



**Universidad de Chile**  
**Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas**  
**Departamento de Ingeniería Civil Mecánica**

**Análisis Numérico del Flujo Energético 3D en Colectores  
Solares Concentradores**

**Memoria para Optar al Título de Ingeniero Mecánico**

**Jorge Esteban Coronado Rubilar**

**Profesor Guía:**  
**Roberto Hernán Román Latorre**

**Miembros de la Comisión:**  
**Ramón Luis Federick González**  
**Mauricio Osses Alvarado**

**Santiago, Chile**  
**2008.**

## **Resumen**

El presente documento es el informe final del Trabajo de Título, ME69F, de Jorge Coronado. El tema de trabajo de título del alumno de Ingeniería Mecánica es el análisis numérico del flujo energético en tres dimensiones para el estudio de colectores solares concentradores. Este tema se justifica por el uso y el potencial de esta tecnología en el país y por el real alcance que pueda tener una herramienta de este tipo.

Este programa es una herramienta para el estudio de colectores solares con concentración. Se escogió utilizar un método numérico debido al gran avance de iteración y modelamiento de los programas computacionales. En este contexto el método numérico posee grandes ventajas por sobre otros métodos. El análisis numérico se hace mediante el desarrollo de un programa computacional escrito en Matlab, debido a su capacidad de graficar en 3 dimensiones y su uso en el mundo científico.

El programa analiza el flujo energético mediante un método numérico para distintos tipos de colectores solares concentradores con receptores planos utilizando un sistema de trazado de rayos del tipo Monte Carlo. El resultado se entrega mediante una imagen del flujo energético en 3 dimensiones en el receptor para así potenciar el uso de colectores solares en distintas aplicaciones.

Los resultados son de acuerdo con los objetivos; se logra visualizar el flujo energético y las iteraciones aleatorias (Monte Carlo). El programa se utilizó para analizar sistemas y condiciones simples para así en el futuro poder analizar sistemas más complejos. El programa fue escrito de forma sistemática para que pueda ser utilizado como una herramienta de trabajo para analizar otros sistemas más específicos.

## INDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Planeamiento General.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>8</b>
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Historia del uso de la Energía Solar.....</b>	<b>9</b>
2.1.1 El Primer Motor Solar. ....	9
2.1.2 Sistemas de Torre Central.....	10
2.1.3 Sistemas Cilíndricos Parabólicos.....	11
2.1.4 Empresas Solares.....	12
2.1.5 Tiempos Modernos.....	13
<b>2.2 Métodos de Conversión.....</b>	<b>14</b>
2.2.1 Térmica.....	14
2.2.2 Directa (fotovoltaica).....	15
<b>2.3 Modelamiento del Sol.....</b>	<b>16</b>
<b>2.4 Concentración Solar.....</b>	<b>17</b>
2.4.1 Sistemas Lineales.....	19
2.4.2 Sistemas Puntuales.....	22
<b>2.5 Aplicaciones de la Concentración en Sistemas Solares.....</b>	<b>25</b>
2.5.1 Torres Solares Térmicas.....	25
2.5.2 Concentradores Parabólico Lineales.....	26
2.5.3 Sistema Parabólico Striling.....	28
<b>2.6 Análisis Básico de la Concentración.....</b>	<b>28</b>
<b>2.7 Óptica del Concentrador Solar.....</b>	<b>29</b>
2.7.1 Eficiencia del Sistema de Concentración.....	29
2.7.2 Factor de Concentración Geométrico.....	30
2.7.3 Factor de Concentración Físico.....	30
2.7.4 Errores o aberraciones ópticas.....	31
<b>2.8 Perdidas.....</b>	<b>33</b>
2.8.1 Perdidas en los Materiales Reflectivos.....	34
2.8.2 Perdidas en los Materiales Transmisivos.....	35
2.8.3 Perdidas Ópticas en el Receptor.....	36
<b>3. METODOLOGIA ESPECÍFICA.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1 Métodos de Análisis.....</b>	<b>37</b>
3.1.1 Métodos Directos.....	37
3.1.2 Métodos Indirectos.....	38
3.1.3 Métodos Analíticos.....	38
3.1.4 Método Numérico.....	39
<b>3.2 Trazado de Rayos.....</b>	<b>39</b>
3.2.1. Ecuación del Rayo.....	41
<b>3.3. Simulaciones Monte Carlo.....</b>	<b>41</b>

<b>4. DESCRIPCION DEL PROGRAMA.....</b>	<b>42</b>
4.1 Mejoras del Programa.....	42
4.2 Hipótesis.....	43
4.3 Alcances.....	44
4.4 Estructura General del Programa.....	45
4.4.1 Modulos.....	46
4.5 Diagrama de Flujo.....	50
4.6 Algoritmos de Cálculo.....	51
4.6.1 Calculos Iniciales.....	51
4.6.2 Rayo Incidente.....	52
4.6.3 Intersección con la Parte Superior del Receptoe.....	54
4.6.4 Intersección entre Rayo y Colector.....	55
4.6.5 Rayo Reflejado.....	57
4.6.6 Intersección del rayo reflejado con el plano de estudio.....	59
4.6.7 Intersección del cono reflejado con el plano de estudio.....	60
4.6.8 Flujo de Energía.....	62
<b>5. RESULTADOS DEL PROGRAMA.....</b>	<b>58</b>
5.1 Sistemas Lineales.....	58
5.1.1 Concentrador Solar Cilindrico Parabólico.....	58
5.1.2 Concentrador Solar Fresnel Lineal .....	58
5.2 Sistemas Puntuales.....	59
5.2.1 Concentrador Solar de Casquète Hemisférico.....	59
5.2.2 Concentrador Solar Paraboloides de Revolucion.....	59
5.2.3 Concentrador Conico Fresnel .....	59
<b>6. CONCLUSIONES FINALES.....</b>	<b>60</b>
6.1 Conclusiones del funcionamiento del Programa.....	60
6.2 Logros de los Objetivos.....	60
6.3 Usos del Programa.....	61
6.4 Mejoras Recomendadas.....	61
<b>7. Referencias.....</b>	<b>62</b>
<b>8. Anexos.....</b>	<b>64</b>

## **1. INTRODUCCION.**

### **1.1 Planeamiento General.**

El Sol, fuente de vida y origen de las demás formas de energía que el hombre ha utilizado desde los albores de la historia, puede satisfacer todas nuestras necesidades, si aprendemos cómo aprovechar de forma racional la energía que continuamente derrama sobre el planeta. Ha brillado en el cielo desde hace unos cinco mil millones de años, y se calcula que todavía no ha llegado ni a la mitad de su existencia. Durante el presente año, el Sol arrojará sobre la Tierra cuatro mil veces más energía que la que vamos a consumir.

Chile, y en especial el norte de Chile, por su privilegiada situación y climatología, se ve particularmente favorecida para el uso de energía solar. Esta energía puede aprovecharse directamente, o bien ser convertida en otras formas útiles como, por ejemplo, en electricidad o energía térmica.

No sería racional no intentar aprovechar, por todos los medios técnicamente posibles, esta fuente energética gratuita, limpia e inagotable, que puede liberarnos definitivamente de la dependencia del petróleo o de otras alternativas poco seguras, contaminantes o, simplemente, agotables.

