío, se suprimirá la convección, pero no la conducción; lo difícil es mantener dicha presión. Hay varios exponentes de este tipo construidos por la General Electric y Owens Corning Illinois, en que se mantiene al absorbente en un ambiente herméticamente cerrado y a una presión de alrededor de  $10^{-7}$  atm.

Por el costo que significa mantener las condiciones herméticas y de vacío en el absorbente, no resulta conveniente económicamente adoptar estas soluciones para aumentar el rendimiento del sistema, excepto para aplicaciones muy particulares.

Además de los absorbentes al vacío con bomba para mantener la presión en bajos niveles deseados, existen los tubos de cubierta, sellados en vacío, que si bien poseen excelentes características cuando nuevos, en el tiempo puede que se pierda dicha cualidad, llegándose a la larga a cubiertas con presión interna mayores que la inicial, sujeta a la presencia nuevamente de transferencia de calor por convección. No obstante lo anterior, el costo de fabricación como de mantención de estos elementos, es muy bajo comparado al costo del sistema concentrador en su totalidad, lo que hace atractivo su uso.

Otra forma de aumentar el rendimiento térmico del sistema concentrador, no tan eficiente como las anteriores alternativas, pero más simple, es rodear la superficie de apertura del sistema absorbente con un material transparente.

Para minimizar el problema de las pérdidas térmicas del colector solar, se recurre a elegir las adecuadas propiedades ópticas de la superficie absorbente y vidrios translúcidos, de tal manera de aprovechar el mayor nivel posible de energía radiante solar, reduciendo al mínimo las pérdidas térmicas radiativas producto de las partes calientes del colector. Este es el denominado uso de propiedades selectivas de las superficies; tanto de tipo absorbente, actuando como un cuerpo negro, así como de transmisión en que se permite el paso de la radiación pero inhabilita la posibilidad de pérdidas térmicas infrarrojas desde el absorbente.

Para bajas temperaturas, se usan los llamados absorbentes transpiradores. Consisten en un material poroso y un líquido caloportador frío, que es bombeado hacia la estructura porosa desde el exterior, permaneciendo las superficies externas frías con lo cual se disminuyen las pérdidas térmicas.

Otra opción para reducir las pérdidas térmicas es reducir el tamaño del absorbente, pero esto conlleva a mayores pérdidas ópticas. En consecuencia, un dimensionado adecuado del receptor implica el tener que compensar ambos tipos de pérdidas de energía.

### ***3.5 Métodos de análisis del flujo en la zona focal***

La evaluación del comportamiento térmico de los sistemas concentradores solares se realiza mediante el análisis de la energía por unidad de tiempo que incide sobre la superficie captora.

Para cuantificar dicha energía incidente sobre el captor, existen diversos métodos que se señalan a continuación:

### 3.5.1 Directos

Los métodos directos, llamados también calorimétricos, miden el flujo de calor en la zona focal. Esto se logra colocando en la zona de interés, un objeto de propiedades termo físicas conocidas, al cual se le mide la temperatura. Luego, esta medida se convierte a potencia; barriendo la zona de interés, es posible conocer la distribución del flujo calórico.

Estos métodos presentan la ventaja que miden directamente la energía que sería transferida al absorbente. De hecho, el objeto expuesto en la zona representa todo o parte del absorbente de una construcción completa. Sin embargo, su implementación e instrumentación pueden ser caros. Por otro lado, se requiere una gran cantidad de ensayos en diversas condiciones para obtener resultados reproducibles.

#### 1- Método del Caudal de Agua

Se construye un tubo metálico, abierto en un extremo, rodeado por una camisa de agua, la cual a su vez está aislada del exterior. Por la apertura superior entra la radiación, la cual calienta las paredes del tubo. A su vez, las paredes transmiten el calor al agua que circula por la camisa.

Suponiendo que toda la radiación incidente logra ser transmitida al agua, y midiendo el caudal y temperaturas de entrada y salida del agua, es posible calcular la potencia mediante el siguiente balance de energía:

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_s - T_e) \quad (3.20)$$

Donde:

$Q$ : potencia calórica entregada al agua.

$m$ : caudal de agua dentro del tubo.

$c_p$ : capacidad calórica del agua.

$T_s$ : temperatura de salida del agua.

$T_e$ : temperatura de entrada del agua.

#### 2- Método de la masa de Cobre

Un tubo de cobre de pequeñas dimensiones, se coloca en la zona de interés, protegido de la radiación por una pantalla y un refrigerante. Para medir, se expone el cobre a la radiación durante un pequeño intervalo de tiempo, retirándole la pantalla. El movimiento del objeto se controla mediante dos solenoides opuestos.

Una termocupla convenientemente calibrada y adosada al tubo, registra la elevación de temperatura en función del tiempo. Luego de un corto transiente inicial, se encuentra que la elevación de temperatura es lineal, siempre que la diferencia de temperatura con respecto al ambiente no sea muy grande.

La potencia recibida se calcula como:

$$Q = m \cdot c_p \cdot T \quad (3.21)$$

Donde:

$Q$ : potencia calórica entregada al cobre.

$m$ : masa del cobre.

$T$ : tasa temporal de elevación de temperatura.

### 3- Método del Resumidero Térmico

Este procedimiento consiste en colocar un disco metálico expuesto a la radiación, rodeado en su perímetro por un "resumidero térmico". Este resumidero térmico permanece a temperatura constante, independientemente del flujo calórico del disco hacia él.

Se hace incidir la radiación en el disco, de tal modo que este se calienta, y transmite calor hacia el pozo. En estas condiciones, la temperatura tiene una distribución de simetría azimutal.

Para conocer la radiación incidente se mide la temperatura en el centro del disco y en el pozo. La calibración previa proporciona expresiones algebraicas, que son respuestas funcionales Temperatura-Radiación-Voltaje. Midiendo las temperaturas indicadas, se puede conocer entonces la radiación incidente.

#### 3.5.2 Indirectos

Los sistemas de medición indirectos, registran alguna característica física del entorno de la superficie a estudiar, que tenga relación en este caso con la temperatura del captor.

##### 1- Método de la Esfera de Integración

Se ocupa aquí una esfera hueca, cuyo interior es rugoso, con una apertura de sección  $s \ll S$  (siendo  $S$  la superficie interior) y se hace entrar la radiación por esta apertura. Las múltiples reflexiones internas, y las características de la superficie interior, hacen que la esfera completa actúe como un cuerpo negro.

Se puede demostrar que para una radiación incidente dada, la intensidad luminosa en el interior es constante en todo el volumen encerrado.

Para medir la radiación, se coloca un detector (fotopila) en el extremo opuesto a la apertura, y se mide la luz incidente sobre él. El detector debe estar protegido de la radiación directa. La respuesta V-I de la fotopila es lineal desde intensidades muy débiles de la radiación, hasta tres veces el valor de la radiación solar directa, momento en que es afectada por su resistencia interna.

Se ha logrado obtener la distribución de flujo desplazando la esfera dentro del volumen de interés. Este proceso es muy rápido, ya que la respuesta de la fopila a la excitación es también rápida. Se obtienen curvas de distribución de irradiación isothermas de la zona de interés.

### 3.5.3 Analíticos

En estos métodos, se realiza un balance energético del receptor mediante modelos de transferencia de calor en los sistemas concentradores solares, su solución es numérica. Se obtienen resultados con muy buena exactitud con métodos analíticos al estudiar geometrías sencillas, pero se pierde ésta al enfrentarse a sistemas más complejos.

Algunos tipos de colectores han sido estudiados ampliamente por estos métodos, ya que es posible introducir simplificaciones razonables para geometrías sencillas o situaciones de enfoque relativamente bueno.

Las variables de entrada que normalmente se ocupan son la radiación recibida, área de recolección, factor de concentración, orientación, etc. Como resultados se obtienen potencias, rendimientos globales y temperaturas de operación.

Estos resultados son normalmente cercanos a la realidad, pero en pocos casos son exactos. Las inexactitudes se producen debido a las suposiciones implícitas o explícitas en la derivación de las ecuaciones o en las correlaciones empleadas.

Se obtienen dos tipos de información útil: ecuaciones algebraicas y gráficos. Las primeras corresponden a un tipo ordinario de ecuación algebraica o diferencial, de solución directa o iterativa. Las segundas, gráficos o cartas que representan curvas de operación para condiciones dadas.

Las suposiciones mencionadas se pueden clasificar en dos tipos:

- i) Propiedades constantes o independientes de las condiciones, como conductividad, absorptividad y emitividad.
- ii) Cinéticas, en las cuales se ocupan ecuaciones o modelos, por ejemplo de transferencia de calor, los cuales han sido desarrollados por otros investigadores, y que también son aproximaciones para situaciones dadas.

#### 1- Balance Energético Global

El modelo que aquí se describe tiene las siguientes hipótesis simplificadoras:

- Temperatura uniforme en el receptor e igual a la temperatura de salida. Esto significa que a plena carga (T alto), las pérdidas reales son menores que las calculadas, y que a baja carga (T bajo), las pérdidas reales son similares a las calculadas.

- Pérdidas al lado opuesto de las superficies de intercambio (lado opuesto del receptor) son despreciables

- Propiedades ópticas de los materiales son independientes de T y dT/dt entre T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub>. Los valores de α y ε se toman como el valor a la temperatura media ½(T<sub>1</sub>+T<sub>2</sub>).

El balance térmico global considera:

*C*: concentración geométrica media.

*r*: reflectividad.

*α*: absorptividad

*ε*: emisividad.

*h<sub>r</sub>*: pérdidas por convección

*h<sub>c</sub>*: pérdidas por convección

*θ*: temperatura de operación

*θ<sub>a</sub>*: temperatura ambiente

*P'*: potencia perdida

*P*: potencia útil

*H*: Insolación energética debido a la radiación solar, en un plano normal al eje principal del captor y cercano a la superficie reflectora

La expresión del balance térmico es: Potencia recibida= Potencia útil + Potencia perdida, esto es:

$$r \cdot \varepsilon \cdot \alpha \cdot H \cdot C = P + P' \quad (3.22)$$

La potencia perdida es:

$$P' = (h_r + h_c) \cdot (\theta - \theta_a) \quad (3.23)$$

El rendimiento global es:

$$\eta_g = \frac{P}{H \cdot C} \quad (3.24)$$

De donde:

$$\eta_g = r \cdot \varepsilon \cdot \alpha - \frac{(h_r + h_c) \cdot (\theta - \theta_a)}{H \cdot C} \quad (3.25)$$

Y el rendimiento interno instantáneo es:

$$\eta_i = 1 - \frac{P}{r \cdot \varepsilon \cdot \alpha \cdot H \cdot C} \quad (3.26)$$

Luego,

$$\eta_i = 1 - \frac{(h_r + h_c) \cdot (\theta - \theta_a)}{r \cdot \varepsilon \cdot \alpha \cdot H \cdot C} \quad (3.27)$$

Al conocer o estimar los términos de esta ecuación, se puede evaluar entonces el comportamiento de un colector solar.

## 2- Modelos de Transferencia de Calor

Los modelos analíticos se pueden mejorar utilizando correlaciones que describan más adecuadamente la transferencia de calor. Existen numerosos modelos, algunos especialmente desarrollados para colectores solares. Todos ellos definen una tasa de transferencia de calor bajo condiciones dadas (por ejemplo, cilindros verticales, esferas, convección libre o forzada, etc.).

### 3.5.4 Numéricos

A través del uso de computadores, han surgido numerosos métodos de análisis óptico de los sistemas concentradores, encontrándose entre estos los elementos finitos, métodos de trazado de rayos, etc. Se basan en la simulación de la incidencia de la radiación solar sobre el captor, ésta tiene asignada la cantidad de energía que transporta.

Al recorrer el absorbente se obtiene la energía total incidente sobre éste. Las cualidades de estos métodos, radican en que se pueden estudiar una gran variedad de superficies, e incluso las de cierta complejidad, con buena exactitud en los resultados.

## 3.6 Trazado de rayos

El método de trazado de rayos se basa en dividir la radiación solar incidente en un número finito de portadores (los rayos solares) y en seguir la trayectoria de cada rayo incidente a través de sucesivas reflexiones hasta su absorción o expulsión.

Para un par colector/absorbente, y condiciones de insolación dados, se divide la radiación incidente [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] en un número finito de rayos solares. Cada uno de estos rayos transporta una cantidad de energía igual al producto de la radiación incidente [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] por el área asociada al rayo [ $\text{m}^2$ ].

Se considera que los rayos son reflejados de acuerdo a las leyes de la reflexión especular. Suposiciones y parámetros adicionales permiten mejorar la calidad del análisis.

Algunas suposiciones adicionales que se pueden hacer son:

- el rayo solar es un ángulo sólido
- el ángulo sólido tiene una distribución energética asociada
- el reflector no tiene imperfecciones, y la dispersión en la reflexión queda representadas mediante un ángulo sólido mayor

Esto conduce a interesantes resultados desde el punto de vista de análisis óptico.

Se busca determinar las zonas de corte efectivo, o las zonas de mayor concentración en el receptor. En un computador, es posible evaluar el comportamiento de los colectores, en forma rápida y precisa.

### **3.6.1 Estado del arte**

En la actualidad existen 2 freeware que realizan trazado de rayos tridimensional utilizando el método Monte Carlo. Una breve descripción de sus actuales cualidades se presenta a continuación.

#### **1- Tonatiuh<sup>21</sup>**

Este proyecto apunta a crear un software de código abierto preciso y fácil de usar para trazado de rayos mediante el método Monte Carlo para la simulación óptica de sistemas concentradores solares. Pretende avanzar el estado del arte de las herramientas de simulación disponibles para el diseño y análisis de sistemas concentradores solares, y dejar disponible de forma gratuita este software para cualquiera interesado en usarlo y mejorarlo. Algunos de los objetivos de diseño más relevantes de Tonatiuh son los siguientes:

1. Desarrollar una base teórica robusta que facilite la simulación óptica de casi cualquier tipo de sistema concentrador solar.
2. Presentar un programa con una clara y flexible arquitectura que permita al usuario adaptar, expandir aumentar y modificar sus funcionalidades con facilidad.
3. Lograr funcionar en todos los sistemas operativos de uso actual con mínimas modificaciones en su código fuente.
4. Proveer a los usuarios una interfaz grafica avanzada y fácil de utilizar.

---

<sup>21</sup> URL de descarga: <http://code.google.com/p/tonatiuh/>

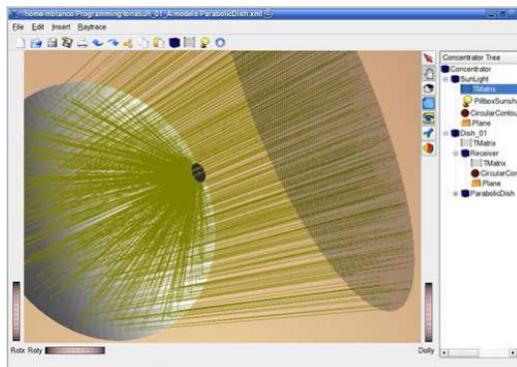


Figura 20: Tonatiuh en funcionamiento.<sup>22</sup>

Este proyecto se encuentra en desarrollo desde el año 2006 y aún está incompleto. Hasta el momento posee las siguientes funcionalidades:

- 1) Interfaz gráfica orientada a objetos desarrollada en forma exitosa.
- 2) Significativo número de colectores concentradores y receptores disponibles para analizar.
- 3) Trazado de rayos aleatorio con modelo de sol con brillo uniforme.

Aun carece de:

- 1) Manual detallado para uso del programa.
- 2) Trazado de rayos aleatorio con modelo de sol con brillo no uniforme.
- 3) Procesador integrado de datos para cálculo de concentración en colectores analizados.

Cabe destacar que el uso de este software es complicado debido a la falta de un manual para su uso y que si bien genera archivos con datos de concentración, es el mismo usuario el encargado de escribir un código aparte para su posterior análisis.

## 2- SolTRACE<sup>23</sup>

SolTRACE desarrollado por NREL<sup>24</sup> es un software de trazado de rayos para modelar sistemas concentradores solares y analizar su desempeño. Este software puede ser usado para analizar nuevos y complejos diseños ópticos que previamente no se podían modelar.

SolTRACE posee las siguientes funcionalidades:

- 1) Interfaz gráfica básica, pero modular.

<sup>22</sup> Fuente: Tonatiuh.exe versión 1.1.0, lanzada en agosto 2010.

<sup>23</sup> URL de descarga: [http://www.nrel.gov/csp/troughnet/models\\_tools.html#soltrace](http://www.nrel.gov/csp/troughnet/models_tools.html#soltrace)

<sup>24</sup> National Renewable Energy Laboratory

- 2) Trazado de rayos aleatorio con opción de elegir el tipo de modelo de sol a elegir.
- 3) Amplia gama de geometrías definidas disponibles para analizar.
- 4) Opciones adicionales referentes a la naturaleza óptica de las superficies disponibles para modificación, como emisividad, transmisividad, rugosidad, etc.
- 5) Analizador de datos generados por trazado de rayos incluido.
- 6) Entrega información de trazado en forma de tablas.

Este software posee una funcionalidad robusta, pero su utilización es compleja, a pesar de tener incorporado un manual de uso, debido a la gran cantidad de pasos previos para realizar un trazado de rayos correcto. Definir las geometrías a analizar y su posición relativa entre una y otra y el sol, es complejo. Además el mismo usuario debe calcular por sí mismo el modelo de sola a utilizar e ingresar en forma discreta la distribución energética del disco solar para cada radio entre 0 y 16' de arco.

No se encuentra información sobre su estado de desarrollo en el sitio de descarga.

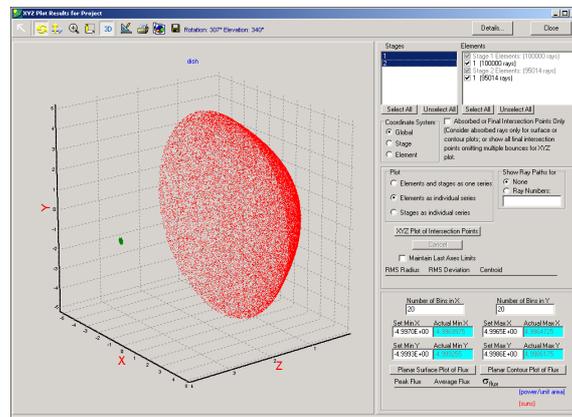


Figura 21: SolTRACE en funcionamiento.<sup>25</sup>

### 3.6.2 Principios básicos para implementar un método de trazado de rayos.

#### 1- Ecuación del rayo

Los rayos, geoméricamente hablando, se caracterizan por su origen  $O = (o_x, o_y, o_z)$ , y su vector dirección normalizado  $D = (d_x, d_y, d_z)$ , lo que permite definirlos mediante la siguiente ecuación paramétrica:

$$R(t) = O + D \cdot t \quad (3.28)$$

Ecuación que puede reescribirse considerando cada componente por separado:

<sup>25</sup> Fuente: SolTRACE.exe, versión 07.14.10. Fecha de lanzamiento desconocida.

$$x(t) = \mathbf{o}_x + \mathbf{d}_x \cdot t \quad (3.29)$$

$$y(t) = \mathbf{o}_y + \mathbf{d}_y \cdot t \quad (3.30)$$

$$z(t) = \mathbf{o}_z + \mathbf{d}_z \cdot t \quad (3.31)$$

## 2- Intersección con un Objeto

Los objetos, en este caso concentradores, se suelen definir mediante superficies geométricas como esferas, cilindros o planos. La ventaja de este tipo de entidades es que se pueden generalizar mediante una ecuación implícita de la siguiente forma:

$$S(x, y, z) = 0 \quad (3.32)$$

Los puntos  $(x, y, z)$  para los que se cumple la ecuación representan los puntos que se encuentran sobre la superficie del objeto, de forma que los puntos de intersección entre un rayo y dicha superficie se obtienen sustituyendo en la ecuación de la superficie la ecuación del rayo, y resolviendo por  $t$ :

$$S(\mathbf{o}_x + \mathbf{d}_x \cdot t, \mathbf{o}_y + \mathbf{d}_y \cdot t, \mathbf{o}_z + \mathbf{d}_z \cdot t) = S'(t) = 0 \quad (3.33)$$

Los puntos que satisfacen ambas ecuaciones al unísono (3.28) y (3.32) son puntos que se encuentran al mismo tiempo en el rayo y la superficie, o sea, son puntos de intersección entre ambos.

El cálculo de intersecciones se reduce así a encontrar todos los valores reales de  $t$  que verifican la ecuación. Los valores de  $t$  encontrados, y evaluados en la ecuación del rayo, proporcionarán los puntos del espacio en que se producen dichas intersecciones.

Dependiendo de la dirección del rayo, y la forma de la superficie del objeto contra la que se compruebe la intersección, se puede obtener cero, una ó más soluciones reales. La intersección con menor valor de  $t$  será la más cercana al punto de partida del rayo. Los valores negativos corresponderán a puntos situados por detrás del origen del rayo, en sentido contrario a su dirección, por lo que no se tendrán en cuenta. Y las raíces imaginarias (no reales) se interpretarán como que no se produce intersección.

Así, si  $t_i$  es el valor de  $t$  para el que se produce una intersección, entonces el punto interseccionado  $I = (i_x, i_y, i_z)$  es:

$$I = R(t_i) = O + D \cdot t_i \quad (3.34)$$

O escribiendo cada componente por separado:

$$I_x = o_x + d_x \cdot t_i \quad (3.35)$$

$$I_y = o_y + d_y \cdot t_i \quad (3.36)$$

$$I_z = o_z + d_z \cdot t_i \quad (3.37)$$

### 3- Normal al Punto de Intersección con un Objeto

Una vez determinado el punto de intersección  $I$  con un objeto, se debe calcular la normal  $N_i$  al objeto en dicho punto. Esto es fundamental para aplicar las leyes de reflexión de Snell para calcular el rebote de dicho rayo al caer en la superficie concentradora.

La normal de un objeto en un punto concreto de su superficie es un vector perpendicular a la superficie en dicho punto, y realmente, cuando se habla de calcular la normal, se habla de calcular la dirección de dicho vector perpendicular. Por ejemplo, la dirección de la normal en un punto concreto de la superficie de una esfera la marca la dirección que une el centro de la esfera con dicho punto. En cambio, la normal en cualquier punto de la superficie de un plano totalmente horizontal es un vector totalmente vertical. Es decir, que la forma de obtener la normal varía significativamente en función del tipo de objeto, ya que su cálculo depende completamente de la forma del mismo, y no puede estudiarse de forma global, debe hacerse individualmente.

Otro factor a tener en cuenta a la hora de calcular la normal es saber si la intersección con el rayo se produce en la cara interior o exterior del objeto. Y aunque en principio pueda resultar bastante difícil de calcular, en realidad es bastante sencillo gracias al producto escalar, ya que si dos vectores apuntan hacia un mismo lado de un plano el signo de dicho producto es positivo, y si lo hacen hacia lados contrarios es negativo. Con lo que, si el signo del producto escalar entre la normal y el rayo es negativo entonces el rayo incide en la cara exterior del objeto (apunta en dirección contraria a la normal), y si es positivo incide sobre la cara interior (apunta en la misma dirección que la normal). El valor cero corresponde al caso en que ambos vectores son perpendiculares, es decir, el rayo es tangente al objeto.

Si se conoce la ecuación de la superficie  $S(x, y, z) = 0$  entonces el vector unitario normal se calcula simplemente como:

$$N = \frac{\nabla S}{\|\nabla S\|} = \frac{(S'_x, S'_y, S'_z)}{\sqrt{S'^2_x + S'^2_y + S'^2_z}} \quad (3.38)$$

### 4- Reflexión Especular Perfecta

El fenómeno de reflexión se produce cuando un rayo de luz rebota contra la superficie de un objeto. Y la reflexión especular no es más que un caso particular de este fenómeno, que se produce cuando el ángulo de salida del rayo es igual al ángulo de llegada, tomando como referencia la normal a la superficie en el punto de incidencia. Es decir, cuando el rayo sale rebotado con el mismo ángulo con el que incide sobre la superficie.

Sea  $I$  el vector unitario que representa la dirección con la que incide el rayo de luz sobre la superficie (calculado según (3.34) y luego normalizado),  $N$  la normal al punto de incidencia (calculado según (3.38)), y  $R$  la dirección en la que sale rebotado el rayo.

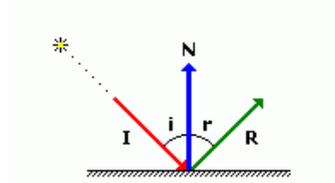


Figura 22: Esquema de  $I$ ,  $N$  y  $R$ .<sup>26</sup>

El problema a resolver consiste en encontrar  $R$ , y para resolverlo hay que tener en cuenta que el ángulo de incidencia  $i$  es igual que el de reflexión  $r$ .

Finalmente, la expresión del vector unitario  $R$  que representa la dirección en la que sale reflejado un rayo debido al fenómeno de reflexión especular es [12]:

$$R = I - 2 * (I \cdot N) * N \quad (3.39)$$

## 5- Simulaciones Monte Carlo

El método de Monte Carlo es un método no determinístico o estadístico numérico usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud. El método se llamó así en referencia al Casino de Montecarlo (Principado de Mónaco) por ser “la capital del juego de azar”, al ser la ruleta un generador simple de números aleatorios. El nombre y el desarrollo sistemático de los métodos de Monte Carlo datan aproximadamente de 1944 y se mejoraron enormemente con el desarrollo de la computadora.

Si bien no es imprescindible la implementación de un trazado de rayos aleatorio, su utilización es recomendable pues evita los errores sistemáticos derivados de la realización de un barrido ordenado (lanzamiento ordenado de rayos).

Para su implementación se deben generar números al azar en torno al área de lanzamiento de rayos que definan los orígenes de estos mismos (posiciones  $o_x$ ,  $o_y$ ,  $o_z$ ).

---

<sup>26</sup> Fuente: <http://www.inmensia.com/articulos/raytracing/mecanismosluz.html>

## 4. Desarrollo

---

### 4.1 Descripción del Programa

En esta sección se describe en forma general, el programa de trazado de rayos tridimensional desarrollado durante la memoria. En secciones inmediatamente posteriores a ésta se describe en detalle su funcionamiento y lógica.

Para una comprensión total de su funcionamiento interno, es necesario complementar la información de este capítulo con el código fuente del programa, el cual es presentado en los anexos digitales.

El programa tiene una estructura definida por una interfaz gráfica, la cual cuenta con un conjunto de imágenes y objetos para representar la información y acciones disponibles, con selección de menús contextuales y parámetros definibles por el usuario. Entrega resultados en pantalla en forma de gráficos de trazado de rayos y distribuciones de concentraciones energéticas. Es capaz de generar archivos de datos a partir de los resultados computados y además posee la opción de guardar las imágenes obtenidas para su posterior análisis.

Su interfaz gráfica de usuario, proporciona un entorno visual sencillo que permite una interacción amigable del usuario con la computadora.

Se ha escrito en lenguaje MATLAB, el cual es una simplificación del lenguaje C+, sobre la plataforma MATLAB versión R2009b y posteriormente ha sido compilado con MATLAB Compiler Runtime (MCR) para crear un archivo ejecutable en cualquier computador, sin la necesidad de tener previamente instalada la plataforma de programación.

Ocupa tres elementos principales los cuales deben ser definidos por el usuario: Reflector (Concentrador solar), Absorbente (Receptor) y Rayos. Posee una sencilla estructura modular para facilitar aún más su utilización.

Los rayos solares, reflectores y absorbentes, están modelados en base a conceptos de geometría analítica, así como los procedimientos de cálculo de intersección y reflexión. El sistema de coordenadas espacial es del tipo cartesiano, cuyo origen está en el centro de los gráficos tridimensionales que entrega el programa.

### 4.1.1 Hipótesis

Las hipótesis de trabajo del programa son:

- a- Se considera el rayo solar como un ángulo sólido de magnitud  $2\epsilon_0=32'$ , magnitud dada por el diámetro aparente del sol visto desde la tierra.
- b- Al ángulo sólido del rayo solar se le asocia una distribución energética dada por la ecuación (3.2) en conjunto con (3.3) y (3.1).
- c- Se divide el rayo solar en un número finito de subrayos, cada uno de los cuales transporta una fracción de la energía total del rayo. Esta fracción de energía está dada por la distribución que define la ecuación (3.2). Las divisiones del rayo se denominan subrayos, y el programa trabaja con éstos como rayos incidentes, reflejados, re-reflejados, y/o absorbidos.
- d- Reflexión especular: se considera que las reflexiones de los subrayos cumplen con la ecuación (3.4). Los efectos de dispersión debido al reflector se pueden asimilar mediante un ángulo sólido de mayor magnitud definido por el usuario.
- e- Reflectividad constante: se considera la reflectividad del concentrador como una constante del material.
- f- Absortividad: se supone una absortividad constante e igual a la unidad en el receptor.

### 4.1.2 Alcances

Con las suposiciones indicadas y la manera como se desarrolló el programa, éste tiene limitaciones. La primera, y la más importante, es que se ha diseñado como una herramienta auxiliar de trabajo, y sólo es útil para estudiar el comportamiento óptico de los concentradores solares.

Otra limitación que tiene, es que sólo analiza seis tipos de concentradores (Casquete hemisférico, Cilindro parabólico, Paraboloide, Cónico, Cilindro parabólico compuesto 2D y Cilindro parabólico compuesto 3D), y dos tipos de receptores (cilíndrico y rectangular).

A pesar de sus limitaciones, es posible modificarlo y expandirlo para mejorar el análisis. La estructuración empleada permite crear nuevas subrutinas (por ejemplo de transferencia de calor), incorporar nuevos tipos de concentradores, o modificar algunas suposiciones del programa (como la distribución energética dentro del rayo solar).

## 4.2 Estructura externa del Programa

La estructura externa del programa está dada por su interfaz grafica que se muestra en la Figura 23, sin embargo para su correcta ejecución se debe seguir una simple estructura lógica la cual es mostrada en la Figura 24, mediante un esquema en forma de diagrama de flujo. Posteriormente se detallan en extensión los diferentes módulos que componen la ejecución externa del programa.

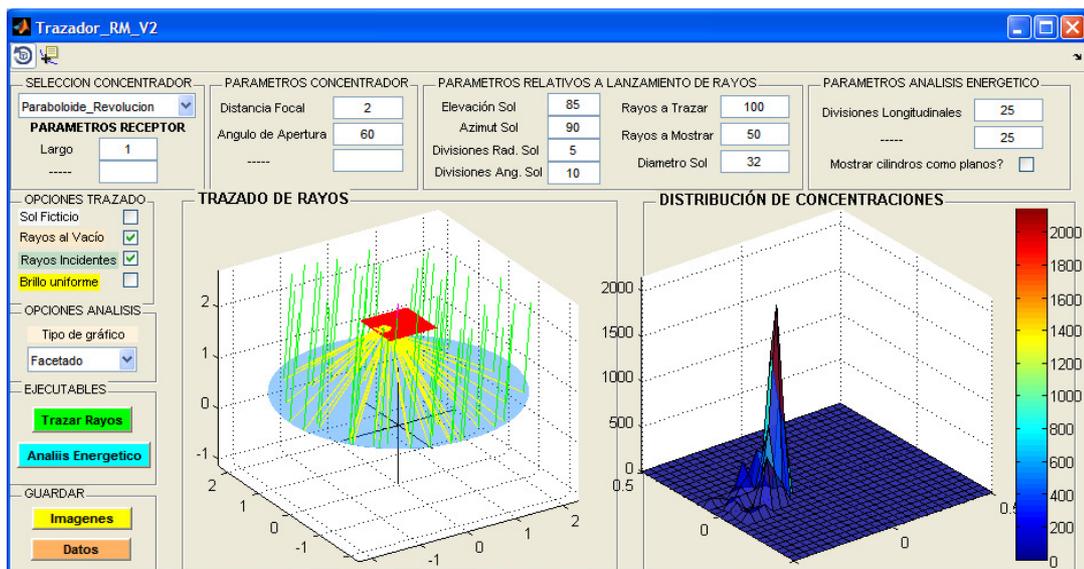


Figura 23: Interfaz Gráfica de Usuario.

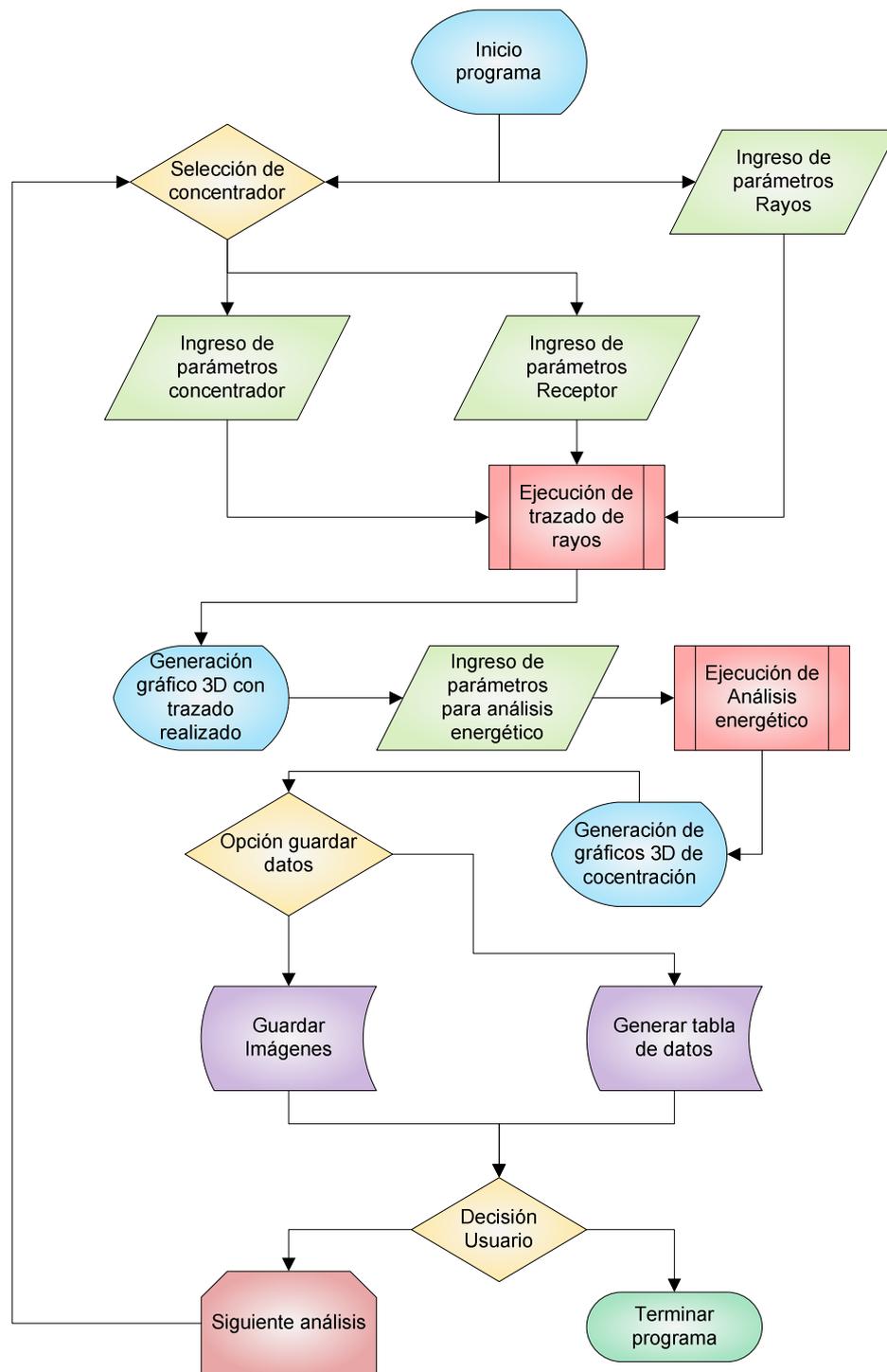


Figura 24: Esquema estructura lógica externa del programa.