La radiación solar posee una elevada calidad termodinámica al ser el resultado de procesos que tienen lugar en la superficie del Sol a una temperatura equivalente de cuerpo negro visto desde la Tierra de  $5.780^0\text{K}$ . En las aplicaciones solares que utilizan la potencia incidente de la irradiancia solar para su conversión a trabajo útil, resulta fundamental la medida de la calidad de esta energía incidente, expresada en términos de la energía que puede convertirse en trabajo mecánico si fuera un proceso completamente reversible (Exergía) [6].

Es de vital importancia proseguir con el desarrollo de la incipiente tecnología de captación, acumulación y distribución de la energía solar, para conseguir las condiciones que la hagan definitivamente competitiva, a escala planetaria y nacional.

Recogiendo de forma adecuada la radiación solar, podemos obtener calor y electricidad. El calor se logra mediante los captadores o colectores térmicos, y la electricidad, a través de los llamados módulos fotovoltaicos. Ambos procesos nada tienen que ver entre sí, ni en cuanto a su tecnología ni en su aplicación, aunque existen sistemas térmicos que tienen la finalidad de producir electricidad, como por ejemplo los sistemas con Motores Stirling.

La energía solar se puede utilizar de tres formas, la primera es en procesos biológicos (fotosíntesis), la segunda en aplicaciones fotovoltaicas (celdas solares) y la última es a través de aplicaciones térmicas.

En las aplicaciones que usan estas dos últimas, fotovoltaicas y térmicas, existen colectores sin concentración y colectores con concentración. En las aplicaciones que requieren mayores temperaturas, se utiliza los colectores con concentración los cuales concentran el flujo energético. La curva creciente de esta tecnología implica un mayor número de concentradores solares, lo que nos exige tener herramientas como este programa para entender de mejor forma el flujo energético al interior de estos colectores.

Para determinar las características de un colector es necesario un estudio de la eficiencia, comportamiento y operación de este. Existen varios métodos de análisis, estos métodos se clasifican en fotométricos, calorimétricos, analíticos y numéricos.

Entre los métodos numéricos, se destaca el método numérico por trazado de rayos (“ray tracing” como es conocido en inglés) que se utiliza para el trabajo de esta Memoria. El método numérico de trazado de rayos es un método que se basa en el seguimiento iterado de rayos dentro del colector solar calculando el aporte energético individual de cada rayo. Este método tiene grandes ventajas en comparación con otros métodos, permite estudiar colectores con geometría compleja, puede analizar un colector en casi cualquier estado de insolación, y permite conocer las características de un colector antes que este sea construido pudiendo así hacer modificaciones a bajo costo.

En memorias anteriores los rayos fueron tomados por sistemas de barrido sistemático. En este trabajo de título se creará un programa que analice los colectores con concentrador en tres dimensiones utilizando un método estadístico del tipo Monte Carlo y que muestre el flujo energético hacia el receptor.

## 1.2 Objetivos.

El objetivo fundamental del trabajo es desarrollar un programa de computación de trazado de rayos para el estudio en tres dimensiones de los colectores solares concentradores.

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

1. Diseñar el software en Matlab utilizando un método de trazado de rayos del tipo Monte Carlo.
2. Estudiar a los colectores del tipo Parabólico Lineal, Facetado Lineal Parabolico, Paraboloides con Revolución, Casquete Hemisférico, y el Conico Facetado Parabólico del tipo Fresnel.
3. Entregar una imagen en 3D que muestre de forma clara la distribución de la energía en el receptor.
4. Crear el software que entregue los resultados en forma clara.



## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1 Historia del uso de la Energía Solar.**

Los esfuerzos para diseñar y construir elementos que entregaran energía renovable empezaron hacia más de 100 años en pleno crecimiento de la era industrial. En contra de la opinión de la mayoría, un número de ingenieros cuestionó la práctica de una industria basada en energías no renovables. Varios de estos ingenieros visionarios exploraron activamente casi todas las opciones de energía renovables que existen hoy en día. Al final, la mayoría se inclinó hacia la energía solar.

En menos de 50 años estos pioneros desarrollaron una extensa gama de innovaciones técnicas para captar la radiación solar para usarla para producir vapor, el cual entregaba poder a las máquinas de la época. Más aún, justo antes de la primera guerra mundial, ellos habían trazado todos los métodos de conversión térmica solar. En esta era los sistemas solares con concentración llegaron a ser competitivos con el mayor combustible fósil utilizado, el Carbon. Por mala fortuna, al lado de sus éxitos técnicos y diseños innovadores, su trabajo fue mayormente olvidado por los próximos 50 años con el auge para desarrollar las tecnologías para el uso de la bencina y petróleo para un mundo con apetito de energía.

#### **2.1.1 El Primer Motor Solar.**

El primer registro de un motor de conversión solar directa a energía mecánica es de Auguste Mouchot, un matemático del Lycée de Tours, Francia. Mouchot empezó su trabajo solar en el año 1860 después de analizar la dependencia de su país en el carbón. Al año siguiente obtuvo su primera patente para un motor que utilizaba la energía solar, y continuó el desarrollo de este motor hasta el año 1880. Durante este período este inventor

estableció la base para nuestra comprensión de la conversión de la radiación solar a potencia de vapor mecánica.

Los primeros experimentos de Mouchot involucraban una caldera de fierro rodado por vidrio; la radiación solar a travesaba el vidrio, y los rayos transmitían el calor hacia el agua. Mientras que este pequeño sistema tenía el potencial de evaporar agua, en la realidad no servía de mucho para lograr los flujos y presiones necesarias para el buen funcionamiento del motor. Mouchot pronto descubrió que con la adición de reflectores para la concentración de la radiación hacia la caldera él podía generar más vapor. En 1865, el logro utilizar su invento para operar un pequeño motor de vapor convencional.

Con nuevos fondos agrandó la capacidad de su invento y conectó su concentrador solar a una bomba de agua, a un refrigerador y varios otros elementos. Sus máquinas fueron ganando reconocimiento y varios proyectos con grandes fondos fueron construidos. Hasta que un día debido a nuevos tratados de comercio el precio del carbón bajó y los inventos de Mouchot fueron considerados un éxito técnico pero un fracaso práctico. Sin más fondos para sus investigaciones Mouchot retomó su carrera académica.

### **2.1.2 La Torre del Poder**

En la cumbre de los experimentos de Mouchot, William Adams, un Inglés trabajando en la India escribió un libro llamado “Calor Solar: un sustituto para los combustibles en países tropicales”. Adams escribió que el motor de Mouchot era muy interesante pero que para aumentar las presiones aun más sería necesario un disco reflector inconstruible y que la superficie reflectante, la cual consistía de un metal finamente pulido bajaría su eficiencia muy rápidamente y que sería muy difícil hacer un sistema de seguimiento solar.

Adams tenía la convicción de que un reflector de espejos planos colocado en forma semi-circular sería más económico y más fácil de mantener. Él construyó un arreglo de espejos que se movían 3 o 4 veces al día sobre unos rieles de forma semi-

circular para seguir el sol. Su sistema con 72 espejos logro entregar la energía térmica necesaria para el funcionamiento de un motor de vapor similar al de Mouchot, pero de 2.5 caballos de fuerza, colocado en una Torre de Poder.

Los experimentos de Adams no duraron mucho más tiempo, aunque logró demostrar su teoría y varios escépticos se dieron cuenta del potencial de uso de la energía solar. Adams no logró mayores fondos para sus experimentos. Hoy en día los ingenieros conocen estos sistemas como el concepto de Torre del Poder, la cual es una de las mejores configuraciones para plantas solares centralizadas de gran capacidad.