### 4.2.1 Selección del concentrador

Después de poner en marcha el programa, las primeras opciones disponibles activas para el usuario son dos: "Selección de modelo de concentrador a analizar" e "Ingreso de parámetros de rayos". Estas opciones son independientes entre sí por lo que se pueden aplicar cambios a éstas conmutativamente.

La selección del modelo del concentrador a analizar es simple. Consta de una lista desplegable donde aparecen los seis modelos incluidos en este software:

- 1- **Concentrador Cilindro Parabólico.**
- 2- **Concentrador de Casquete Hemisférico.**
- 3- **Concentrador Paraboloides de Revolución.**
- 4- **Concentrador Cónico.**
- 5- **Concentrador Parabólico Compuesto Bidimensional.**
- 6- **Concentrador Parabólico Compuesto Tridimensional.**

Una vez realizada esta selección, se activan los campos de "Ingreso de parámetros de concentrador" e "Ingreso de parámetros Receptor".

### 4.2.2 Ingreso de parámetros Rayos

Los parámetros referentes a la creación de rayos pueden subdividirse en tres categorías:

#### 1- **Parámetros de posición del sol.**

Se debe ingresar la posición relativa del Sol al concentrador, estando éste orientado a lo largo en dirección Norte-Sur y en el origen de coordenadas de un sistema cartesiano tridimensional.

Se debe ingresar la elevación solar y el azimut en grados sexagesimales, siendo el azimut creciente a partir del norte ( $0^\circ$ ) hacia el este ( $90^\circ$ ). La elevación corresponde el ángulo formado con el plano horizontal.

Los valores permitidos de azimut son: entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$  y para la elevación: entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ; esto para obtener una correspondencia unívoca para la posición del sol.

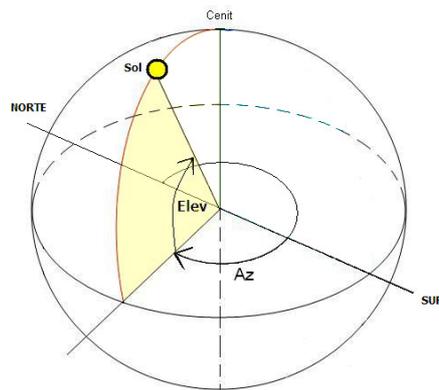


Figura 25: Ángulos para definir posición del sol.<sup>27</sup>

La opción de visualización de la esfera solar puede activarse/desactivarse en esta sección.<sup>28</sup> En la Figura 26 se muestra un concentrador Cilindro Parabólico con el sol en una posición relativa de azimut  $0^\circ$  y elevación  $90^\circ$ , con la esfera solar de referencia graficada.

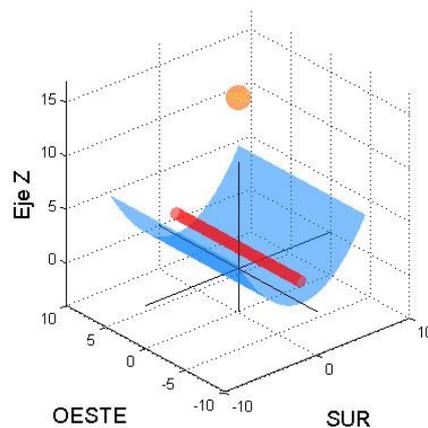


Figura 26: Muestra de orientación y posición de concentradores y sol.

## 2- Parámetros de lanzamiento de rayos.

Se debe definir aquí:

- Cantidad de rayos principales a lanzar **CR** (conos solares divididos en subrayos)

Estos corresponden a la cantidad de rayos que incidirán sobre la superficie de apertura del concentrador, pudiendo alcanzar el concentrador o su receptor. El tiempo de ejecución varía según el procesador que posea cada computador, pero la variación es lineal con respecto a la cantidad de rayos lanzados. Se recomienda realizar simulaciones con 100, 500 y 1000 rayos principales para estimar los tiempos de ejecución para cada concentrador según el computador que se esté usando.

<sup>27</sup> Fuente: Imagen modificada desde: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Acimut.JPG>

<sup>28</sup> Nota: Para trazados de muchos rayos, a veces ésta interfiere con la visualización.

- b) Cantidad de rayos principales y sus subrayos a mostrar por el programa de trazado.

Es importante tener en cuenta que la visualización de demasiados rayos puede crear una imagen saturada para ciertos casos y que además consume recursos extras del computador, por lo que ralentiza la ejecución total del programa. Se recomienda ir probando de a pocos rayos en un principio (100) e ir aumentando iterativamente este número para lograr una imagen que despliegue una visualización comprensible.

### 3- Parámetros de cono luz.

Se debe definir aquí:

- a) Diámetro aparente del sol a considerar ( $D_s$ )

El diámetro aparente del sol visto desde la Tierra, ronda en torno a los 32', pero este puede ser modificado por el usuario para aplicar el modelo de "mayor diámetro solar" cuya aplicación objetiva se detalla en la sección 3.2.3.

- b) Número de divisiones angulares del disco solar ( $A_s$ )

En la práctica se refiere a la cantidad de zonas definidas por las divisiones angulares del disco solar.

- c) Número de divisiones radiales del disco solar ( $R_s$ )

En la práctica se refiere a la cantidad de zonas definidas por las divisiones radiales del disco solar.

El número total de subrayos del que saldrán del disco solar seccionado será de  $(A_s * R_s) + 1$  (debido a la suma del rayo del centro), siendo la configuración mínima aceptada  $A_s=3$ ,  $R_s=1$ , para obtener simetría circular. En la Figura 27 se muestra: a)  $A_s=3$ ,  $R_s=1$ ; b)  $A_s=4$ ,  $R_s=2$ .

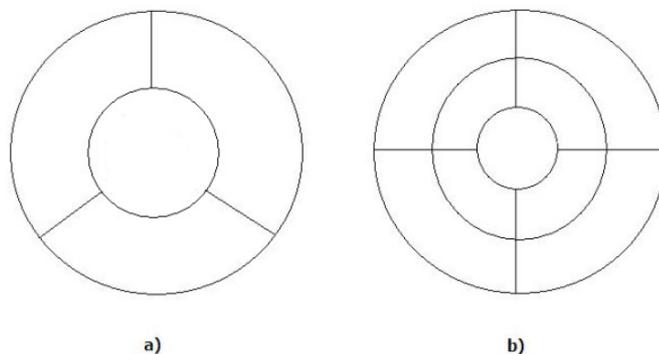


Figura 27: Muestra de divisiones de disco solar.

A considerar: En realidad el número total de rayos a lanzar ( $R_T$ ), sin contar los rayos que no dan en el blanco, está dado por:

$$R_T = CR \cdot (A_s \cdot R_s + 1) \quad (4.1)$$

Donde:

$CR$ =Cantidad de rayos principales a trazar.

$A_s$ =Numero de divisiones angulares del disco solar.

$R_s$ =Numero de divisiones radiales del disco solar.

### 4.2.3 Ingreso de parámetros Concentrador

Una vez que se ha seleccionado el tipo de concentrador a analizar, se activan las opciones para ingresar los parámetros del concentrador seleccionado. Estos parámetros definen completamente la geometría de los concentradores estudiados. Las unidades angulares para ingreso de datos son grados sexagesimales y las unidades de longitud pueden ser cualquiera (pero congruentes entre sí), ya que los resultados finales de concentración se entregan en forma adimensional. Cada modelo tiene sus propios parámetros particulares a definir, los cuales se indican a continuación.

#### 1- Concentrador Cilindro Parabólico.

Está parametrizado en torno a 3 variables:

- a) Distancia focal ( $f$ ).
- b) Ángulo de Apertura ( $\psi$ ).
- c) Largo.

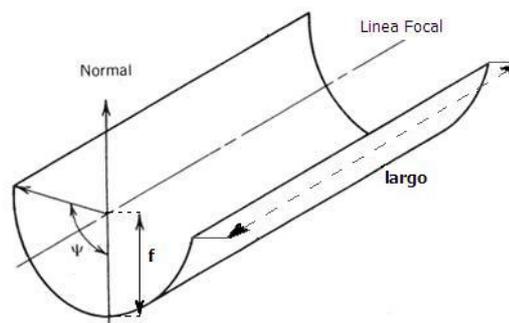


Figura 28: Parámetros para concentrador Cilindro Parabólico.<sup>29</sup>

---

<sup>29</sup> Fuente: Imagen modificada desde: <http://www.powerfromthesun.net/Chapter8/Chapter8new.htm>

## 2- Concentrador de Casquete Hemisférico.

Está parametrizado en torno a 2 variables:

- a) Radio de Casquete (R).
- b) Ángulo de Apertura ( $\theta$ ).

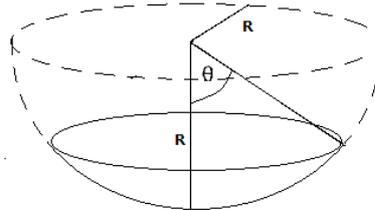


Figura 29: Parámetros para concentrador de Casquete hemisférico.

## 3- Concentrador Paraboloide de Revolución.

Está parametrizado en torno a 2 variables:

- a) Distancia focal (f).
- b) Ángulo de apertura ( $\theta$ ).

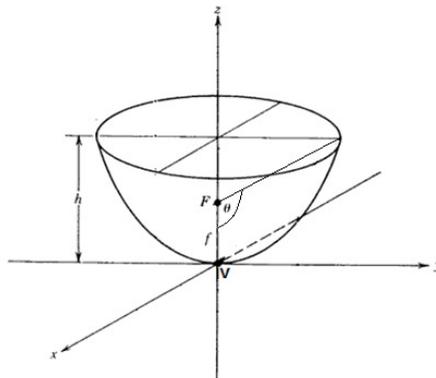


Figura 30: Parámetros para concentrador Paraboloide de Revolución.<sup>30</sup>

## 4- Concentrador Cónico.

Está parametrizado en torno a 2 variables:

- a) Altura de cono generador (h).
- b) Ángulo de Apertura ( $\gamma$ ).

---

<sup>30</sup> Fuente: Imagen modificada desde: <http://www.powerfromthesun.net/Chapter8/Chapter8new.htm>

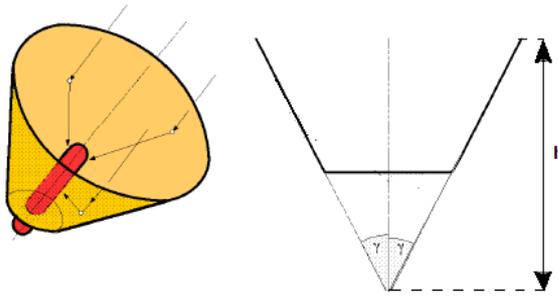


Figura 31: Parámetros para concentrador Cónico.<sup>31</sup>

### 5- Concentrador Parabólico Compuesto Bidimensional.

Está parametrizado en torno a 3 variables:

- Diámetro de apertura ( $2\alpha$ ).
- Diámetro de recepción ( $2\alpha'$ ).
- Largo ( $l$ ).

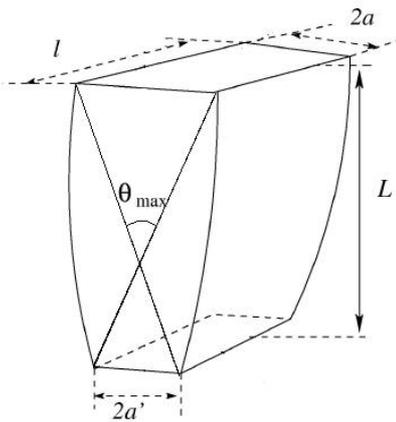


Figura 32: Parámetros para concentrador Parabólico Compuesto Bidimensional.<sup>32</sup>

### 6- Concentrador Parabólico Compuesto Tridimensional.

Está parametrizado en torno a 2 variables:

- Diámetro de apertura ( $2\alpha$ ).
- Diámetro de recepción ( $2\alpha'$ ).

<sup>31</sup> Fuente: Imagen modificada desde: <http://libros.redsauce.net/>

<sup>32</sup> Fuente: Imagen modificada desde: "Concentrador parabólico compuesto: una descripción opto-geométrica" por S. Tapia S. y J.A. del Río P.; REVISTA MEXICANA DE FÍSICA 55 (2) 141–153 DICIEMBRE 2009.

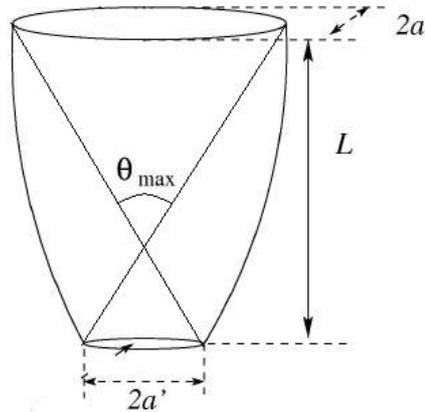


Figura 33: Parámetros para concentrador Parabólico Compuesto tridimensional.<sup>33</sup>

#### 4.2.4 Ingreso de parámetros Receptor

Cada concentrador tiene asociado uno y solo un modelo de receptor, por lo que luego de definir los parámetros geométricos del concentrador, es necesario definir los parámetros geométricos de su receptor, para la mayoría de los modelos.

- 1- **Concentrador Cilindro Parabólico.**
- 2- **Concentrador de Casquete Hemisférico.**
- 3- **Concentrador Cónico.**

Los tres modelos anteriores tienen asociado un receptor de tipo cilíndrico para la concentración del flujo solar incidente, al cual se le debe definir su radio y en el caso de los concentradores (2) y (3) su largo.

- 4- **Concentrador Paraboloide de Revolución.**

Este modelo de concentrador tiene asociado un receptor de placa plana, de lados iguales, por lo que basta definir el valor del largo de esta placa.

- 5- **Concentrador Parabólico Compuesto Bidimensional.**
- 6- **Concentrador Parabólico Compuesto Tridimensional.**

Estos modelos de concentradores autodefinen el tamaño de sus receptores planos los cuales se ubican en sus respectivas bases, dando forma a un receptor rectangular (Caso CPC 2D) y un receptor tipo disco (Caso CPC 3D).

---

<sup>33</sup> Fuente: Imagen modificada desde: “**Concentrador parabólico compuesto: una descripción opto-geométrica**” por S. Tapia S. y J.A. del Río P.; REVISTA MEXICANA DE FÍSICA **55** (2) 141–153 DICIEMBRE 2009.

#### 4.2.5 Opciones adicionales para trazado de Rayos

Las opciones adicionales para el trazado de Rayos, se encuentran en la parte izquierda de la interfaz en forma de casillas de verificación y presentan las siguientes funcionalidades:

- 1- **Sol Ficticio:** Muestra una esfera que denota la posición relativa del Sol según los parámetros ingresados, a la posición de la superficie concentradora. El rayo azul oscuro que une este Sol ficticio con el origen del sistema tridimensional, corresponde al rayo guía, el cual define la dirección de todos los rayos incidentes en la superficie de apertura del concentrador. La esfera solar es mostrada de color amarillo con naranja.
- 2- **Rayos al Vacío:** Muestra a los rayos que luego de rebotar en la superficie concentradora, no logran dar en la superficie receptora y se pierden en el vacío. Estos se muestran en color morado.
- 3- **Rayos Incidentes:** Muestra todos los rayos principales guías que llegan e intersectan al concentrador o al receptor. Estos se muestran en color verde.
- 4- **Brillo Uniforme:** Esta opción, modifica el modelo de sol utilizado para el trazado de rayos, convirtiendo al sol en una esfera de brillo uniforme. El sol en estas condiciones, entrega la misma cantidad de energía que con el modelo de mayor brillo en el centro y caída en los bordes, pero distribuida de manera constante a lo largo del disco solar.

#### 4.2.6 Ejecución de trazado de Rayos

Con todos los parámetros definidos, el programa está listo para comenzar el trazado de rayos a petición del usuario. Una vez solicitada la ejecución del trazado, el programa invoca la subrutina “Motor de Trazado de Rayos” (entre otros procesos) la cual se encarga del **cálculo** y la **generación de los gráficos tridimensionales**. Esta subrutina es analizada en detalle en la sección 4.5.

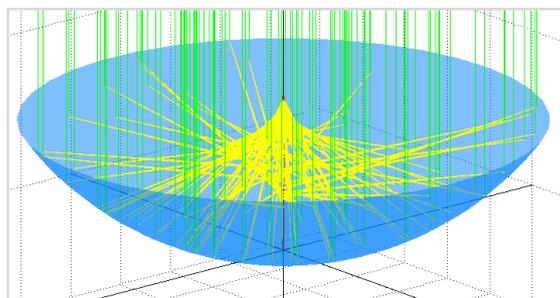


Figura 34: Zoom sobre grafica de trazado de 100 rayos (principales) sobre casquete hemisférico.

#### 4.2.7 Ingreso de parámetros para análisis energético

Luego de que el trazado de rayos ha concluido, se activa la opción para la ejecución del Análisis Energético, mediante el cual es posible conocer la distribución del flujo energético captado por el receptor, la concentración global, las pérdidas ópticas y la eficiencia óptica.

Para llevar a cabo este análisis, primero se debe ingresar las (i,j) divisiones en que se separará al receptor (para la creación de una malla de análisis). Dependiendo del tipo de receptor, estos parámetros (i,j) significarán distintas formas de dividir el receptor ya sea a lo largo y ancho, a lo largo y angularmente, radial y angularmente, etc.

La naturaleza de las divisiones es indicada por el mismo programa en la opción de ingresar divisiones.

#### 4.2.8 Opciones de visualización para Análisis energético

Las opciones de visualización para el Análisis energético, se encuentran repartidas en la interfaz y poseen las siguientes funcionalidades:

**1- Tipo de gráfico:** se encuentra como un menú desplegable en la izquierda de la interfaz, el cual posee las opciones “Facetado”, “Interpolado”, “Plano”. La funcionalidad de esta opción se activa **una vez que ya** se ha realizado el análisis energético y actúa cambiando la forma en que se muestra el gráfico generado. “Facetado”, entrega un gráfico dividido en facetas, “Interpolado” un gráfico suavizado en los bordes y “Plano” entrega un gráfico que no muestra las divisiones tipo facetas.

**2- Mostrar cilindros como planos:** se encuentra como casilla de verificación en la parte superior derecha de la interfaz. La funcionalidad de esta opción, se debe activar antes de realizar el análisis energético y actúa mostrando los receptores de tipo cilíndrico como planos. Esta opción no afecta al resto de receptores.

#### 4.2.9 Ejecución de Análisis energético

Con los parámetros anteriores definidos, el programa se encuentra listo para la ejecución del análisis energético y la consiguiente **generación de gráficos 3D con distribución de concentraciones de flujo energético**. Todo esto se realiza mediante la invocación de la subrutina “Motor de análisis energético” que se analiza en detalle en la sección 4.6. Esta subrutina además es la encargada de guardar en memoria los datos de concentración global, concentración local, pérdidas ópticas y eficiencia óptica para la posterior generación de tablas de datos.

#### 4.2.10 Opción de guardar datos

Una vez realizado el análisis energético, se activan las opciones de guardado de datos. Los formatos disponibles para guardar datos son los siguientes:

- 1- Imágenes en formato .jpg, .bmp y .tiff: Los gráficos 3D generados, tanto de Trazado de rayos como de Análisis Energético pueden ser guardados en este formato en la carpeta de ejecución del programa.
- 2- Tabla de datos en Excel: Los datos generados mediante la subrutina “Motor de Análisis Energético” pueden ser guardados en un archivo de Excel para ser revisados posteriormente. En este archivo .xls o .xlsx, creado se guardan los siguientes datos:
  - a- Datos de concentrador analizado y sus parámetros.
  - b- Datos de receptor utilizado y sus parámetros.
  - c- Datos relativos a los rayos lanzados.
  - d- Dato de factor de concentración medio obtenido.
  - e- Dato de eficiencia óptica obtenidos.
  - f- Matriz de concentraciones locales obtenida.

El guardado de datos en este archivo Excel se realiza en tablas planas (sin formato). El libro de Excel generado contiene dos hojas. La segunda hoja contiene la matriz de concentraciones locales obtenidas mientras que la primera contiene el resto de la información.

En las figuras siguientes se muestran imágenes de las tablas generadas tal y como se almacenan, posterior a un análisis energético.

RESUMEN DE SIMULACION	Fecha:	25-Oct-10	Hora:	3:26 PM
SUPERFICIE CONCENTRADORA SELECCIONADA		PARAMETROS RECEPTOR		
Paraboloide de Revolución		Largo	0.1	
PARAMETROS CONCENTRADOR				
Distancia Focal	2	PARAMETROS DE ANALISIS ENERGETICO		
Angulo de Apertura	60	Divisiones Longitudinales	10	
PARAMETROS DE LANZAMIENTO RAYOS				
Elevación Solar	90	FACTOR DE CONCENTRACIÓN DE FLUJO MEDIO		
Azimut Solar	0	1675.51608		
Divisiones Radiales Sol	5	EFICIENCIA OPTICA		
Divisiones Angulares sol	10	1		
Rayos ppales. lanzados	1000	TIEMPOS DE EJECUCION [s]		
Rayos ppales. Mostrados	0	Trazado De Rayos		
Rayos totales lanzados	51000	Análisis Energético		23.4372
Diametro aparente Sol	32	Análisis Energético		1.0012

Figura 35: Hoja 1 de archivo .xls generado.

MATRIZ DE FACTORES DE CONCENTRACIÓN DE FLUJO LOCALES													
Tipo de Receptor:	Placa plana cuadrada												
Largo\	LargoX	-0.05 a -0.0409	-0.04091 a -0	-0.03182 a -0	-0.02273 a -0	-0.01364 a -0	-0.004545 a 0	0.004545 a 0	0.01364 a 0	0.02273 a 0	0.03182 a 0	0.04091 a 0	0.05
-0.05 a -0.0409	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.04091 a -0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.03182 a -0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.02273 a -0	0	0	0	19.9070542	515.432903	1170.96426	560.948277	25.594784	0	0	0	0	0
-0.01364 a -0	0	0	0	530.877941	9029.16882	23219.002	9102.98378	520.718799	0	0	0	0	0
-0.004545 a 0	0	0	0	1282.16682	22490.8158	65857.543	22422.6498	1283.65729	0	0	0	0	0
0.004545 a 0	0	0	0	517.129699	9097.02769	23187.1364	9046.11622	525.79837	0	0	0	0	0
0.01364 a 0	0	0	0	28.4386489	572.200195	1161.94804	528.783451	17.0631893	0	0	0	0	0
0.02273 a 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.03182 a 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.04091 a 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 36: Hoja 2 de archivo .xls generado.

#### 4.2.11 Finalización de programa

Luego de realizar un análisis energético determinado, es posible continuar y realizar otro, o salir del programa.

#### 4.3 Estructura interna del programa

La estructura interna del programa, o más bien dicho su lógica de ejecución interna es mostrada en detalle en esta sección.

Para una comprensión global de la estructuración interna del programa, se presenta en la Figura 37 un diagrama de flujo en el cual se enlazan los diferentes módulos según su orden de ejecución lógico.

La descripción de los diversos módulos involucrados se realizará para aquellos que sólo se ejecuten de manera interna, para no tener que describir dos veces algún módulo ya descrito en la sección 4.1. Se describirán los módulos que cumplan con tal condición, salvo los siguientes que serán descritos en forma extensiva en secciones posteriores:

- a- Motor de creación de conos solares, el cual se describe en mayor detalle en la sección 4.4
- b- Motor de trazado de rayos, el cual se describe en mayor detalle en la sección 4.5.
- c- Motor de Análisis energético, el cual se describe en mayor detalle en la sección 4.6.

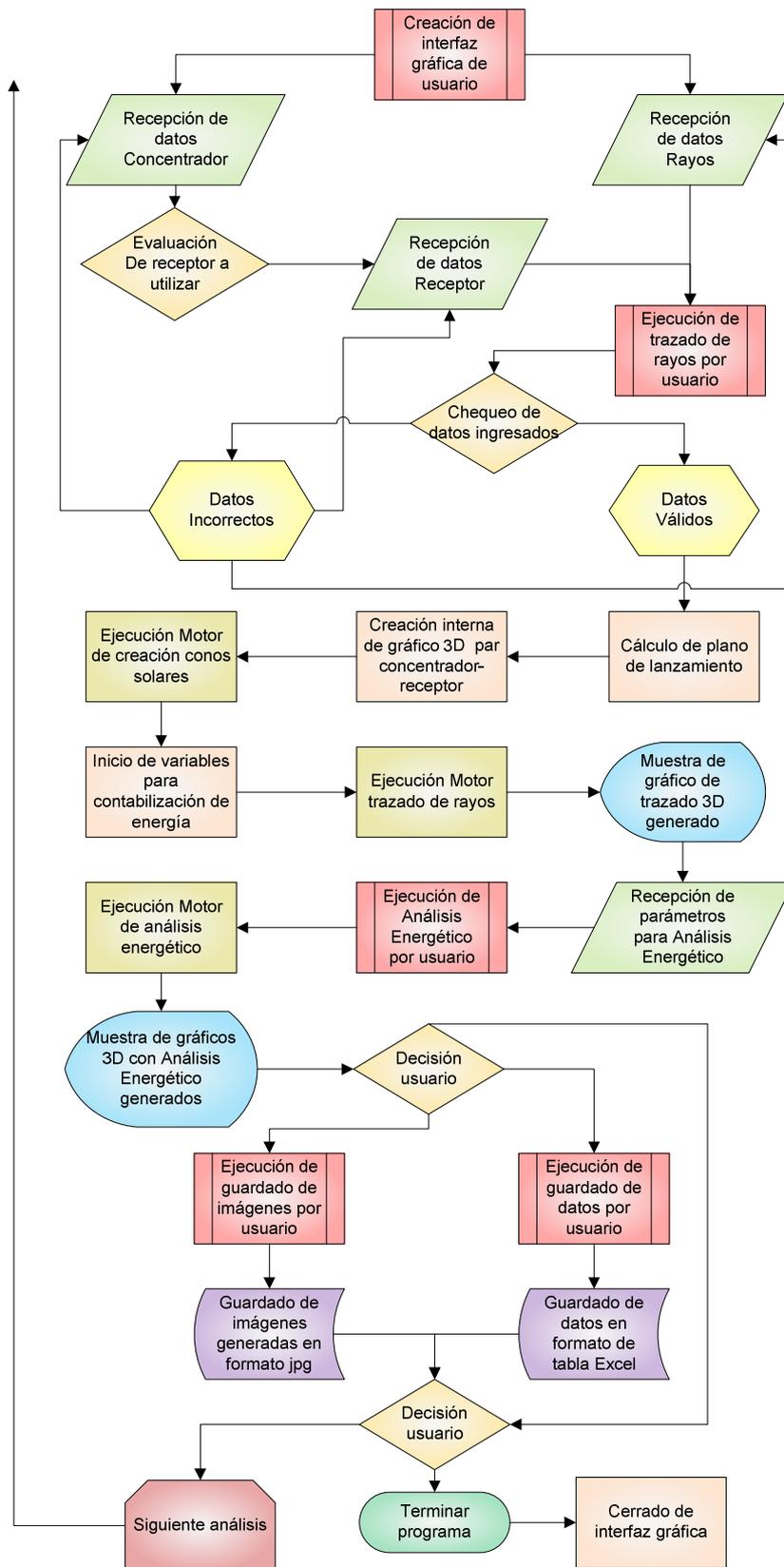


Figura 37: Estructura de Ejecución Interna del programa.

### **4.3.1 Creación de interfaz gráfica de usuario**

La primera tarea interna del programa es obviamente la creación de la interfaz de usuario, la cual da lugar al ingreso de los parámetros necesarios para su posterior y completa ejecución.

La interfaz gráfica fue creada con la ayuda del asistente de creación de interfaces gráficas de Matlab "GUIDE" el cual permite de manera simple crear una interfaz con variados elementos los cuales una vez creados, tienen la capacidad de ser utilizados como funciones para realizar la acción que el programador designe.

Es así como luego de crear en forma independiente el código fuente para el programa desarrollado, éste fue convenientemente asignado en forma funcional a los diversos elementos de la interfaz diseñada.

### **4.3.2 Ejecución de trazado de rayos por usuario**

El usuario luego de ingresar los parámetros pertinentes, presiona el botón "Trazar rayos", momento en el cual se realiza un chequeo inmediato sobre la validez de los datos ingresados. Se verifica que el rango de valores ingresados sea el correcto (no pueden ser negativos por ejemplo) y el tipo de valores ingresados (no pueden contener caracteres de letras u otro tipo de carácter, solo numéricos).

Luego de que los parámetros ingresados pasen el control de validez, se procede al siguiente módulo de ejecución interna, el cálculo del plano de lanzamiento.

### **4.3.3 Cálculo de plano de lanzamiento.**

Para el lanzamiento aleatorio de rayos, es necesario definir un sub-espacio desde el cual se elegirán los orígenes aleatorios de éstos. A este sub-espacio seleccionado se le designa como "Plano de lanzamiento". Este plano contiene al punto que representa la ubicación relativa del sol con respecto al concentrador solar y es a su vez perpendicular al vector dirección del Sol.

Se obtiene mediante la determinación de la ecuación del plano, dado un punto perteneciente al plano y un vector normal al plano.

Una vez obtenida la ecuación del plano de lanzamiento, es necesario acotar este plano infinito para tener un sub-plano definido para obtener los orígenes aleatorios de los rayos a lanzar. Para acotar se realiza el siguiente procedimiento:

- 1- Se calcula la intersección entre los rayos originados a partir de los vértices extremos del área de apertura del concentrador solar en estudio con vectores directores dados por la posición del sol con respecto al origen (dirección contraria de lanzamiento de rayos) y el

plano de lanzamiento recién determinado. A partir de este procedimiento se encuentran varios puntos dentro del plano de lanzamiento.

- 2- Del total de puntos encontrados, se calcula el promedio de éstos, con lo que se obtiene el punto central entre los puntos considerados.
- 3- Luego se calcula la distancia máxima a este punto central con respecto a los puntos obtenidos en un principio. Esta distancia máxima determina el “radio del disco de lanzamiento”. Este radio determina una zona espacial ubicada dentro del plano de lanzamiento desde la cual se pueden elegir puntos aleatorios para su lanzamiento sobre la superficie del concentrador. Si se mira desde el punto de vista del plano solar hacia el concentrador y se gráfica este disco de lanzamiento, se puede observar claramente que este disco contiene en su totalidad el área de apertura del concentrador, como se muestra en la Figura 38. La esfera solar sólo es una referencia que determina la dirección de los rayos incidentes sobre la superficie concentradora, a través de un rayo principal azul mostrado en la figura. No tiene por qué estar en medio del “disco de lanzamiento” recién determinado.

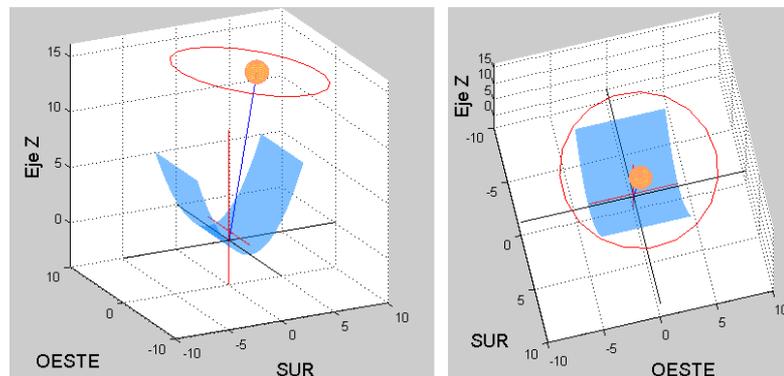


Figura 38: Plano de lanzamiento de rayos.

El proceso anterior sirve para acotar el área de lanzamiento y disminuir la cantidad de rayos lanzados que nunca darán en la zona de interés. Gracias a esto, se mejora el tiempo de ejecución global del programa.

Este disco de lanzamiento sin embargo, no es utilizable directamente para el lanzamiento de rayos, pues para elegir puntos aleatorios de éste, se debe elegir un radio aleatorio y un ángulo aleatorio. Este método produce acumulaciones centrales (se lanzan la mayoría de los rayos a partir del centro) a pesar de ser programados para salir desde cualquier lugar del disco. Este error de acumulación central fue observado en las primeras etapas de programación y se corrigió mediante el uso de una superficie de lanzamiento determinada por un cuadrado en lugar de un disco. El proceso sin embargo para determinar este cuadrado es el mismo que el anterior, hasta la parte de la determinación del radio del disco. Luego se elige un

cuadrado de lado 2\*”radio disco solar” para obtener una zona que circunscriba al disco de lanzamiento original. De esta forma se logró eliminar el error mencionado.

#### 4.3.4 Creación de gráficos 3D par concentrador – receptor

La creación de las superficies de los concentradores y los receptores es llevada a cabo internamente mediante el uso de las ecuaciones paramétricas, implementadas según los parámetros ingresados por el usuario.

Estas ecuaciones se aplican sobre matrices que representan un conjunto de puntos de partida (dominio) y que entregan una nueva matriz operada.

Luego se grafican las superficies entregando a Matlab las matrices X, Y, Z, que contienen la información de los puntos (x,y,z) de la superficie a dibujar.

Las ecuaciones generadoras para cada concentrador y su receptor propio se describen a continuación, teniendo en cuenta que los parámetros que dan forma final a estas expresiones ya fueron descritos previamente en la sección 4.2.3.

##### 1- Concentrador Cilindro Parabólico.

La ecuación que describe el perfil de un concentrador Cilindro Parabólico es:

$$z = \alpha * x^2 \quad (4.2)$$

Con:

$$\alpha = \frac{1}{4*f} \quad (4.3)$$

Donde  $f$  es la distancia focal.

El receptor asociado a este concentrador es un cilindro horizontal, el cual posee una ecuación generadora:

$$x^2 + (z - f)^2 = r^2 \quad (4.4)$$

Donde:

$f$ = distancia focal.

$r$ =radio de cilindro.

##### 2- Concentrador de Casquete Hemisférico.

La ecuación que describe el perfil de un concentrador de Casquete Hemisférico es:

$$z = R - \sqrt{R^2 - x^2 - y^2} \quad (4.5)$$

Donde  $R$  es el radio del casquete.

El receptor asociado a este concentrador es un cilindro vertical, el cual posee una ecuación generadora:

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (4.6)$$

Donde  $r$  es el radio del cilindro.

### 3- Concentrador Paraboloides de Revolución.

La ecuación que describe el perfil de un concentrador Paraboloides de Revolución es:

$$z = \alpha * (x + y)^2 \quad (4.7)$$

Con:

$$\alpha = \frac{1}{4*f} \quad (4.8)$$

Donde  $f$  es la distancia focal.

El receptor asociado a este concentrador es una placa plana, la cual posee una ecuación generadora:

$$z = f \quad (4.9)$$

Donde  $f$  es la distancia focal.

### 4- Concentrador Cónico.

La ecuación que describe el perfil de un concentrador Cónico es:

$$z = m * \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4.10)$$

Con:

$$m = \tan(90 - \alpha) \quad (4.11)$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo de apertura del cono.

El receptor asociado a este concentrador es un cilindro vertical, el cual posee una ecuación generadora:

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (4.12)$$

Donde:

$r$ =radio del cilindro.