### **2.1.3 El Parabólico Lineal.**

John Ericsson, sueco por nacimiento, fue uno de los ingenieros con más influencia y controversial de EE.UU. del siglo diecinueve. Aunque fue famoso por el diseño del buque de guerra Monitor, él dedicó los últimos veinte años de su vida profesional al desarrollo de la energía solar. Su inspiración al igual que la mayoría de los ingenieros solares de la época fue basado en el temor de que algún día el carbón se iba acabar.

En 1870 Ericsson desarrolló un motor de vapor solar parecido al motor de Mouchot, el cual incorporaba un reflector de forma cónico, el receptor o caldera y un mecanismo de seguimiento.

Prontamente Ericsson invento el colector Parabólico Lineal, el cual fue muy innovador y permitía concentra el flujo energético sobre una línea focal. Este tipo de reflector ofreció varias ventajas por sobre el reflector de disco circular. Era más simple, más económico para construir, y solamente tenía que seguir el sol en una dirección. En contra el sistema parabólico lineal no alcanza las mismas temperaturas y la eficiencia es menor que los concentradores de revolución.

El nuevo sistema de concentración creció en popularidad con experimentos posteriores y eventualmente llegó a ser un estándar para plantas modernas. De hecho, las plantas solares de mayor tamaño de la última década, como por ejemplo Andasol, han escogido el reflector parabólico de Ericsson como su concentración de radiación. Esto se debe a que este sistema tiene una buena relación entre, costos, eficiencia y mantención.

#### **2.1.4 Empresas Solares**

Aubrey Eneas de Boston, EE.UU., formó en el año 1900, “The Solar Motor Co.”, utilizando como base el invento de Mouchout. Su reflector de grandes proporciones fue vendido en dos oportunidades, teniendo ambas un triste final producto de las inclemencias climáticas.

En 1904, Henry E. Willsie construyó dos plantas solares una de 6 Hp y la otra de 15 Hp, su sistema sin concentración utilizaba un líquido de trabajo en un tanque de almacenamiento de calor, razón por la cual se podía utilizar los motores durante la noche. El tamaño y costo de construcción hicieron dudar de la eficiencia del sistema, razón por la cual como sus empresarios antecesores su empresa se fue a la quiebra.

Aun con los fracasos comerciales anteriores, Frank Shuman, compartía el sueño de la energía solar. En 1911, Shuman construyó una planta de diez mil pies cuadrados, pero aun con este gran potencial de flujo energético Shuman fue incapaz de lograr las presiones necesarias para operar los motores convencionales de la época. Por esta razón se asoció con E.P Haines para construir un motor que funcionará con menores presiones. Juntos lograron crear un motor de 33 Hp que bombeaba 3000 galones por minuto de agua.

Este diseño fue mejorado por físicos Ingleses, incorporando reflectores parabólicos y sistemas de seguimientos del sol, los cuales aumentaron la eficiencia en un 33% llegando a producir 55 Hp, en el Cairo, Egipto. Por fin se vio que un sistema real funcionaba, y la relación precio/Hp se acercaba al de los combustibles fósiles.

Por mala fortuna, el comienzo también fue el final. Dos meses después que se terminó la construcción de la planta del Cairo, el Archiduke Ferdinand fue asesinado, y con su muerte comenzó la primera guerra mundial.

### **2.1.5 Tiempos Modernos**

Durante los setenta, mientras que las naciones de la OPEC aumentaban el precio del crudo y crecía el movimiento anti-nuclear, palabras como eficiencia energética y energías renovables empezaron a escucharse. Por consecuencia la energía térmica, fotovoltaica y eólica revivieron.

Descubrieron que los reflectores con forma de disco, como el de Mouchout eran los más eficientes pero también los más caros y difíciles de mantener. Los colectores de baja temperatura sin concentración como el de Willsie, eran los con menor flujo energético, y por ende se podían utilizar solo en pequeñas aplicaciones. Los reflectores estacionarios como el de Adams, llamado Torre de Poder, eran una buena solución pero aun así eran costosos y fácilmente dañados.

A mediados de los ochentas, los ingenieros solares contemporáneos, determinaron al igual que Ericsson y Shuman, que para lugares soleados específicos, los sistemas parabólicos lineales tenían la mejor relación entre costo/energía. [14]

## **2.2 Métodos de Conversión**

### **2.2.1 Térmica**

Hablemos primero de los sistemas de aprovechamiento térmico. El calor recogido en los colectores puede destinarse a satisfacer numerosas necesidades. Por ejemplo, se puede obtener agua caliente para consumo doméstico o industrial, o bien para dar calefacción a nuestros hogares, hoteles, colegios, fábricas, etc. Incluso podemos climatizar las piscinas y permitir el baño durante gran parte del año.

Las aplicaciones agrícolas son muy amplias. Con invernaderos solares pueden obtenerse mayores y más tempranas cosechas; los secaderos agrícolas consumen mucha menos energía si se combinan con un sistema solar, y, por citar otro ejemplo, pueden funcionar plantas de purificación o desalinización de aguas sin consumir ningún tipo de combustible.

#### **2.2.2.1 Temperatura Baja**

La energía solar térmica de baja temperatura consiste en el aprovechamiento de la radiación proveniente del sol para el calentamiento de un fluido a temperaturas normalmente inferiores a 80°C, pero hasta 100°C. Esto se lleva a cabo con los llamados calentadores solares o colectores planos, que se aprovechan de las cualidades de absorción de la radiación y transmisión de calor de algunos materiales, y del efecto invernadero que se produce cuando otro material (por ejemplo el vidrio) es transparente a la radiación de onda corta del sol y opaco a la radiación de onda larga que emiten los cuerpos que están calientes.

#### **2.2.2.2 Temperatura Mediana**

Las aplicaciones de energía solar de temperatura mediana, utilizan temperaturas de trabajo que fluctúan entre los 100°C y 300°C. Estas aplicaciones normalmente utilizan colectores parabólicos que concentran la radiación solar en un tubo colector encargado de recibir y transmitir el calor, alcanzando valores de temperatura hasta 300°C.

### **2.2.2.3 Temperatura Alta**

Los sistemas solares térmicos de alta temperatura hacen referencia a grandes instalaciones donde el principal elemento es una torre paraboliode, o un campo de helióstatos que concentran la radiación solar en una torre central, que puede alcanzar temperaturas superiores a los 4000°C. Normalmente se trata de sistemas con una caldera central de la que se obtiene vapor a alta temperatura para usos térmicos o producción de electricidad.

### **2.2.2 Directa (Fotovoltaica)**

Las «celdas solares», dispuestas en paneles solares, ya producían electricidad en los primeros satélites espaciales. Actualmente se perfilan como la solución definitiva al problema de la electrificación rural, con clara ventaja sobre otras alternativas, pues, al carecer los paneles de partes móviles, resultan totalmente inalterables al paso del tiempo, no contaminan ni producen ningún ruido, no consumen combustible y no necesitan mantenimiento. Además, y aunque con menos rendimiento, funcionan también en días nublados, puesto que captan la luz que se filtra a través de las nubes.

La electricidad que así se obtiene puede usarse de manera directa (por ejemplo para sacar agua de un pozo o para regar, mediante un motor eléctrico), o bien ser almacenada en acumuladores para usarse en las horas nocturnas. También es posible inyectar la electricidad generada en la red general, obteniendo un importante beneficio.