### 5- Concentrador Parabólico Compuesto Bidimensional.

La ecuación que describe el perfil de un concentrador Parabólico Compuesto Bidimensional es:

$$z = 2L - \left[ \left( \frac{L}{a+a'} \right) (|x| + a') \right] - 2 \frac{a(a+a')}{a'} \sqrt{1 - \left[ \frac{|x|+a'}{a+a'} \right]} \quad (4.13)$$

Con:

$$L = -\cot \gamma * (a + a') \quad (4.14)$$

$$\gamma = \sin^{-1} \left( -\frac{a'}{a} \right) \quad (4.15)$$

Donde:

$2*\alpha$ = ancho de apertura de concentrador.

$2*\alpha'$ =ancho de receptor.

El receptor asociado a este concentrador es un rectángulo plano, el cual posee una ecuación generadora:

$$z = 0 \quad (4.16)$$

### 6- Concentrador Parabólico Compuesto Tridimensional.

La ecuación que describe el perfil de un concentrador Parabólico Compuesto Tridimensional es:

$$z = 2L - \left[ \left( \frac{L}{a+a'} \right) (\sqrt{x^2 + y^2} + a') \right] - 2 \frac{a(a+a')}{a'} \sqrt{1 - \left[ \frac{\sqrt{x^2+y^2}+a'}{a+a'} \right]} \quad (4.17)$$

Con:

$$L = -\cot \gamma * (a + a') \quad (4.18)$$

$$\gamma = \sin^{-1} \left( -\frac{a'}{a} \right) \quad (4.19)$$

Donde:

$2*\alpha$ = ancho de apertura de concentrador.

$2*\alpha'$ =ancho de receptor.

El receptor asociado a este concentrador es un disco plano, el cual posee una ecuación generadora:

$$z = 0 \quad (4.20)$$

#### 4.3.5 Variables para contabilización energética

Otro punto importante dentro de la ejecución interna del programa es la creación de variables que se irán incrementando dentro del ciclo de trazado de rayos y que indicarán diferentes conceptos que ayudarán a la contabilización y asignación de energía en la superficie receptora.

Estas variables se encargan de:

- a- Contabilizar la cantidad de rayos caídos en receptor.
- b- Contabilizar la cantidad de rayos interceptados en tapas de receptor (caso para receptores cilíndricos).
- c- Contabilizar la cantidad de rayos principales (conos completos) caídos en receptor.
- d- Contabilizar la cantidad de subrayos caídos en receptor.
- e- Almacenar la posición y la cantidad de energía de cada rayo que intersecta al receptor.
- f- Contabilizar la cantidad de rayos lanzados hasta el momento.
- g- Contabilizar el total de rayos principales lanzados (incluyendo los que no dan en el concentrador).

Todas estas variables son las que ayudan a generar posteriormente los análisis detallados de concentración en conjunto con el Motor de análisis Energético.

#### 4.4 *Motor de creación de conos solares.*

Esta subrutina es la encargada de la creación de los conos solares que incidirán sobre la superficie del concentrador y del receptor. Un esquema de su funcionamiento en forma de diagrama de flujo es presentado en la Figura 39 para su mayor comprensión.

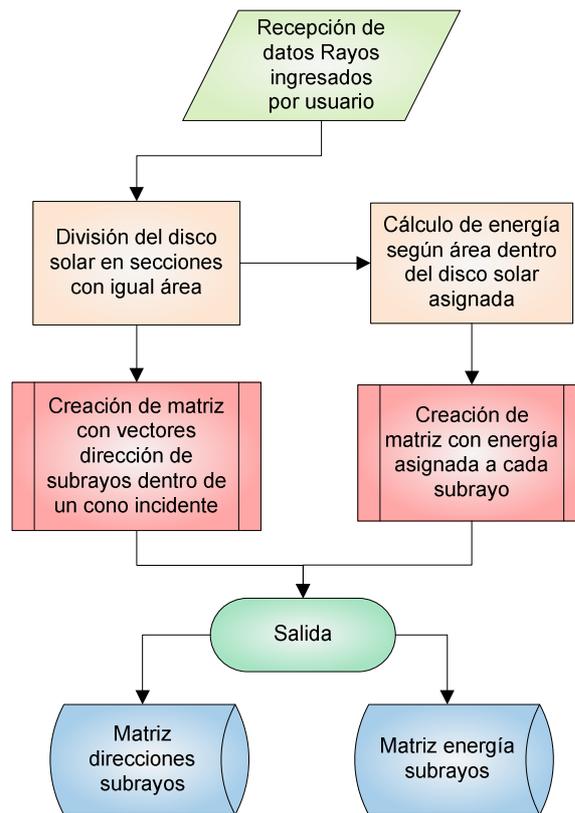


Figura 39: Esquema Motor de creación de conos Solares.

El motor de creación de conos solares básicamente crea los subrayos que se distribuyen al interior del cono solar, con una dirección principal dada por la posición del sol y el resto de las direcciones dadas por la geometría del cono.

Así mismo, se encarga de la asignación de la energía correcta para los subrayos.

Luego de su ejecución entrega 2 matrices, con la información de direcciones de rayos y con la información de energía de subrayos respectivamente.

#### 4.4.1 División del disco solar en secciones de igual área.

Como se mencionó en la sección 4.2.2 punto 3, se definen 3 parámetros para la creación de los conos solares:  $D_s$ ,  $A_s$  y  $R_s$ , los cuales definen:

- $D_s$ : Diámetro del cono solar (ángulo sólido que lo define).
- $A_s$  y  $R_s$ : Cantidad de divisiones del disco solar, dadas por  $(A_s * R_s + 1)$  (Ver Figura 27).

Por lo que para llevar a cabo una división del disco solar en secciones de igual área, se debe resolver el siguiente problema: dividir un disco de diámetro aparente  $D_s$  en  $(A_s * R_s + 1)$  secciones de igual área, con  $A_s$  divisiones angulares y  $R_s$  divisiones radiales más un disco central de tamaño por determinar (para el rayo central).

Este problema se reduce, si pensamos que las únicas variables a despejar son los radios que definen estas zonas dentro del disco solar.

La fórmula utilizada para despejar estos radios  $r_i$  es<sup>34</sup>:

$$r_i = \frac{D_s}{2} * \sqrt{\frac{A_s * (i-1) + 1}{A_s * R_s + 1}} \quad (4.21)$$

Con  $i$  desde 1 hasta  $R_s$

De esta forma se obtienen  $(A_s * R_s + 1)$  secciones dentro del disco solar con igual área y distribución simétrica circular.

#### 4.4.2 Creación de matriz con vectores dirección subrayos.

Con los radios ya despejados, se tiene un perfil del disco solar dividido en áreas iguales. Ahora es necesario decidir en qué lugar de cada sección se originará el subrayo que represente a dicha sección.

Debido a que al rebotar los subrayos en la superficie concentradora y luego caer en la superficie receptora, el cono inicial se transforma en una elipse como se muestra en la sección 3.3.7, Figura 19. Esto significa que se distribuye la energía en un área mayor y por ende el flujo disminuye e incluso muchas veces se pierde gran cantidad de éste.

Una aproximación para modelar esta situación es originar los subrayos desde la punta extrema del área que representan, para que ante la deformación del cono inicial, la distribución de energía sufra esta misma deformación y posible pérdida por una caída de los subrayos fuera del receptor.

En la Figura 40 se ilustra el modelo previamente señalado, donde los puntos rojos indican el origen de los subrayos para cada división de disco.

---

<sup>34</sup> Formula obtenida mediante inducción.

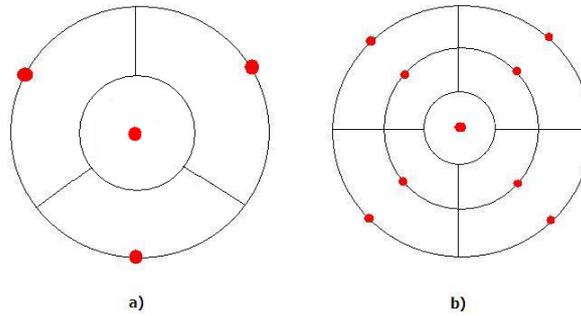


Figura 40: Origen de subrayos en rojo, a partir de disco solar dividido.

Ahora, el primer problema es determinar la posición de estos puntos. Como lo importante es la simetría del cono, observando la Figura 41 se puede notar que la distribución aquí es válida al igual que la distribución en la Figura 40, por lo que el problema se resuelve en forma directa, ya que se tienen los radios calculados mediante la fórmula (4.21) dada en la sección anterior y las divisiones  $A_s$  que determinan los ángulos de éstos puntos en coordenadas polares.

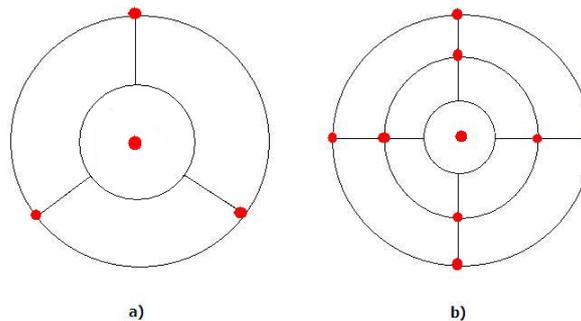


Figura 41: Puntos de lanzamiento de subrayos rotados.

Luego se deben calcular las direcciones de subrayos que determinan estos puntos. Para esto, es importante recordar que cada radio despejado con la fórmula (4.21) es en realidad un ángulo sólido que define un cono que va desde el Sol hasta la Tierra.

Considerando el concepto anterior, se puede generar fácilmente un cono de rayos recto con su vértice en el origen de un sistema cartesiano tridimensional describiendo cada extremo  $(x_i, y_i, z_i)$ , considerando que  $(R_{si}, A_{si})$  son parámetros angulares dentro de un sistema de coordenadas esféricas,

con,

$$R_{si} = r_i \quad (4.22)$$

calculado según ecuación (4.21) y

$$A_{si} = \frac{2\pi}{A_s} * i \quad (4.23)$$

para  $i$  desde 1 hasta  $A_s$ .

De esta manera se procede ahora a calcular los puntos  $(x_i, y_i, z_i)$  que definen las direcciones de los subrayos de un cono vertical con su vértice hacia abajo ubicado en el origen de un sistema de coordenadas cartesianas tridimensional:

$$x_i = \sin R_{si} * \cos A_{si} \quad (4.24)$$

$$y_i = \sin R_{si} * \sin A_{si} \quad (4.25)$$

$$z_i = \cos R_{si} \quad (4.26)$$

para  $i$  desde 1 hasta  $R_s * A_s$ .

Con lo que se tienen los vectores direcciones de un cono como el que se muestra en la Figura 42. Estas vectores se almacenan en una matriz  $V$ .

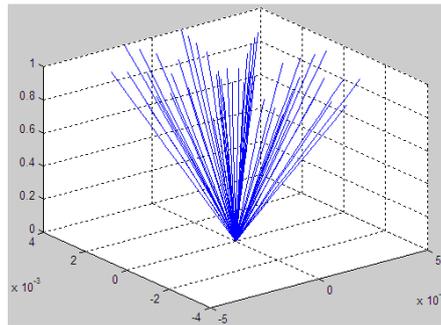


Figura 42: Cono generado a partir de direcciones de subrayos calculadas.

Ahora es necesario cambiar la orientación de este cono de acuerdo a la orientación relativa del Sol, lo cual se logra considerando que el azimut y la elevación solar pueden ser vistos interpretados como ángulos de rotación en torno al eje Z ( $\theta_Z$ ) y al eje X ( $\theta_X$ ).

Estos ángulos están dados por:

$$\theta_X = E_s - \frac{\pi}{2} \quad (4.27)$$

$$\theta_Z = A_z - \pi \quad (4.28)$$

Donde:

$E_s$  = Ángulo de elevación solar.

$A_z$ =Ángulo de azimut solar.

Con esto, se aplica a cada vector de direcciones  $(x_i, y_i, z_i)$  guardado en matriz  $V$  una multiplicación por matrices de rotación tridimensionales, para ajustar la dirección del cono a la dirección relativa del sol.

Estas matrices son  $R_x$ , matriz de rotación sobre el eje X y  $R_z$ , matriz de rotación sobre el eje Z, definidas por:

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0 \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Luego de esta rotación el cono queda orientado en la dirección correcta para incidir sobre el concentrador.

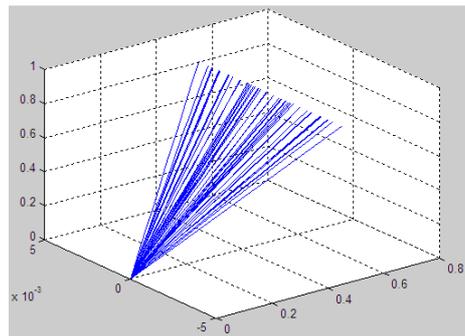


Figura 43: Cono luz rotado.

Los resultados se almacenan en una matriz de direcciones que sirve como base para cada cono que se lanza desde un origen aleatorio.

#### 4.4.3 Cálculo de energía según área dentro del disco solar asignada.

Para el cálculo de la energía de los rayos, es necesario recalcular los radios obtenidos en la sección 4.4.1, esta vez utilizando los parámetros  $A_s$ ,  $R_s$  y  $D_s=32'$ , pues si se utiliza otro valor para  $D_s$ , esto implicaría modificar el valor de la energía que entrega el disco solar. El valor modificado de  $D_s$  solo sirve para obtener nuevas direcciones de los vectores que componen los rayos del cono de luz, es decir, para crear conos de luz de diversos tamaños.

Con los nuevos radios  $r_i$  determinados, se procede a calcular la energía de los semidiscos solares determinados por estos radios, mediante la ecuación (3.2) presentada en la sección (3.1.2). Aquí, cada nuevo radio  $r_i$  calculado es el parámetro  $u$  de la ecuación (3.2).

Esta energía calculada, como corresponde a un semidisco, se debe asignar de acuerdo a las divisiones del disco solar. A modo de ejemplo:

La energía del rayo central que representa un área circular de radio  $r_1$ , no se divide.

La energía de los rayos que rodean al rayo central corresponde a la energía del semidisco de radio  $r_2$ , menos la energía del semidisco del radio  $r_1$ , dividido por  $A_s$ .

Y así sucesivamente hasta completar el disco solar por completo.

Cabe destacar que la Integral presentada en la ecuación (3.2) se resuelve numéricamente para cada caso, con un error de aproximación de  $10^{-5}$ , debido a que analíticamente no fue posible realizar.

Finalmente se obtienen los tipos de energía según el tipo de subrayo lanzado, entendiendo que su tipo de energía está determinado por el área que representa dentro del disco solar.

#### **4.4.4 Creación de matriz con energía asignada a cada subrayo.**

Con los tipos de energía determinados para cada tipo de subrayo, es necesario relacionar la energía obtenida junto con la posición del subrayo dentro del cono de luz.

Para esto se crea una matriz de energía de subrayos la cual está relacionada con la matriz de direcciones de subrayos, de tal forma que para una posición  $(i,j)$  dentro de la matriz de energía, se tiene la energía asociada a un subrayo con dirección  $(i,j)$  dentro de la matriz de direcciones.

#### **4.5 Motor de trazado de rayos**

El motor de trazado de rayos constituye el corazón del programa. La ejecución de esta subrutina determina todas las formas de información que se pueden obtener a partir de una simulación. Los demás motores y subrutinas se encargan de preparar los formatos de datos a recibir por el motor de trazado y a post-procesar la información entregada por éste.

El motor cuenta con una lógica de ejecución interna simple y a la vez sólida, la cual es utilizada casi sin modificaciones. Estas modificaciones que se realizan para cada tipo de

concentrador son en realidad simplificaciones para ahorrar tiempo, dado que existen casos que no se dan para todos. El motor es el mismo para todos los modelos analizados.

Estas simplificaciones por lo tanto, omiten parte del código que no es necesario, como el caso en que se analizan las intersecciones en zonas que no corresponden de los receptores, por ejemplo las tapas de receptores cilíndricos. Esta parte del código se omite para receptores planos, pero funciona de igual manera aún sin realizar esta simplificación.

El código de este motor, es bastante simple. Está constituido básicamente por dos ciclos anidados: uno para el lanzamiento de conos y otro para los rebotes de subrayos, en los cuales se van evaluando las funciones de intersección en cada iteración y se post-procesan continuando el ciclo y/o trazando los rayos generados en conjunto con el incremento de las variables auxiliares definidas en la sección 4.3.5.

La lógica de ejecución se puede ver claramente en la Figura 44, donde se muestra un esquema en forma de diagrama de flujo del Motor de Trazado de rayos.

En las secciones siguientes se detallarán los siguientes módulos pertenecientes al Motor de trazado de rayos (por ser los de mayor importancia). El resto es código simple que se puede observar sin mayores explicaciones en los anexos.

- 1- Cálculo de intersección Rayo – Concentrador.
- 2- Cálculo de intersección Rayo – Receptor.
- 3- Evaluación de intersecciones.
- 4- Trazado de rayos.