El desarrollo de la tecnología fotovoltaica en nuestro país incluye los siguientes tipos de usos: aplicaciones efectuadas por empresas de telecomunicaciones, aplicaciones en retransmisión de televisión en sectores aislados, sistemas de iluminación de faros con paneles fotovoltaicos y electrificación rural.

Si se consigue que el precio de las células solares siga disminuyendo, iniciándose su fabricación a gran escala, es muy probable que, para la segunda década del siglo, una buena parte de la electricidad consumida en los países ricos en sol tenga su origen en la conversión fotovoltaica.

### 2.3 Modelamiento del Sol.

El sol es una esfera radiante, situada en el espacio, a 150 millones de km. de la tierra, por esto, se puede aproximarle a un disco radiante de diámetro angular medio 32' de arco, lo que equivale a 0.0093 radianes. En su interior ocurren una serie de reacciones termonucleares, las cuales producen el espectro de radiación electromagnética que emite. Por ello, el sol se estudia como una zona del espacio en el cual existe una distribución de energía radiante, de simetría azimutal. [2]

Para el desarrollo de este programa se utilizara la ecuación proporcionada por José [11]. Esta ecuación describe la forma de la distribución del brillo en el disco solar. Esta establece un brillo máximo en el centro, un brillo mínimo en los bordes y una caída sinusoidal. Esta función queda descrita por:

$$E(\varepsilon) = 0.31 + 0.69 \times \left[1 - \left(\frac{\text{sen}\varepsilon}{\text{sen}\varepsilon_0}\right)^2\right]^{1/2}$$

*donde:*

$E(\varepsilon)$  = función de distribución de energía.  
 $\varepsilon$  = ángulo.  
 $\varepsilon_0$  = ángulo sólido total, se considera igual a 16 grados de arco.



De la ecuación anterior, se desprende que los rayos solares tienen forma de conos. El eje de estos conos es la recta que une el centro del sol con el punto iluminado, y el semiángulo corresponde al radio aparente del sol. La energía que transporta cada rayo se considera como

$$I = \int_{\theta=0}^{\theta_{max}} E(\theta) d\theta$$

o su equivalente:

$$E_{Total} = \pi \times L_0 \times \text{sen}^2 \varepsilon_0 \times \left( 0.39 + \frac{2}{3} \times 0.61 \right)$$

donde:

$L =$  Brillo del imagen solar en un punto del disco con radio angular  $\varepsilon$ , [ $W/cm^2$ ].

$L_0 =$  Brillo máximo del imagen solar, correspondiente al centro, [ $W/cm^2$ ].

## 2.4 Concentración Solar

La energía que el sol irradia hacia la tierra viene bajo la forma de un espectro de ondas electromagnéticas. Cuando un objeto es expuesto a esta radiación la energía del sol es transferida al objeto. Existen dos formas de recolectar esta energía:

- a. Sistemas sin concentración: en estos sistemas la radiación incidente sobre el objeto receptor, es igual a la radiación entregada por el sol en el lugar.
- b. Sistemas con concentración: en estos sistemas el flujo de radiación incidente sobre el receptor es mayor que la radiación entregada por el sol en el lugar.

En muchas aplicaciones solares se requiere obtener mayores temperaturas que las logradas mediante colectores tipo placa plana. En algunos procesos industriales se necesita temperaturas mayores a los 100°C. En los sistemas con concentración se utiliza

una superficie relectora para concentrar los rayos sobre el objeto receptor así entregando una mayor cantidad de energía. El reflector por sus características de material tiene la propiedad de reflejar la radiación incidente sobre ella. Los colectores con concentración pueden ser del tipo con imagine (focalizantes) o sin imagine (no focalizantes).

La eficiencia de la superficie del reflector se mide por medio del coeficiente de reflectividad  $\rho$ .  $\rho$  es el cuociente entre la energía recibida y la energía reflejada. Las variables que más afectan  $\rho$  son la longitud de onda y la rugosidad superficial del reflectante.

Existen distintas configuraciones geométricas que permiten concentrar la radiación solar. Para obtener mayores flujos de energía utilizando las leyes clásicas de la reflexión, es muy importante para la eficiencia del colector que este tenga un sistema de seguimiento del sol. Para obtener altos valores de concentración se requiere aumentar la precisión óptica.

Las superficies de los colectores pueden ser continuas o facetadas. Los colectores facetados son construcciones hechas con espejos poligonales planos (facetas), dispuestos de tal modo que los vértices de los mismos se aproximan a una superficie curva. La superficie puede ser una esfera, una parábola u otra. Constituyen una alternativa a los de superficies continuas, a un costo bastante menor, y con una pequeña perdida de eficiencia.

## 2.4.1 Sistemas Lineales

### 2.4.1.1 Parabólico Lineal

Este concentrador consiste en una superficie reflectante parabólica lineal que refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo absorbente colocado en la línea focal de la parábola [6]. Esta radiación concentrada sobre el tubo absorbente hace que el fluido que circula por su interior se caliente, transformando la radiación solar en energía térmica, en forma de calor sensible o latente del fluido.

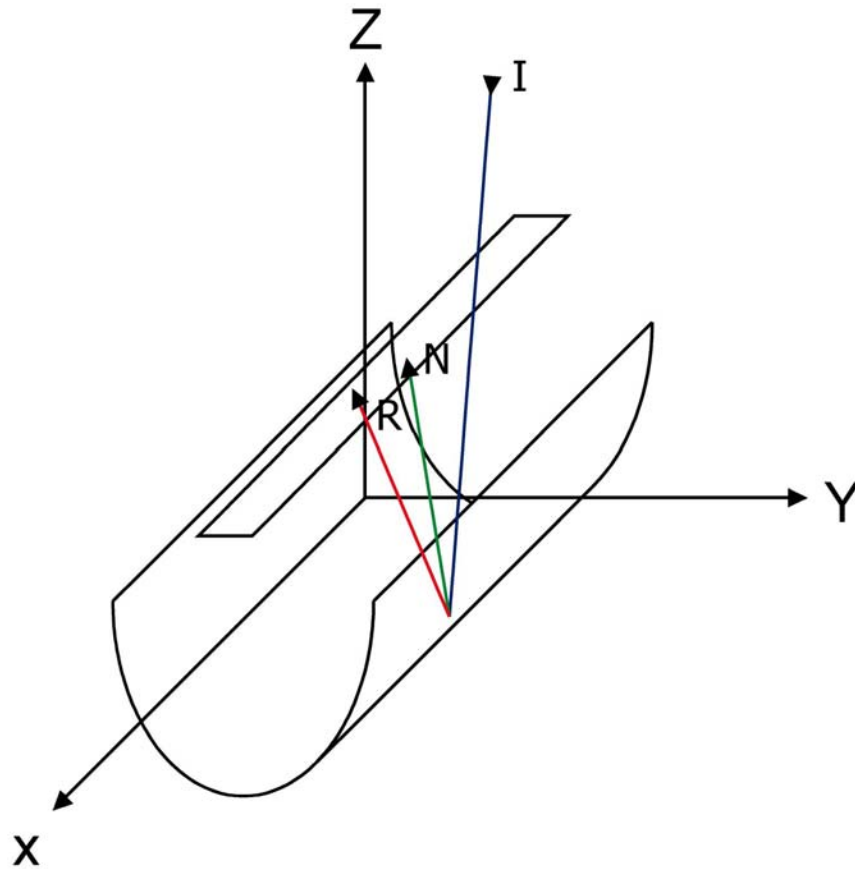


Figura 2.4.1.1, Colector Solar Parabólico Lineal

### 2.4.1.2 Fresnel Lineal

El concentrador lineal parabólico facetado se asemeja al parabólico lineal con la única diferencia que su superficie no es continua, sino que está compuesta de varios espejos rectangulares. Estos espejos tienden a tener un largo mucho mayor que su ancho. Los espejos se colocan uno al lado de otro con sus largos en contacto, mientras que los extremos de sus anchos siguen una forma parabólica. Esta distribución implica una menor eficiencia del sistema pero a la vez disminuye los costos de fabricación y mantención.

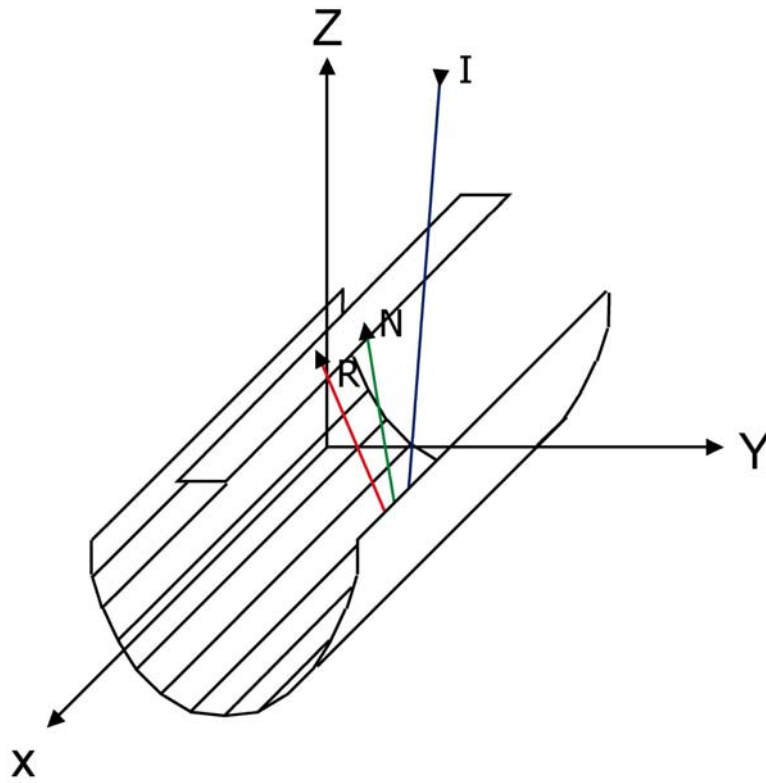


Figura2.4.1.2, Colector Solar Parabólico Fresnel Lineal

### 2.4.1.3 Concentrador Parabólico Compuesto Lineal

Este es un concentrador sin imagen que tiene varias ventajas entre las cuales destacan: es posible seleccionar la razón de concentración, para un receptor específico se puede optimizar la geometría del reflector. Esta tecnología fue desarrollada por R. Winston [4]. La principal característica de los CPC es que proporcionan el mayor ángulo de aceptación posible para una razón de concentración dada [2].

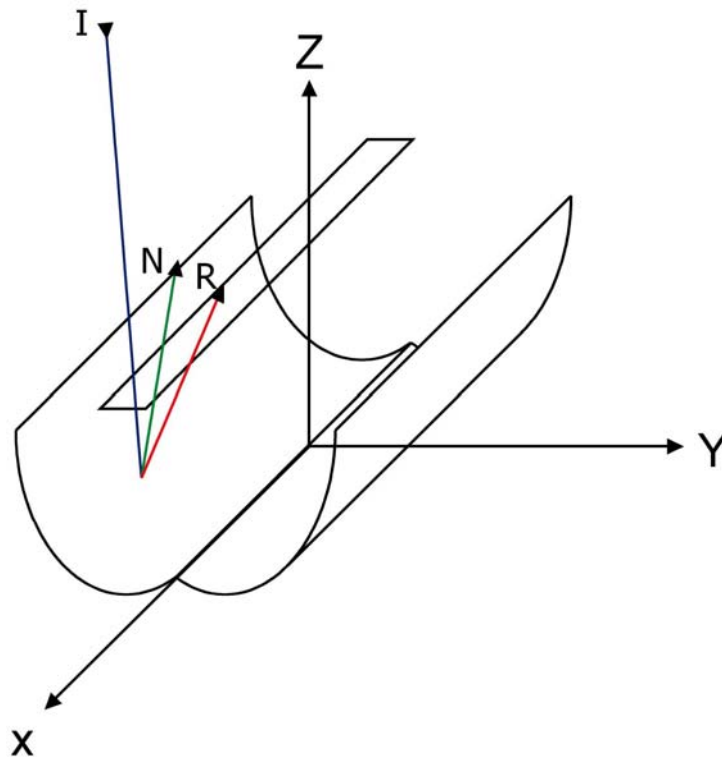
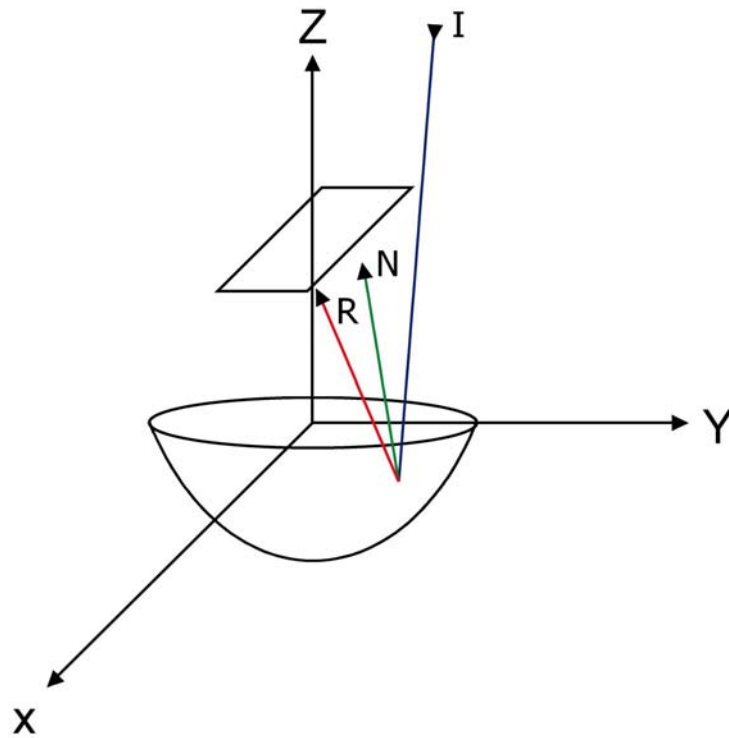