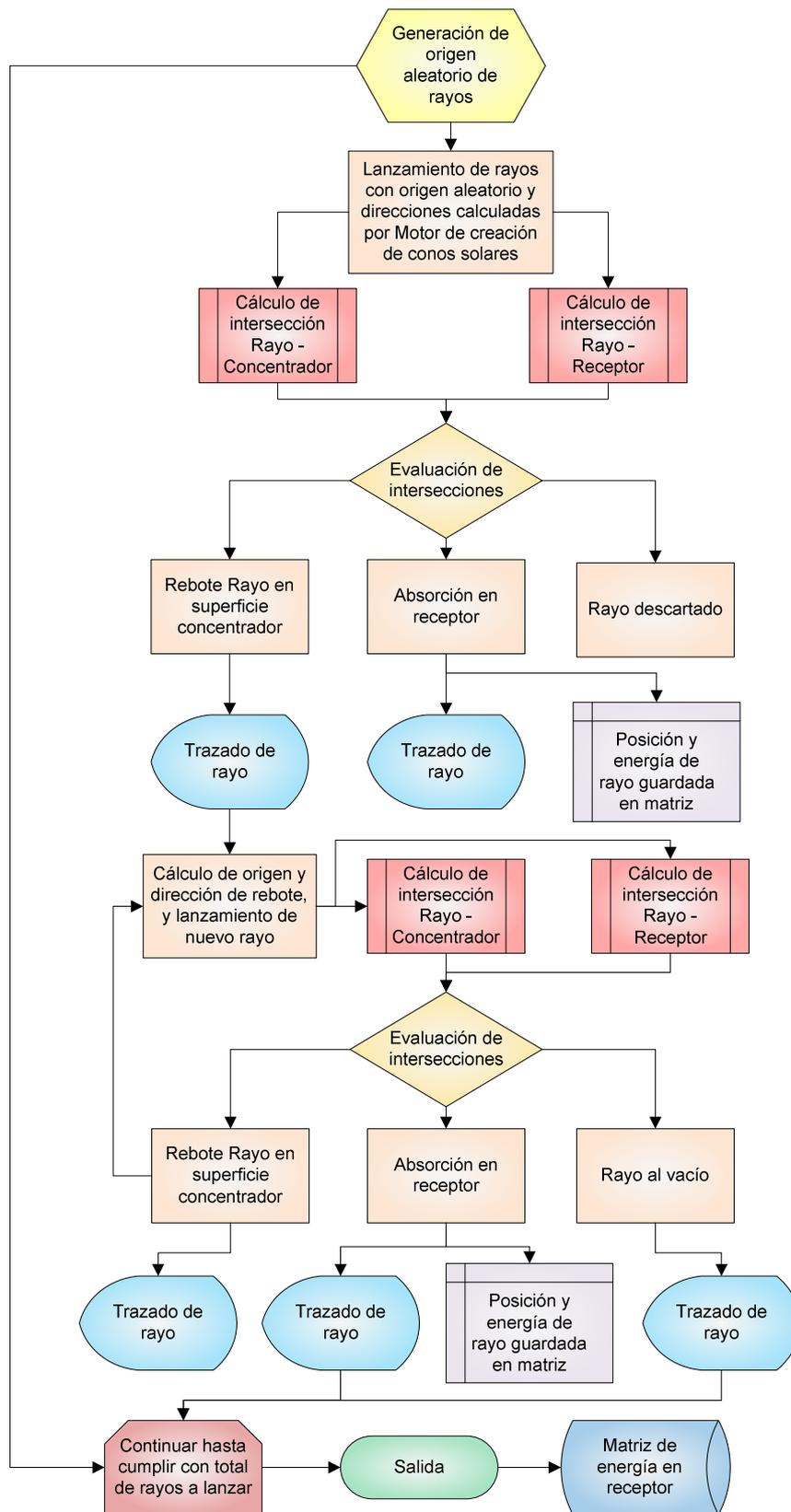


Figura 44: Esquema Motor trazado de rayos.

#### 4.5.1 Cálculo de intersección Rayo – Concentrador.

El cálculo de la intersección entre un rayo y una superficie concentradora se realiza mediante el método presentado en la sección 3.6.2, punto 2, es decir se deben intersectar las ecuaciones que originan a las superficies de los concentradores (mostradas en la sección 4.3.4) con las ecuaciones dadas por los rayos aleatorios, dadas por la ecuación (3.28).

Para esto se crearon funciones particulares para cada tipo de concentrador, las cuales calculan estas intersecciones. Esto implica a su vez, que para cada tipo de concentrador, se deben utilizar distintas funciones de intersección dentro del Motor de trazado de rayos.

Esta es la única parte que realmente se modifica dentro del motor al momento de realizar un análisis para un concentrador dado: las funciones de intersección, tanto de intersección con los concentradores, como con los receptores. Estas funciones luego de su ejecución entregan marcadores numéricos que indican si encontraron alguna intersección válida o no, el punto de intersección espacial con el concentrador y un vector con la dirección de rebote del rayo en caso de intersectar. Para el ciclo principal, se utiliza una función de intersección pura y para el ciclo de rebotes, una de rebote pura. Conceptualmente son lo mismo ya que resuelven la misma ecuación, pero poseen simplificaciones asociadas dado que se conoce (en el caso de la función de rebote) que el rayo ya está dentro del concentrador. Las funciones Rebote, también tiene la propiedad de definir una longitud especial en caso de que el rayo rebote al vacío, ya que se grafica solo una parte del rayo escapando del concentrador.

Es importante destacar que los rayos que entran en el concentrador y rebotan en su superficie, rebotan las veces que sea necesario dentro del concentrador hasta escapar al vacío o dar en el receptor. En otras palabras, no hay un límite de rebotes especificado.

Casi todas las superficies implican la resolución de una ecuación cuadrática, la cual tiene fácil solución dado que posee para todos los casos coeficientes constantes. Las soluciones obtenidas se analizan de acuerdo a la metodología básica de trazado de rayos formulada en la sección 3.6.2, punto 2.

Esto es completamente verdadero para todos los concentradores a excepción del Concentrador Parabólico Compuesto Tridimensional (CPC3D), cuya ecuación es de grado 4. Se hicieron intensos esfuerzos por resolver analíticamente esta ecuación, a través de software especializados en resolución de ecuaciones (Maple 13) y el mismo Matlab que ofrece una rutina Solve para este fin. Sin embargo, las raíces nunca se pudieron obtener, por lo que se optó por resolver de forma numérica a través de la función “fzero” de Matlab, la cual funciona de la siguiente forma:

- 1- Se debe definir la función a resolver en función de una sola variable.
- 2- Se debe entregar un valor de partida, para comenzar a iterar hasta que se produzca un cambio de signo y luego aproximar.

- 3- Sólo es un cero válido cuando la función cambia de signo, no cuando esta llega efectivamente a cero. Por ejemplo,  $y=x^2$  resuelta por este método no encuentra solución para  $y=0$ , pues en  $x=0$  no se produce un cambio de signo.

Teniendo esto en cuenta, la función de intersección del CPC3D primero se debe encargar de buscar valores cercanos a la solución buscada, acotando por las dimensiones básicas del concentrador. Luego se envía estos valores a  $f_{zero}$  y en la mayoría de los casos logra llegar a la solución (70%). Para los casos que no, existen variables auxiliares que contabilizan el número de rayos perdidos por esta razón y la energía perdida asociada, para un posterior post-procesamiento en el Motor de Análisis Energético.

Al ser las soluciones aproximaciones, el rebote en la superficie del concentrador no es del todo perfecto, por lo que esto induce a un error mayor aún.

Este caso particular de resolución de intersección entre un rayo y la superficie del CPC3D, denota lo difícil que es en teoría crear un programa que acepte cualquier tipo de superficie, dado que una infinidad de éstas podría no tener una solución analítica directa, a pesar incluso de ser continuas y derivables, y de grado 4.<sup>35</sup>

#### **4.5.2 Cálculo de intersección Rayo – Receptor.**

El cálculo de la intersección entre un rayo y una superficie receptora se realiza de manera análoga a la intersección entre un rayo y una superficie concentradora. La excepción aquí, es que se utiliza siempre la misma función de intersección (en lugar del par Intersección – Rebote).

Las superficies de los receptores involucrados son cilindros o planos, de fácil resolución (ecuaciones cuadráticas y constantes respectivamente).

Una vez calculado el punto de intersección estas funciones entregan marcadores numéricos que indican el hallazgo de intersección válida o no, junto con el punto de intersección encontrado.

#### **4.5.3 Evaluación de intersecciones.**

La evaluación de las intersecciones encontradas, tanto por las funciones de intersección Rayo-Concentrador como por las de Rayo-Receptor son fácilmente computadas gracias a los indicadores numéricos que entregan estas funciones.

---

<sup>35</sup> Teorema de Abel-Ruffini postula que las ecuaciones de grado 5 en adelante no pueden resolverse por radicales.

La función genérica InterMax, es la encargada de analizar el resultado de los marcadores de las funciones de intersección y, posterior a su ejecución, esta entrega a su vez otro marcador numérico que desvía el camino del ciclo al procedimiento de Rebote, Absorción en Receptor, Rayo descartado, Rayo al vacío, según sea el caso.

Esta función es la que se utiliza para todos los concentradores y todos los receptores, indistintamente, pues el código numérico de los marcadores de intersección utilizado, es el mismo para todos.

#### **4.5.4 Trazado de rayos.**

El trazado de rayos no es más que la simple generación del gráfico de un rayo, con origen determinado por la penúltima intersección o por el origen aleatorio, y con dirección del rayo incidente.

Una vez evaluada las intersecciones, se traza el rayo en caso de Rebote, Absorción o en caso de que el rayo se vaya al vacío, que es el caso en que el rayo entra en el concentrador, y luego da  $n$  rebotes hasta finalmente escapar.

El trazado de rayos se realiza siempre y cuando los parámetros predefinidos lo permitan. Por ejemplo, se puede ejecutar el programa lanzando 100.000 rayos, pero con la opción de mostrar 0. El Motor de trazado de rayos funcionará como siempre pero sin generar ningún gráfico de trazado (sólo mostrará las superficies concentradoras y receptoras). Las intersecciones y el flujo que llegue al receptor se calcularán de manera normal, pero de forma más rápida.

El trazado esta codificado en colores dado que en ocasiones es difícil distinguir de donde proviene cada rayo. Para esto el código de colores utilizado es el siguiente:

- 1- Rayo verde: Rayo principal (que representa a un cono) saliendo desde origen aleatorio o rebotando más de una vez en superficie concentradora.
- 2- Rayo amarillo: Rayo principal o subrayo que cae en receptor sin importar su origen (rebote u origen aleatorio).
- 3- Rayo morado: Rayo que se dirige al vacío.

En la Figura 45 se pueden apreciar los códigos de colores para un trazado de ejemplo realizado sobre un concentrador Cilindro Parabólico.

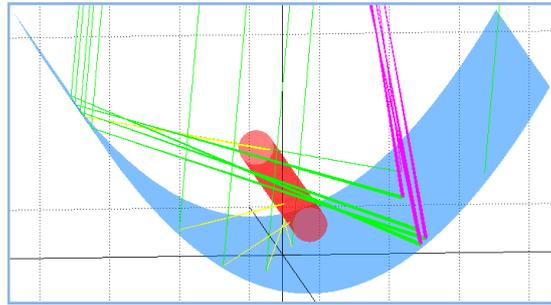


Figura 45: Colores de Rayos.

#### **4.6 Motor de análisis energético**

El Motor de análisis energético es el encargado del post-procesamiento de la información generada por el Motor de trazado de rayos. Traduce a un nivel utilizable todos los datos previamente calculados.

Un esquema de su funcionamiento lógico en forma de diagrama de flujo se puede apreciar en la Figura 46 para su mayor comprensión.

Este motor produce tres tipos de salida de información:

- 1- Gráficos tridimensionales con distribución del flujo en el área incidente en forma de concentración energética.
- 2- Vector con datos generales de concentración y parámetro ópticos.
- 3- Matriz con datos detallados de concentración en receptor, según el tamaño de la malla definida por el usuario.

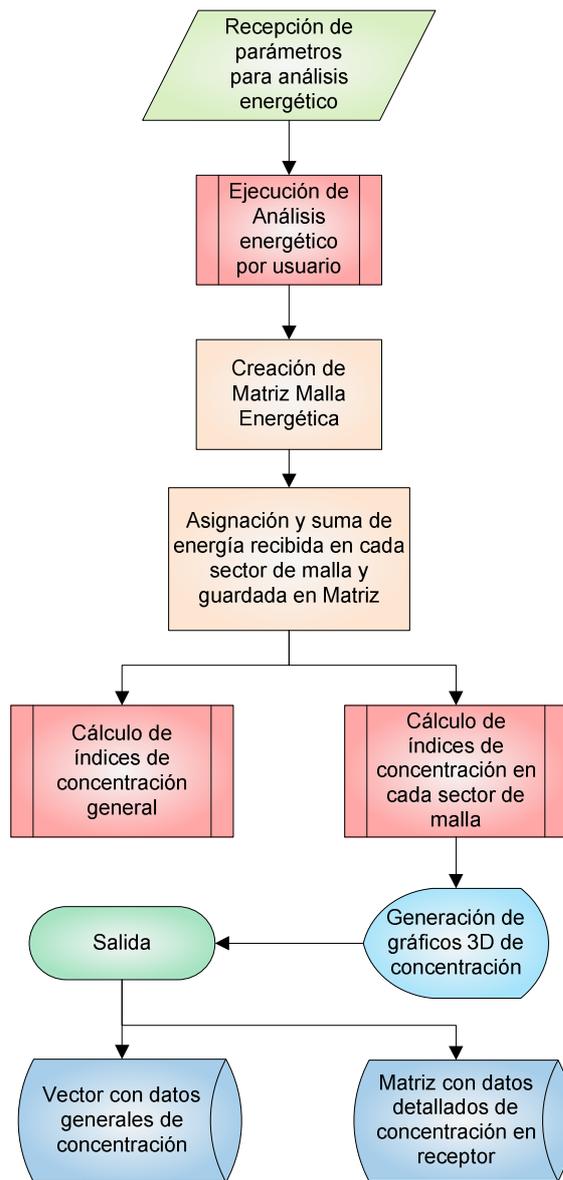


Figura 46: Esquema Motor Análisis Energético.

#### 4.6.1 Creación de Matriz malla energética y asignación de energía

Luego de recibir los parámetros de Análisis energético explicados en la sección 4.2.6 e inmediatamente después de la orden de ejecución de éste análisis, se crea una matriz con  $(i,j)$  componentes, donde los índices  $(i,j)$  fueron los indicados por el usuario. Conceptualmente esto significa que el receptor se divide en una malla de  $(i,j)$  partes y cada componente de la matriz creada, representa un sector dentro del área receptora. Sobre estos elementos de la matriz se almacenará la energía acumulada por dicho sector dentro de la malla relativa al receptor.

La variable de análisis, es un arreglo que contiene vectores de cuatro componentes que representan a cada rayo caído en la superficie receptora. Las primera tres componentes denotan la posición de intersección espacial (x,y,z) y la cuarta componente la energía asociada a dicho rayo.

El problema radica en recorrer este arreglo vector a vector y realizar una asignación de energía para cada rayo sobre un sector de la malla, es decir, transformar las coordenadas (x,y,z) espaciales a componentes (i,j) de la matriz energética.

Esto se realiza de forma rápida y eficiente con un pequeño ciclo de transformación de variables. El funcionamiento de este ciclo es rápidamente entendible mediante un ejemplo concreto:

Supongamos un receptor plano horizontal cuadrado, ubicado en el origen de largo 10. El usuario ingresó parámetros de análisis energéticos (10,10) es decir, el receptor será dividido en 10x10 cuadrados. Se crea por lo tanto una matriz de (10,10) elementos.

Luego se lee el arreglo, se ubica una coordenada de intersección: (4.23,-2,0) y la cantidad de energía asociada (0.12). Se transforma la coordenada original mediante:

Nueva coordenada<sub>i</sub>=x+largo/2+1; y se redondea hacia abajo.

Nueva coordenada<sub>j</sub>=y+largo/2+1; y se redondea hacia abajo.

La nueva coordenada corresponde a (10,8). Por lo que se suma sobre este componente de la matriz la cantidad de energía asociada, y así sucesivamente hasta completar la lectura del arreglo.

El mismo proceso (con modificaciones debido a geometría cada particular) se sigue para el resto de los receptores.

#### **4.6.2 Cálculo de índices generales de concentración**

Los índices generales de concentración (factor de concentración de flujo medio) se calculan mediante las expresiones (3.10) (3.11) y (3.15) y se almacenan en un vector con datos generales de concentración. Este vector es posteriormente procesado a petición del usuario para generar una tabla de datos en formato Excel con el resumen de la simulación ejecutada.

#### **4.6.3 Cálculo de índices de concentración en cada sector de malla.**

Los índices de concentración en cada sector de la malla (factor de concentración de flujo local), o también denominados, “índices de concentración locales”, se calculan mediante la

misma expresión (3.15) utilizada para el cálculo general de la concentración, pero aplicada a un área menor definida por el área de un sector de la malla, y una cantidad de energía menor, dada por los subrayos incidentes en dicho sector. Esto se logra mediante la aplicación de la ecuación (3.15) sobre la Matriz energética recién generada según se explicó en la sección 4.6.2.

Esta nueva matriz por lo tanto, es la que contiene la información final para generar los gráficos tridimensionales de distribución de concentración energética en la superficie del receptor.

La concentración, como se desprende de la ecuación (3.15) es un factor adimensional, por lo que los gráficos generados a su vez, son adimensionales.

Finalmente el vector y la matriz con datos generales y locales de concentración respectivamente quedan listos para su posterior utilización en caso de que el usuario desee generar una tabla de datos en formato Excel.

## 5. Verificación y Validación del programa

---

En este capítulo se detallan los procesos de verificación de la integridad del software desarrollado y la validación del mismo a través de casos con resultados conocidos.

### 5.1 Verificación punto a punto

La verificación punto a punto es un resumen de una serie de chequeos básicos a los cuales fue sometido constantemente el software durante su desarrollo, y que tuvieron como finalidad, asegurar la integridad de su capacidad para ejecutarse sin problemas y que las simulaciones realizadas sobre él, estuviesen de acuerdo a la lógica de las hipótesis planteadas en un principio. Gracias a los gráficos generables por el programa, el chequeo se realizó en forma rápida y constante a lo largo de toda su creación.

#### 5.1.1 Verificación de construcción de concentradores y receptores

Una de las primeras partes desarrolladas del software, fue el módulo encargado de graficar las superficies de concentradores y receptores. La verificación de la integridad de este módulo se hizo comparando las figuras graficadas en relación a los parámetros indicados para cada tipo de concentrador y receptor, estando correctas en el 100% de los casos. La geometría de la figura graficada es fácilmente verificable mediante el asistente para figuras de Matlab, con el cual se puede seleccionar un punto cualquiera y obtener sus coordenadas cartesianas tridimensionales.

Para una mejor visualización del posterior trazado de rayos, los concentradores y receptores se grafican con un 50% de transparencia, para poder observar la distribución de rayos en el interior de la zona de impacto.

Todas las superficies concentradoras son graficadas en color celeste y las superficies receptoras en color rojo.

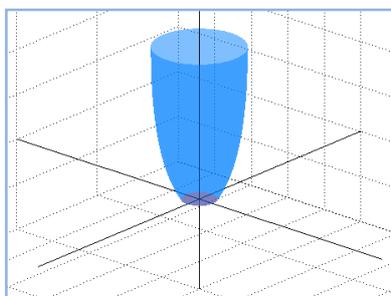


Figura 47: Muestra de colores utilizados para superficies.

### 5.1.2 Verificación de congruencia de rayos y conos de luz

La congruencia de rayos y conos de luz, se refiere a la congruencia entre los parámetros de rayos ingresados y los resultados obtenidos gráficamente. Se verifican los siguientes ítems:

- 1) Cantidad de rayos trazados: Esta cantidad debe ser exactamente la misma que la mostrada en la imagen generada, pues el programa esta codificado de tal manera que la acción de “lanzar X cantidad de rayos” significa “lanzar Rayos sobre la apertura de la superficie concentradora de manera aleatoria hasta que X rayos la alcancen a ella o al receptor de forma directa”. La verificación se realiza mediante un conteo visual. El asistente para figuras de Matlab, permite rotar, hacer zoom y moverse dentro de la figura generada, lo que facilita la tarea.
- 2) Dirección de rayos lanzados: Los rayos generados, deben incidir con la dirección contraria a la posición del sol relativa al concentrador. Para verificar este punto, se utilizó la gráfica de una “esfera solar” de referencia, ubicada según la elevación y azimut ingresados, la cual se une mediante un rayo azul al origen. Con esto, al lanzar rayos en forma aleatoria, todos deben poseer la misma dirección que el rayo azul de referencia.

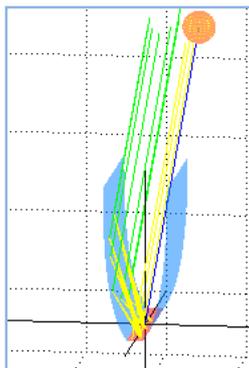


Figura 48: Rayos incidentes de acuerdo a dirección de rayo patrón (en azul).

- 3) Cantidad de subrayos en cono solar: La cantidad de subrayos debe ser congruente con la cantidad de divisiones inducidas sobre el disco solar. La verificación se realiza mediante la observación de rayos intersectados en la superficie concentradora y receptora, a través de acercamientos realizados con el asistente de visualización de figuras de Matlab.

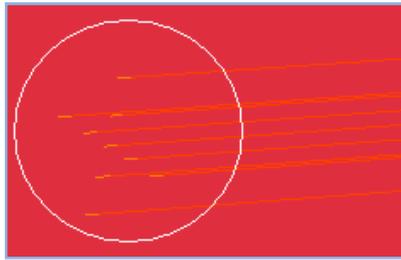


Figura 49: Cono de  $4*2+1$  subrayos incidiendo sobre receptor.

- 4) Energía de subrayos: La energía asignada a cada rayo principal (cono solar), es la dada por la expresión (3.2). Si esta expresión se resuelve para todo el disco solar, se obtiene el flujo energético del sol fuera de la atmósfera, con valor igual a  $0.135 \text{ [W/cm}^2\text{]}$ . Por lo tanto, si se suma la energía de todos los subrayos perteneciente a un cono solar, se debe obtener este mismo valor. Esto fue verificado utilizando la consola de Matlab para diferentes tipos conos generados, y posteriormente, realizando la suma sobre la energía de todos éstos. Los valores para todos los casos es igual a 0.135, lo que verifica la correcta asignación de energía dentro del cono solar. En cuanto a la correcta distribución, se verificó que la matriz de energía tuviese valores más altos para los elementos que representan a los subrayos más cercanos al centro del disco, y que luego este valor decayera para los subrayos circundantes en función de su distancia al centro.

### 5.1.3 Verificación de intersecciones y rebotes de rayos.

Se verificó para todos los concentradores, la correcta intersección de rayos a través de simple inspección visual de las figuras obtenidas. Matlab si bien, muestra como si los rayos estuviese “atravesando” en lugar de intersectando es por la siguiente causa: Los perfiles de las superficies de concentradores y receptores están generados a partir de matrices que contiene puntos discretos, los cuales Matlab une para crear una imagen tridimensional. Es decir, si se le realiza un acercamiento a un cilindro por ejemplo, en cierto punto se podrá apreciar que éste es en realidad un arreglo de láminas rectangulares unidas por sus costados.

Por otra parte, las ecuaciones que definen los puntos de intersección, son ecuaciones con radicales exactos, resueltas en Matlab con una tolerancia de  $10^{-15}$ , por lo que entregan mucha mayor exactitud que las gráficas generadas. Es por esto que se ve en las imágenes como si los rayos atravesaran una muy ínfima porción de la superficie sobre la cual intersectan.

Si esto en realidad representara un error, después de un par de rebotes esta diferencia entre el punto de intersección y el punto de rebote se incrementaría, lo cual no sucede.

En cuanto a los rebotes, un rebote que no sigue la Ley de Snell es fácil de apreciar gráficamente, más aún con las herramientas auxiliares de análisis de figuras de Matlab.

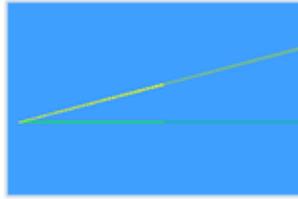


Figura 50: Rayo "Atravesando" superficie de concentrador (imagen con zoom 20x).

#### 5.1.4 Verificación de gráficos de distribución energética.

La verificación básica a la cual se sometieron los gráficos de distribución energética es la verificación de localización. La localización se refiere a que si un rayo incide en un punto  $(x,y,z)$  de una superficie receptora, el gráfico de distribución energética debe mostrar la cuadrícula en donde se ubica este punto destacada, debido a la energía que cae en este sector.

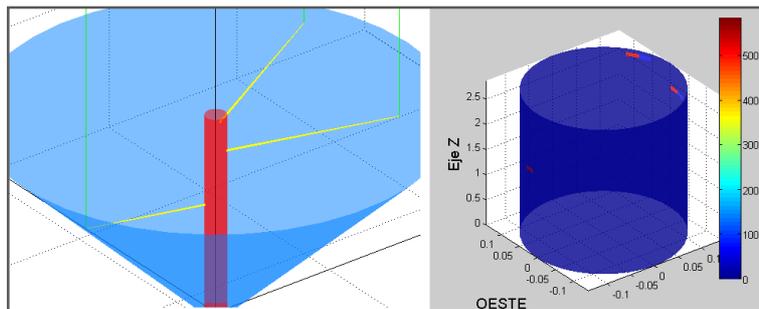


Figura 51: Localización de rayos correcta.

#### 5.1.5 Verificación de errores de programación

Durante todo el proceso de programación se eliminaron errores de diversos tipos, para asegurar una ejecución correcta. Cada rutina del código fue analizada y verificada extensivamente para un número significativo de casos, lo cual asegura una gran estabilidad al momento de ejecutarse. Se han corregido muchas situaciones que inducían al congelamiento del programa debido a loops infinitos, y otros errores que simplemente interrumpían su ejecución.

La única situación actual detectada en la que el programa no funciona, o más bien dicho, interrumpe su ejecución, es cuando se realiza un trazado de rayos con un número excesivo de rayos.

Un número "excesivo" de rayos es relativo, puesto que depende de la capacidad interna de cada computador. Como dato, se puede tener en cuenta que un computador de capacidad

media (Intel dual core @ 1,6 Ghz con 2Gigabyte de memoria RAM) el programa colapsó al pedirle  $10^6$  rayos principales divididos en  $(10*5+1)$  subrayos. Es decir, cuando se le solicitó trazar  $10^6*(10*5+1)$ .

La razón por la que sucedió este colapso, es por la cantidad de memoria utilizada por la matriz que almacena los puntos de intersección en el receptor, la cual se inicializa como un arreglo vacío de <sup>36</sup>  $\mathbf{CR}*(\mathbf{R}_s*\mathbf{A}_s+1)$  elementos, los cuales a su vez almacenan vectores de 4 componentes cada uno. Esto produjo un exceso de utilización de memoria RAM, lo cual por razones de seguridad, hizo que el programa se interrumpiera (corriendo desde Matlab, estando en modo de verificación).

A partir de los diversos ensayos realizados, se ha llegado que la cantidad de memoria aproximada ocupada para almacenar la información de trazado al momento de ejecutar el programa está dada por la siguiente relación.

$$1 \text{ MB de RAM cada } 42500 \text{ rayos lanzados}^{37} \quad (5.1)$$

Es importante tener en cuenta que el sistema operativo y los programas que se estén ejecutando al momento de realizar las simulaciones, también consumen una importante cantidad de memoria RAM, por lo que si se quiere hacer una simulación que consuma el máximo de recursos disponibles del computador, es necesario realizar un pre-cálculo para no llegar a colapsar el programa y probablemente al sistema completo.

## 5.2 Validación con casos seleccionados

En la sección anterior se verificó la integridad funcional del software desarrollado y el cumplimiento básico de las hipótesis planteadas. En esta sección se verificará si el modelo aplicado responde en forma correcta a lo esperado físicamente, dadas las hipótesis iniciales.

Los casos seleccionados corresponden a concentradores simulados en un estado de insolación normal a su superficie de apertura, para los cuales, se calcula primero su índice de concentración general esperado y luego se compara por el entregado por el software.

Se analiza en particular para los casos de máxima concentración, es decir, para el ángulo de apertura óptimo, estado de insolación óptimo y geometría del receptor óptima. La validación se hubiese podido hacer utilizando parámetros no óptimos, pero su comprobación se hubiera tornado más difícil, debido a problemas meramente geométricos, por lo que se descartó este camino.

La teoría que sustenta cada validación realizada es la siguiente:

---

<sup>36</sup> Componentes de expresión definidos en ecuación (4.1)

<sup>37</sup> Sin contar la memoria base utilizada por MAtalb para ejecutarse, la cual ronda los 150 MB.

- 1) El factor de concentración de flujo, dado por la ecuación (3.15), coincide con el factor de concentración geométrico, dado por ecuación (3.14) en caso de que todo el flujo incidente en el área de apertura del concentrador, caiga sobre la superficie receptora. En otras palabras, el factor de concentración de flujo coincide con:

$$CR_{\text{área}} = \frac{\text{Área apertura concentrador}}{\text{Área superficie receptora}} \quad (5.2)$$

- 2) Ahora, si se considera la geometría de los conos solares, los cuales poseen un ángulo sólido conocido, se puede determinar la geometría óptima de la superficie receptora, en base a este ángulo sólido y a los parámetros geométricos del concentrador, para que toda la energía incidente en el área de apertura, dada una insolación normal al área de apertura del concentrador, logre caer en el receptor.
- 3) Con lo anterior, es necesario determinar expresiones analíticas que modelen la situación anteriormente descrita para buscar el máximo de concentración en cada una de ellas. Para esto, se calcula el factor de concentración geométrico para cada par concentrador – receptor, utilizando: a) tamaño de receptor óptimo; b) insolación normal; y se deja expresado en torno al mínimo de variables posibles, para facilitar el análisis.
- 4) Luego de determinar estas funciones, se calcula el máximo factor de concentración geométrico y se compara este factor teórico con el factor de concentración obtenido mediante simulaciones realizadas por el software.
- 5) Finalmente, se revisan los diagramas de concentraciones energéticas obtenidas en las superficies receptoras, los cuales deben coincidir con lo esperado para cada modelo de concentrador y receptor. Se espera por lo tanto, los siguientes resultados:
  - i. Eficiencia óptica simulada igual a 1 (Ecuación 3.10)
  - ii. Factor de concentración de flujo obtenido, igual al factor de concentración teórico calculado.
  - iii. Distribución de concentraciones en superficie receptora de acuerdo a la geometría particular de cada par concentrador-receptor.

La pregunta que surge ahora es, ¿por qué este método sirve para validar las hipótesis físicas planteadas en un principio? Debido a las siguientes razones:

- I. El software está programado para calcular factores de Flujos de concentración, no concentraciones geométricas.

- II. Llegar a valores similares entre el factor teórico esperado y el calculado, significa que todo el flujo de la apertura cae sobre el concentrador.
- III. Si cae todo el flujo en el concentrador, esto implica que se cumple la Ley de Snell a cabalidad y que la geometría de los conos solares está bien realizada.
- IV. Si la distribución de flujos energéticos sobre la superficie del receptor está distribuida de acuerdo a la teoría de concentración, significa que la asignación de energía de los conos solares es correcta y que el método Monte Carlo funciona correctamente.

Para todas las expresiones que se muestran a continuación:

$\theta$ =ángulo de apertura (definido en sección 4.2.3)

$\varepsilon_0=0.0047$  (16' traspasado a radianes).

### 5.2.1 Validación utilizando Concentrador Cilindro Parabólico

La función teórica obtenida para modelar la concentración geométrica de éste concentrador, dadas las restricciones impuestas en la sección 5.2 es:

$$CR_{\text{área}} = \frac{\sin \theta}{\pi * \sin \varepsilon_0} \quad (5.3)$$

Cuyo máximo se encuentra para un  $\theta=90^\circ$ , con un valor igual a 67,7258.

**Tabla 1: Datos simulación concentrador Cilindro Parabólico**

Resumen de datos	
Cantidad de rayos totales simulados	5100000
Eficiencia óptica obtenida	1
Factor de concentración de flujo obtenido	67,7258
Factor de concentración teórico esperado	67,7258

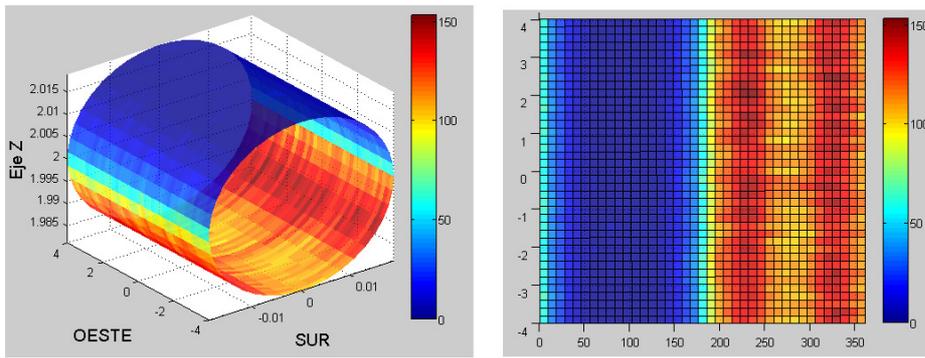


Figura 52: Distribución de concentración obtenida, vistas 3D y 2D.

## 5.2.2 Validación utilizando Concentrador de Casquete Hemisférico

La función teórica obtenida para modelar la concentración geométrica de éste concentrador, dadas las restricciones impuestas en la sección 5.2 es:

$$CR_{\text{área}} = \frac{\sin \theta \cdot \sin(\pi - 2\theta)}{\sin \varepsilon_0} \quad (5.4)$$

Cuyo máximo se encuentra para un  $\theta = 54.7356^\circ$ , con un valor igual a 163.7879.

Tabla 2: Datos simulación concentrador de Casquete hemisférico

Resumen de datos	
Cantidad de rayos totales simulados	5100000
Eficiencia óptica obtenida	1
Factor de concentración de flujo obtenido	163.7879
Factor de concentración teórico esperado	163.7879

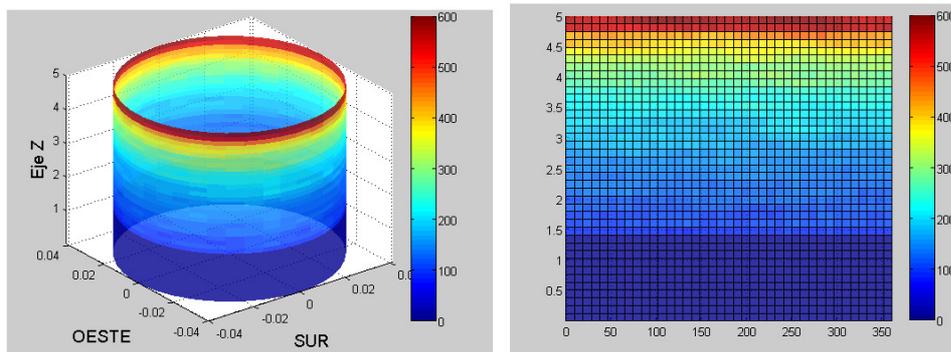


Figura 53: Distribución de concentración obtenida, vistas 3D y 2D.

### 5.2.3 Validación utilizando Concentrador Paraboloides de Revolución

La función teórica obtenida para modelar la concentración geométrica de éste concentrador, dadas las restricciones impuestas en la sección 5.2 es:

$$CR_{\text{área}} = \frac{\pi}{4 * \left[ \frac{\tan(\theta + \epsilon_0)}{\tan \theta} - 1 \right]^2} \quad (5.5)$$

Cuyo máximo se encuentra para un  $\theta = 44.8653^\circ$ , con un valor igual a 8805.32452

Tabla 3: Datos simulación concentrador Paraboloides de revolución

Resumen de datos	
Cantidad de rayos totales simulados	5100000
Eficiencia óptica obtenida	1
Factor de concentración de flujo obtenido	8805.32452
Factor de concentración teórico esperado	8805.32452

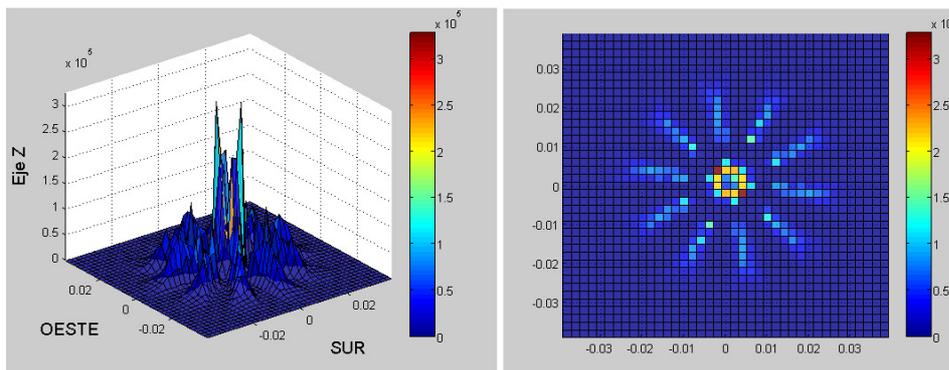


Figura 54: Distribución de concentración obtenida, vistas 3D y 2D.