Figura 2.4.1.3, Colector Solar Parabolico Compuesto Lineal

## 2.4.2 Sistemas Puntuales

### 2.4.2.1 Paraboloide de Revolución

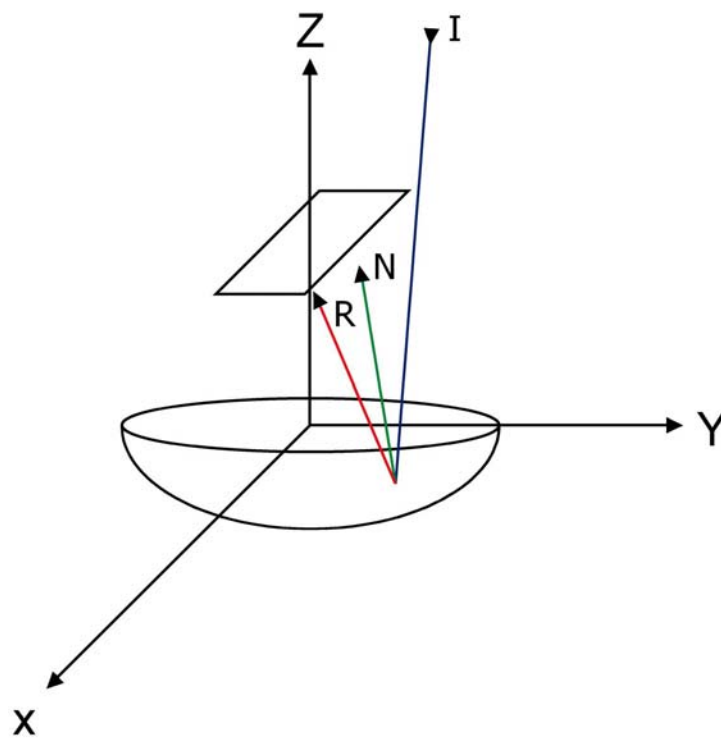
Consiste en una superficie de revolución, generada por la rotación de una parábola en torno a su propio eje óptico. Foco Puntual.



**Imagen 2.4.2.1, Colector Solar Parabólico por Revolución**

### 2.4.2.2 Casquete Hemisférico

Es una superficie similar al paraboloide, pero generado por un casquete de esfera. Tiene un foco llamado foco paraxial, localizado en el eje, a una altura igual a la mitad del radio. Tiene dos absorbentes: uno de alta concentración, en el foco paraxial, y uno de baja concentración, a lo largo del eje.



**Figure 2.4.2.2, Colector Solar de Casquete Hemisferico.**

### 2.4.2.3 Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) de revolucion.

Esta es una superficie generada por el perfil de un Concentrador Parabólico Compuesto, el cual ha sido revolucionado en 360 grados. Este es de gran uso dado a que permite una buena distribución del flujo energético en la superficie del receptor.

#### 2.4.2.4 Concentrador Cónico Facetado del tipo Fresnel

Los colectores con concentración Cónico Facetado del tipo Fresnel están formados por anillos de cónicos que siguen una forma parabólica. En el reflector Fresnel, las superficies pueden ser planas o curvas, estando diseñada cada una para reflejar individualmente la radiación sobre el receptor; su gran ventaja radica en su facilidad de construcción, siendo muy interesante su utilización en colectores solares de gran potencia y alta temperatura.

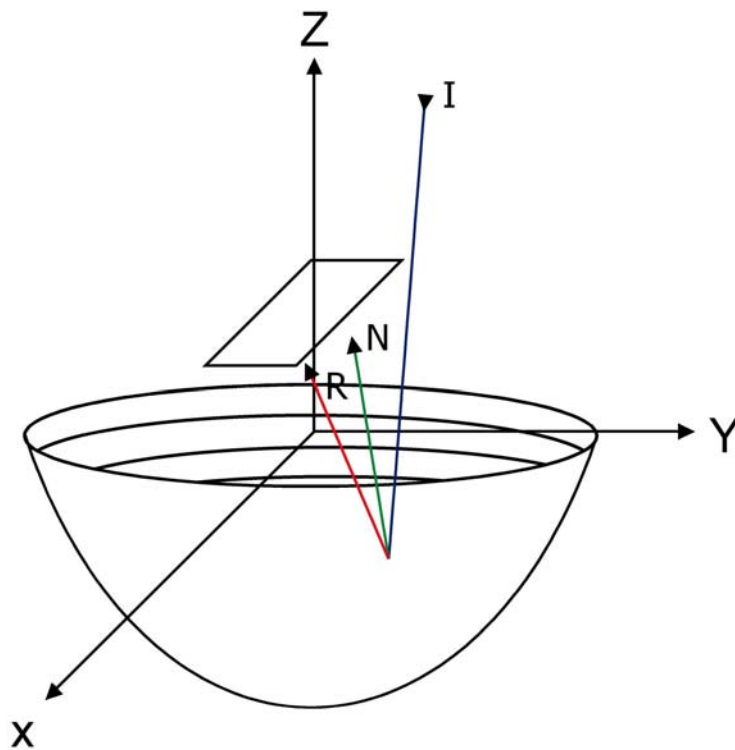


Figura 2.4.2.4, Colector Solar Cónico del tipo Fresnel



## **2.5 Aplicaciones de la Concentración en Sistemas Solares**

El mundo en general ya tiene claro la importancia actual y futura que tiene la energía solar como fuente de energía para diversas aplicaciones. En varias aplicaciones fotovoltaicas y calóricas se utilizan colectores con concentradores. Estos Colectores Solares se designan con diversas geometrías y distintos materiales para cumplir distintas funciones.

Es de suma importancia poder analizar el flujo energético de los colectores para que estos puedan cumplir sus funciones de mejor forma. Para mejorar la vida útil de los elementos receptores utilizados en los sistemas de concentración solar, es necesario distribuir el flujo energético para evitar el “Stress” energético durante su operación.

A continuación se muestran las principales aplicaciones de los colectores solares con concentración que se utilizan hoy en día.

### **2.5.1 Torres Solares Térmicos**

La mayoría de la gente asocia la generación de energía eléctrica directamente con los sistemas fotovoltaicos y no con las plantas solares térmicas. Pero hace más de 15 años que existe este tipo de planta que están generando electricidad a costos relativamente bajos.

La mayoría de las técnicas para generar electricidad utilizando calor necesitan altas temperaturas para lograr eficiencias razonables. Las temperaturas de entrega de sistemas sin concentración se limitan a 200°C. Por esta razón se tiene que utilizar sistemas con concentración. Debido a los altos costos asociados raramente se utilizan lentes ópticos y se tiende a utilizar concentradores reflectores. Estos sistemas se acompañan con sistemas de seguimiento de sol.

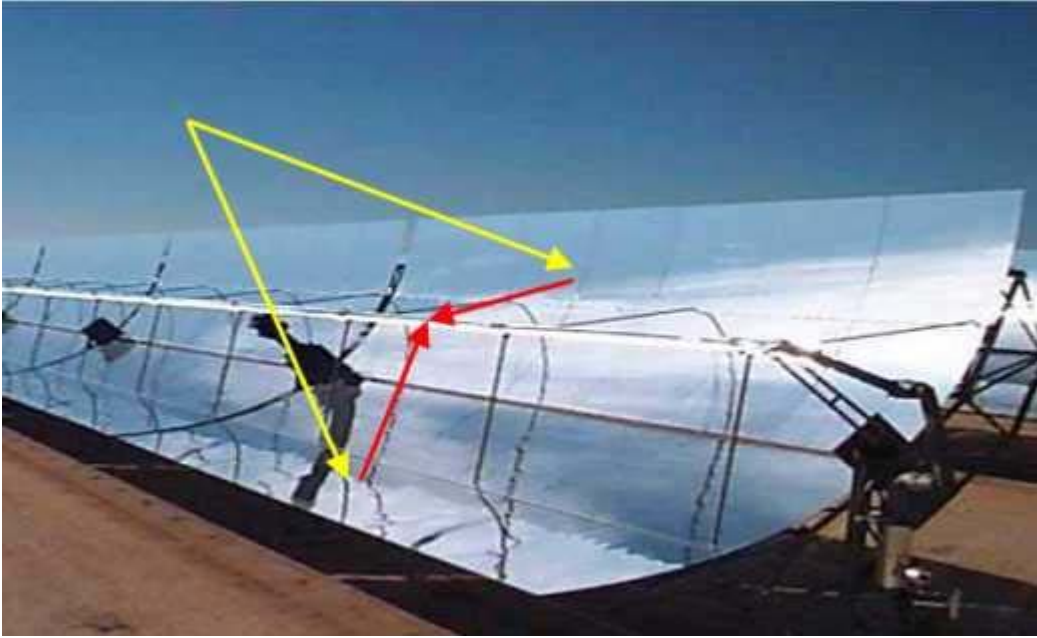


**Figura 2.5.1, Torre de Poder**

### **2.5.2 Colector Parabólico Lineal**

El colector Parabólico Lineal consiste de grandes espejos curvos, los cuales concentran la luz solar en un factor 80 (o más) en la línea focal. Estos colectores pueden tener un largo entre los 300 a 600 metros, y varias filas forman el campo de colección solar.

En la línea focal existe un receptor que consiste en un tubo metálico, dentro del cual pueden circular distinto fluido termodinámico. Este fluido entrega su calor a un circuito cerrado de agua a través de un intercambiador de calor, en el cual el agua se convierte en vapor. El agua pasa por una etapa de compresión, para que posteriormente un economizador, vaporizador y recalentador produzcan vapor saturado de alta temperatura (Ciclo Rankine). Una turbina convierte la energía mecánica a energía eléctrica en un generador eléctrico. El proceso termina con un condensador que vuelve el vapor a su estado líquido. (10)



**Figura 2.5.2.1, Colector Solar Parabolico Lineal Andasol, Espana.**



**Figura 2.5.2.2, Foto area sistema Andasol, Espana.**

### **2.5.3 Sistema Parabólico-Stirling**

El sistema Parabólico-Stirling puede ser usado para generar electricidad en rango de los kilowatts. Un espejo cóncavo parabólico o una superficie facetada concentra los rayos solares; el espejo de dos ejes sigue al sol con un alto grado de exactitud, así logrando altas temperaturas. En el foco esta el receptor que alcanza temperaturas hasta los 650°C. El calor absorbido se entrega a un motor Stirling, el cual mediante el calentamiento de su fluido de trabajo, convierte el calor en energía mecánica con su motor de baja compresión y a través de un generador produce electricidad. La eficiencia de los sistemas Stirling pueden alcanzar el 20% o más.

## **2.6 Análisis Básico de la Concentración**

Considerase un sistema de concentración solar (reflector y receptor), con una orientación solar conocida. Los rayos parten desde una zona del espacio en forma de conos. Estos conos llegan a un punto cualquiera del reflector, y una fracción  $\rho$  de la energía incidente de cada cono es reflejado a su vez en forma de cono.

Los defectos ópticos del reflector producen dos efectos importantes en el rayo reflejado: primero, el semi-ángulo del cono no es igual al semi-ángulo del rayo incidente (reflexión semi-especular); segundo el ángulo de reflexión sufre una pequeña desviación producto de los defectos micro y macro estructurales.

Si este rayo reflejado interceptar al receptor, se produce un intercambio de flujo energético. Si este rayo interceptar al reflector, nuevamente se produce una reflexión. Si el rayo reflejado no interceptar ni al receptor, ni al reflector, entonces el rayo se pierde hacia el espacio, y su energía no es aprovechada.

Teóricamente el máximo factor de concentración es 46,211 y 211, para sistemas 3D y 2D perfectos respectivamente. Es finito porque el sol realmente no es una fuente de



radiación con forma puntual. La temperatura máxima de concentración que se puede alcanzar es igual a la temperatura de la superficie del sol, esta temperatura equivale a 5500°C. Pero los sistemas reales nunca alcanzan esta temperatura teórica. Esto se debe a que es imposible construir un sistema perfecto y los sistemas técnicos que transportan el calor a su lugar de uso también reducen la temperatura de entrega.(10)

## 2.7 Óptica del Concentrador Solar

Para cada nivel de concentración, hay teóricamente un sinnúmero de superficies reflectantes posibles para obtener buenos rendimientos energéticos, lo importante es minimizar las pérdidas de energía en cada una de las fases del proceso de concentración, manteniendo el costo del sistema la más bajo posible.

Este es justamente el objetivo general de este trabajo. Desde el punto de vista óptico, desarrollar una herramienta para estudiar, el tamaño, forma y ubicación de los distintos componentes del sistema de concentración para optimizar su rendimiento.

### 2.7.1 Eficiencia del Sistema de Concentración

a) Eficiencia del sistema colector:

$$\eta_{sc} = \frac{E_{abs}}{E_{refl}}$$

b) Eficiencia óptica o factor de concentración:

$$\eta_{op} = \frac{E_{recop}}{E_{refl}}$$

*donde:*

$E_{refl}$  = Radiación incidente sobre la apertura del reflector,  $[W/cm^2]$ .

$E_{abs} = \text{Energía absorbida por el receptor, [W/cm}^2\text{]}.$

$$E_{abs} = E_{recep} - E_{perd}$$

$E_{recep} = \text{Energía incidente sobre el plano receptor, [W/cm}^2\text{]}.$

$E_{perd} = \text{Perdidas Térmicas en el absorbente, [W/cm}^2\text{]}.$

### 2.7.2 Factor de Concentración Geométrico

$$CR_{area} = \frac{A_a}{A_{recep}}$$

donde:

$A_a = \text{Área de apertura del concentrador, [m}^2\text{]}.$   
 $A_a = \text{Área del receptor, [m}^2\text{]}.$

### 2.7.3 Factor de Concentración Físico

Se define como el cociente entre la potencia radiante que atraviesa la superficie de entrada del concentrador, y la que llegaría al receptor en ausencia de pérdidas por transmisión y reflexión.

$$C_{físico} = \frac{E_{recep}}{E_{refl}}$$

donde:

$E_{refl} = \text{Radiación incidente sobre la apertura del reflector, [W/cm}^2\text{]}.$   
 $E_{recep} = \text{Energía incidente sobre el plano receptor, [W/cm}^2\text{]}.$

#### 2.7.4 Errores o aberraciones ópticas

Los errores que afectan a los concentradores solares corresponden a diferentes fuentes y afectan de diferente manera a la eficiencia del sistema concentrador. Se definirán previamente dos parámetros que facilitarán el posterior análisis.

i) El factor de intercepción ( $\tau$ ): corresponde a la fracción de la radiación especular reflejada que es interceptada por la superficie del receptor. 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 receptor al concentrador, para formar la imagen de intercepción e la ubicación óptima del receptor. Por mínimas que sean las pérdidas térmicas u ópticas en el sistema concentrador, siempre será menor que la unidad.

ii) 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. Lo que implica que R está dado por [12]:

$$R(\Delta\theta) = \frac{R_1}{\sigma_r e^{2\Delta\theta}}$$

y

$$\varepsilon' = 32' + \delta$$

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 estandar 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 receptora difiere de la distribución ideal esperada, esta distorsión es producida por las siguientes causas:

i) Errores de pequeña escala o irregularidades en la superficie, 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 superficial. Estos defectos, producen un aumento en el área de la mancha focal. Este efecto de dispersión aumenta según el radio máximo del reflector y el largo del foco.