### 5.2.4 Validación utilizando Concentrador Cónico

La función teórica obtenida para modelar la concentración geométrica de éste concentrador, dadas las restricciones impuestas en la sección 5.2 es:

$$CR_{\text{área}} = \frac{1}{2} * \frac{\sin 2\theta}{\sin \epsilon_0 * \left[ \frac{1}{\tan \theta} - \frac{\sin \epsilon_0}{2 \sin \theta^2} - \cot 2\theta \right]} \quad (5.6)$$

Cuyo máximo se encuentra para un  $\theta = 45^\circ$ , con un valor igual a 106.8857.

Tabla 4: Datos simulación concentrador Cónico.

Resumen de datos	
Cantidad de rayos totales simulados	5100000
Eficiencia óptica obtenida	1
Factor de concentración de flujo obtenido	106.8857
Factor de concentración teórico esperado	106.8857

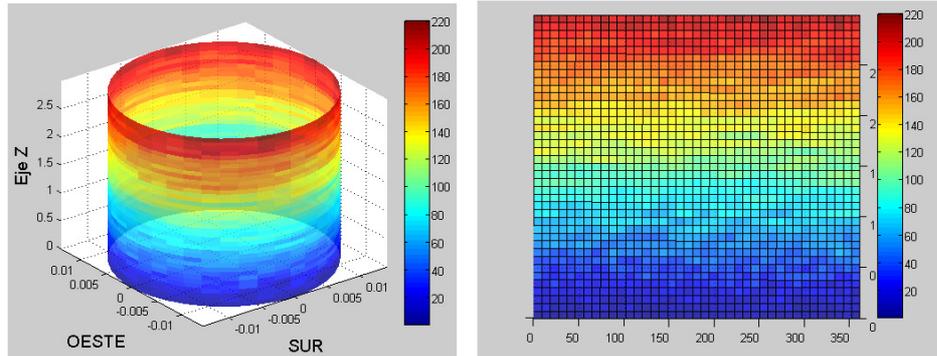


Figura 55: Distribución de concentración obtenida, vistas 3D y 2D.

### 5.2.5 Validación utilizando Concentrador Parabólico Compuesto Bidimensional

La función teórica obtenida para modelar la concentración geométrica de éste concentrador, dadas las restricciones impuestas en la sección 5.2 es:

$$CR_{\text{área}} = \frac{a}{a'} \quad (5.7)$$

Dado que se utilizaron parámetros  $a=4$  y  $a'=1$ , el de esta función es 4.

Tabla 5: Datos simulación concentrador Parabólico Compuesto Bidimensional

Resumen de datos	
Cantidad de rayos totales simulados	5100000
Eficiencia óptica obtenida	1
Factor de concentración de flujo obtenido	4
Factor de concentración teórico esperado	4

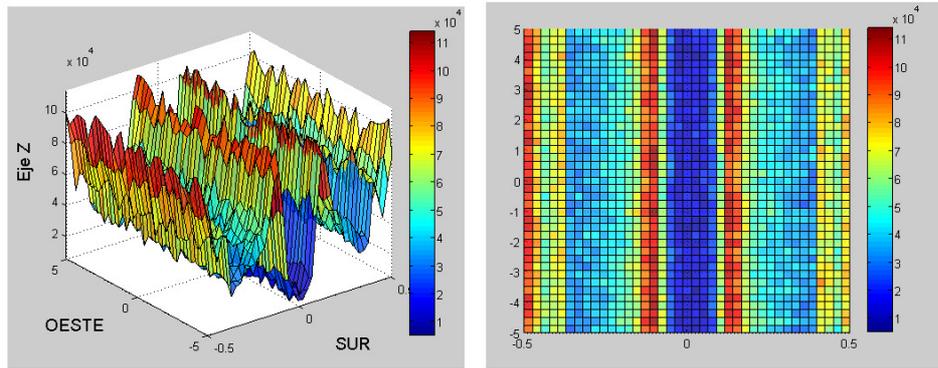


Figura 56: Distribución de concentración obtenida, vistas 3D y 2D.

### 5.2.6 Validación utilizando Concentrador Parabólico Compuesto Tridimensional

La función teórica obtenida para modelar la concentración geométrica de éste concentrador, dadas las restricciones impuestas en la sección 5.2 es:

$$CR_{\text{área}} = \left[ \frac{a}{a'} \right]^2 \quad (5.8)$$

Dado que se utilizaron parámetros  $a=4$  y  $a'=1$ , el de esta función es 16.

Tabla 6: Datos simulación concentrador Parabólico Compuesto Tridimensional

Resumen de datos	
Cantidad de rayos totales simulados	5100000
Eficiencia óptica obtenida	1
Factor de concentración de flujo obtenido	16
Factor de concentración teórico esperado	16

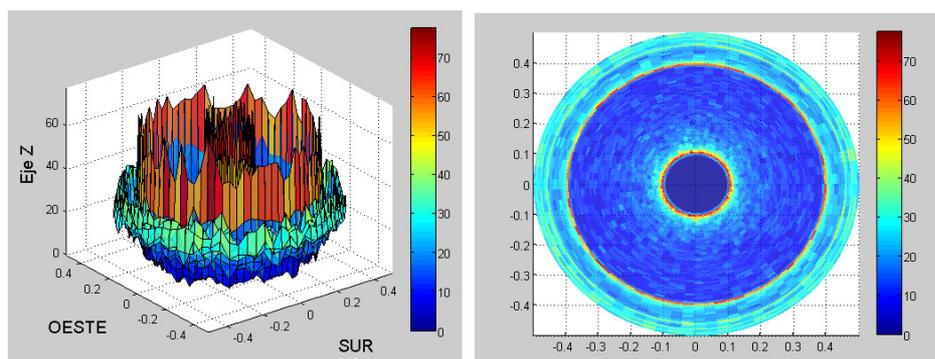


Figura 57: Distribución de concentración obtenida, vistas 3D y 2D.

### 5.2.7 Discusión de resultados obtenidos

Para todos los pares concentrador-receptor, se logró verificar la estabilidad del funcionamiento del programa. Los resultados obtenidos estuvieron de acuerdo en forma exacta con los esperados. Es más, en la gráfica de la distribución energética del concentrador Paraboloide de Revolución (Figura 54) se puede apreciar “la imagen del Sol”. Como el concentrador Paraboloide de Revolución concentra toda la energía en una zona ínfima de tipo puntal, la distribución adquiere la forma del Sol virtual generado. Se pueden apreciar las 10 ramas angulares del cono solar con que fue simulado a la perfección, otorgando una prueba extra de la correcta funcionalidad del software.

Otro punto a destacar, es la forma de las distribuciones energéticas para cada superficie receptora, las cuales no presentan acumulación asimétrica. La simetría que se presenta está de acuerdo con la geometría de cada superficie concentradora, con lo que se evidencia una vez más el correcto funcionamiento del software.

### 5.3 Validación de distribución de concentraciones en superficie receptora

Es fácilmente comprobable el hecho de que el lanzamiento de pocos rayos sobre una superficie concentradora, produce flujos desordenados en la superficie receptora. Esto es corregible, utilizando un número mayor de lanzamientos, con los cuales, la distribución del flujo se acerca a un valor asintótico y, a partir de cierto número, se torna independiente de la cantidad de rayos aleatorios que se lancen.

A continuación se muestran resultados de simulaciones variando el número de rayos lanzados para concentrador cónico con receptor cilíndrico, bajo las mismas condiciones de lanzamiento de rayos, con el fin de validar el programa de otra forma, probando si la teoría recién expuesta es expresada en los resultados de estas simulaciones.

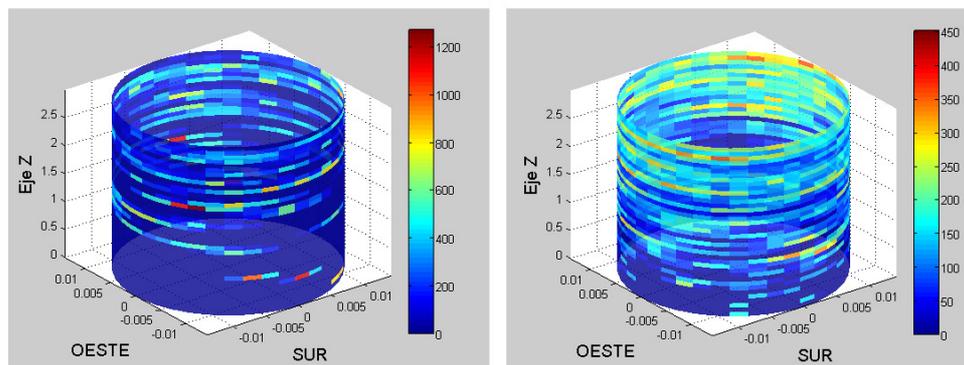


Figura 58: Distribución de concentración para  $10^2$  y  $10^3$  Rayos principales.

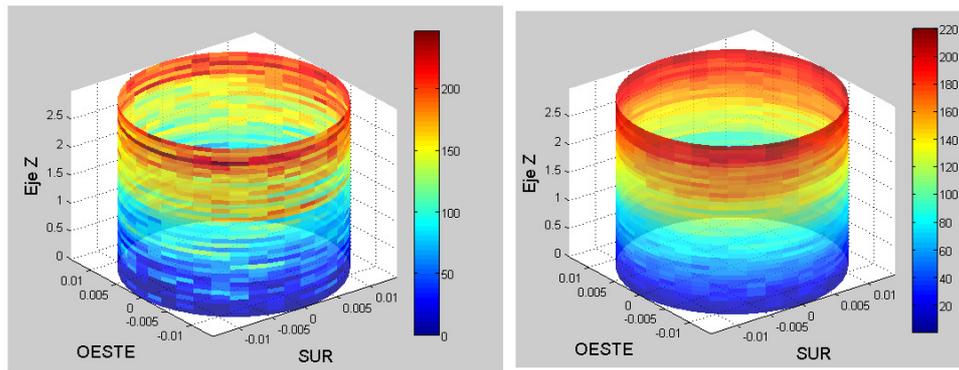


Figura 59: Distribución de concentración para  $10^4$  y  $10^5$  Rayos principales.

Como se puede apreciar, se alcanza un comportamiento esperado luego de  $10^5$  rayos principales lanzados. Simulaciones con más rayos retornan resultados similares a los mostrados en esta última gráfica.

Este comportamiento se verificó para el resto de concentradores, demostrando que la teoría expuesta en el comienzo de esta sección se cumple para todos los casos.

## 6. Conclusiones

---

### 6.1 Conclusiones Generales

El software desarrollado, constituye una herramienta ideal para el análisis óptico – geométrico de las superficies concentradoras, en conjunto con los receptores asociados a cada una de éstas. Permite analizar el flujo en los receptores bajo cualquier estado de insolación, con lo cual se pueden estimar pérdidas energéticas por este concepto, y al mismo tiempo, analizar la influencia de las variables geométricas y de otras fuentes de error en la captación del flujo, las cuales permiten ser simuladas a través del modelo “Sol de diámetro aparente mayor”.

De esta forma, se pueden analizar estados en los cuales las superficies concentradoras no estén orientadas perfectamente hacia el Sol y evaluar las pérdidas energéticas asociadas a estas desviaciones (por ejemplo, para evaluar un sistema de seguimiento automático con un error asociado) y al mismo poder variar el tamaño de la superficie receptora para disminuir las pérdidas asociadas a ésta u otra fuente de error.

Es importante destacar que al poseer una interfaz modular y sencilla, el usuario disfruta de una amigable interacción con el software de análisis energético; y los archivos generados, proveen una forma simple para realizar diversos post-análisis.

Gracias al estudio teórico en cuanto a los sistemas concentradores solares y la posterior revisión del estado del arte de las herramientas que actualmente buscan resolver el problema de determinar el factor de concentración solar en sistemas concentradores, se logró implementar un software que busca resolver un problema actual, cuya solución aún no ha sido alcanzada en forma totalmente satisfactoria. Sin embargo, en este trabajo de memoria, se dejan las bases y la lógica necesaria para poder extender esta herramienta y alcanzar el potencial requerido para analizar ópticamente cualquier par concentrador-receptor deseados.

En resumen, las principales características del programa desarrollado son:

- a) Simplicidad de utilización gracias a su interfaz gráfica.
- b) Solidez del Motor de trazado de rayos, el cual brinda gran estabilidad en cada ejecución.
- c) Fácil visualización de las simulaciones realizadas gracias a los gráficos tridimensionales que entrega.

- d) Capacidad de guardar datos en forma de imágenes y tablas de datos tras cada simulación realizada.
- e) Capacidad de simular cualquier estado de insolación sobre la superficie concentradora, es decir, es capaz de admitir un sol ficticio desde cualquier parte de la bóveda celeste, relativa al concentrador.
- f) Capacidad de implementar fácilmente el modelo de Sol de mayor diámetro para absorber aberraciones causadas por la superficie reflectora.
- g) Herramienta ideal para evaluación de diseño basado en características óptico – geométricas.

## **6.2 Conclusiones de resultados obtenidos por el programa**

Luego de las verificaciones de funcionamiento y la serie de validaciones a las cuales fue sometido el programa, especificadas en el capítulo 5 del presente trabajo, se puede concluir que éste constituye una herramienta de análisis válido, dotada de gran precisión para el estudio de sistemas concentradores solares, que cumple a cabalidad con las hipótesis de funcionamiento planteadas en un principio.

Se verificó que para los casos analíticos responde de manera correcta, pero el mayor potencial de esta herramienta está basado en el análisis de casos difíciles de estudiar, como son los casos de orientaciones imperfectas entre la superficie concentradora y el sol, más aberraciones ópticas asociadas. Es esperable que para este último tipo de casos mencionados, responda de manera correcta también, pues se verificó paso a paso el funcionamiento del software en relación con todas las hipótesis físicas planteadas.

El software además, muestra el comportamiento típico de los programas trazadores de rayos, en lo que se refiere a la distribución del flujo energético, la cual a partir de cierto punto, se estabiliza y se vuelve invariable, en función de la cantidad de rayos trazados. Este comportamiento es totalmente esperable y predecible, pues al lanzar rayos aleatorios, la forma de la distribución final, pasa de ser una distribución discreta a una continua. Este traspaso de discreto a continuo depende del tipo de superficie receptora que se esté analizando, pues una de menor tamaño, alcanzará antes este estado. En cuanto a las superficies analizadas en el capítulo 5 (con tamaños de receptor ideal), se aprecia claramente que con alrededor de 5 millones de rayos **totales** se alcanza una distribución continua de flujo energético.

Cabe destacar que si bien, las superficies receptoras se modelaron como cuerpos negros (con absortividad=1), esta herramienta sólo fue pensada para modelar el comportamiento óptico de los concentradores solares, y es necesaria una extensión de ésta para tener en cuenta factores termodinámicos.

### **6.3 Proyecciones y mejoras recomendadas al programa**

El programa puede ser extendido y mejorado a través de:

- 1- Modelos termodinámicos: se pueden agregar modelos termodinámicos para representar los fenómenos de transferencia de calor existentes en cada parte del sistema concentrador, en especial, la superficie absorbente. Con esto, el software se convertiría en una herramienta capaz de realizar estudios ópticos y térmicos.
- 2- Nuevas geometrías: Modelos de concentradores ampliamente utilizados podrían ser implementados para su análisis, así como otro tipo de receptores, como por ejemplo helióstatos y torres centrales. Esto extendería la funcionalidad del software.
- 3- Implementación de software en un lenguaje más rápido: El compilador de Matlab, al convertir el código desarrollado en Matlab a un ejecutable, realiza una serie de simplificaciones automáticas para dejarlo escrito en lenguaje C+, las cuales distan de ser las óptimas. Si el software se implementara directamente sobre un código de rápida ejecución, el tiempo en realizar las simulaciones disminuiría ostensiblemente y se podrían realizar simulaciones aún mayores.

## 7. Referencias

---

- [1] R. Medina, *Estimación del potencial de generación eléctrica mediante el uso de recursos solares en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta*. Informe para la COMISION NACIONAL DE ENERGIA, 2008.
- [2] M. Alvarez y M. Guerra, *Límite termodinámico para la concentración de la luz solar versus eficiencia del Ciclo de Carnot*, Centro de Estudios de Energía y Medioambiente (CEEMA), Universidad de Cienfuegos, Cuba.
- [3] A. Rabl, *Comparison of solar concentrators*. Solar Energy, V.18, pp.93-111, 1976.
- [5] C. Silva, *Desarrollo de un Programa Computacional de Trazado de Rayos para el Estudio de Colectores Concentradores Bidimensionales*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile, 1990.
- [6] C. Contreras, *Estudio de Concentradores Solares Puntuales Mediante un Método de Trazado De Rayos*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile, 1991.
- [7] J. Coronado, *Análisis Numérico del flujo Energético 3D en Colectores Solares Concentrados*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile, 2008.
- [8] W.T. Welford, R. Winston, *The Optics of Nonimaging Concentrators*, Light and solar energy, Academic press, New York, 1978.
- [9] S. Tapia S. y J.A. del Río P., *Concentrador parabólico compuesto: una descripción opto-geométrica*, Revista Mexicana de Física (2) 141–153, 2009.
- [10] W. Stine, M. Geyer, *Power from the Sun*, 2001. <En World Wide Web: <http://www.powerfromthesun.net>>
- [11] P. Fernández Díez, *Centrales Térmicas*, 2009. <En World Wide Web: <http://es.libros.redsauce.net>>
- [12] J. Mellado, *Ray Tracing*, 2006. <En World Wide Web: <http://www.inmensia.com/articulos/raytracing>>