ii) 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 defectuosa de la radiación solar medida en la zona focal, y corresponden a defectos a nivel local. Es difícil predecir este tipo de deficiencias para estimar la distribución es una distribución normal ya que los errores de manufactura son aleatorios.

iii) Errores en la posición relativa del receptor frente al reflector. Este tipo de errores producirán un aumento en el área de la imagen en la zona del receptor, 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 sector del receptor.

iv) Errores en la orientación del sistema colector que producen un aumento del área focal y simultáneamente, un desplazamiento de ésta (produciéndose una disminución de la densidad energética en esta área). Para una determinada magnitud del error de orientación, el cambio del factor de intercepción ( $\tau$ ) 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. Para minimizar estos errores y mantener la mejor eficiencia del sistema, se debe mantener una posición adecuada 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 receptor a medida que el sol se mueve a través del cielo. Para esto, existen diversos sistemas de seguimiento.

vi) 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 receptor, y revisan si la posición de éste corresponde a la posición de la mancha focal.

vii) Sistemas de Control Pasivo: Corresponde 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.

## **2.8 Perdidas**

Idealmente en los sistemas solares con concentración toda la energía que llega al receptor debería ser absorbida y convertida en energía útil. La situación real no es así. Las pérdidas en los sistemas solares con concentración, corresponden a pérdidas del tipo térmico (convección, conducción y radiación). También existen las pérdidas ópticas en la superficie del reflector como en el receptor del sistema. Estas pérdidas disminuyen la eficiencia de los colectores, y por ende deben ser analizados antes de construir un colector para una aplicación en particular.

Las pérdidas dependen de los materiales utilizados para su fabricación, y las temperaturas ambientales en el cual se encuentra inserto el sistema solar. Para minimizar las perdidas es muy importante elegir los materiales de los componentes de forma efectiva.

Las perdidas de mayor relevancia se muestran a continuación:

- Imperfecciones en la superficie reflectante.
- Absorción y transmisión de la radiación en el reflector.
- Reflexión en el recubrimiento del receptor.
- Absorción y reflexión en la tapa protector (siempre que existe) del sistema.

### **2.8.1 Pérdidas en los Materiales Reflectantes**

Las pérdidas de energía en los concentradores solares en la reflexión de los rayos, se define de la siguiente forma:

$$P_{refl} = (1 - \rho^n) \times I_{refl}$$

*donde:*

$\rho$  = *Reflectividad del material utilizado en la construcción del relector.*

$n$  = *Numero medio de reflexionces de los rayos dentro del sistema.*

$I_{refl}$  = *Energía radiante que llega al reflector.*

### 2.8.2 Pérdidas en los Materiales Transmisivos

En la mayoría de las aplicaciones solares se utilizan materiales de alta transmisividad, dentro de los cuales se destaca el uso de vidrios y plásticos especiales que reúnen las características necesarias a costos aceptables.

El vidrio transmite el espectro solar en un rango entre los 3  $\mu\text{m}$  del espectro infrarojo, hasta por debajo de los 0.38  $\mu\text{m}$  en el ultravioleta. Este tipo de pérdida varía con el ángulo de incidencia del rayo. La energía que no es transmitida se calcula como [13]:

$$P_{\text{tapa}} = (1 - \tau) \times I_{\text{refl}}$$

*donde:*

*$P_{\text{tapa}}$  = Pérdida de energía por reflexión y absorción de la tapa del sistema, siempre y cuando esta existe.*

*$\tau$  = Función de transmisividad, en función de la longitud de onda del material de la tapa.*

### 2.8.3 Pérdidas Ópticas en el Receptor

Las pérdidas del tipo óptico que se originan en el captor son causadas por reflexión de la radiación incidente en el receptor. La energía que deja de ser percibida se calcula como [13]:

$$P_{\text{recep}} = (1 - \alpha) \times I_{\text{recep}}$$

*donde:*

$\alpha$  = *Es la absorptividad de la superficie del captor, característica propia de cada material.*

$I_{\text{recep}}$  = *Energía radiante que llega al receptor.*

### **3. METODOLOGIA ESPECÍFICA**

Cada colector tiene sus propias características de funcionamiento. Estas características entregan la eficiencia para transferir energía por unidad de tiempo al absorbente. Esta energía por unidad de tiempo se denomina kilowatt, [kw].

Como ya se mencionó anteriormente existen distintos métodos para analizar el comportamiento de los colectores. Estos distintos métodos: directo, indirecto, analítico y numérico se muestran a continuación:

#### **3.1 Métodos de Análisis**

##### **3.1.1. Métodos Directos**

Estos métodos también conocidos como métodos calorimétricos, calculan la cantidad de flujo de calor en la zona focal. Esto se calcula mediante un receptor de características conocidas que es colocado en la zona focal. Se mide la temperatura del receptor. Con la temperatura se procede a calcular la potencia y barriendo la zona de interés, es posible conocer la distribución del flujo de calor.

Los métodos directos tienen la ventaja de que miden directamente la cantidad de energía que es dirigida al absorbente y la desventaja de que se necesita de una gran cantidad de ensayos en diversas condiciones para reproducir resultados homogéneos. Lo que en el largo plazo es muy costoso. Este método implica en uso de un prototipo y es difícil predecir su funcionamiento antes de su construcción.

### **3.1.2. Métodos Indirectos**

Esta familia de métodos asocia una cantidad de energía radiante calórico a la radiación producida por la luz. A continuaciones muestra un método directo conocido como el método de la Esfera de Integración.

En el método de Esfera de Integración se ocupa una esfera hueca, cuyo interior es rugoso, con una apertura pequeña. Se hace entrar la radiación por esta apertura haciendo así que la esfera actúe como un cuerpo negro absorbiendo toda la radiación. Se puede demostrar que para una radiación incidente dada, la intensidad en el interior es constante en todo el volumen encerrada por la esfera.

Para medir la radiación, se coloca un detector llamado fotopila en el extremo opuesto de la apertura y se mide la luz incidente sobre él. De esta forma se ha logrado obtener la distribución de flujo energético desplazando la esfera dentro del volumen de control.

### **3.1.3. Métodos Analíticos**

Estos métodos se basan en matemáticas complejas que hacen cálculos globales del balance energético y de transferencia de calor. La energía se divide en energía recibida (colector), energía perdida (transmisión o transferencia al exterior) y energía aprovechada. El estudio de la transferencia de calor analiza la conducción, convección y radiación en la energía en el sistema.

Debido a la gran cantidad de supuestos es difícil que este método sea considerado exacto. Aunque si entrega una buena aproximación de las potencias, rendimientos globales y temperaturas de operación para geometrías simples.

#### **3.1.4. Métodos Numéricos**

El siguiente método numérico llamado método de trazado de rayos es el método que se utilizará para este trabajo de memoria. El método de trazado de rayos se basa en dividir la radiación en un número finito de portadores o rayos solares. Después se procede a seguir la trayectoria de cada rayo que entrar al colector hasta que es absorbido por el receptor o reflejado hacia el exterior.

Para un colector con concentración y condiciones de insolación conocidas, se divide la insolación incidente en un número finito de rayos solares. La energía que transporta cada rayo es la multiplicación del área del rayo por la radiación incidente. Para escoger los rayos que se utilizaran se utilizara el método Monte Carlo.

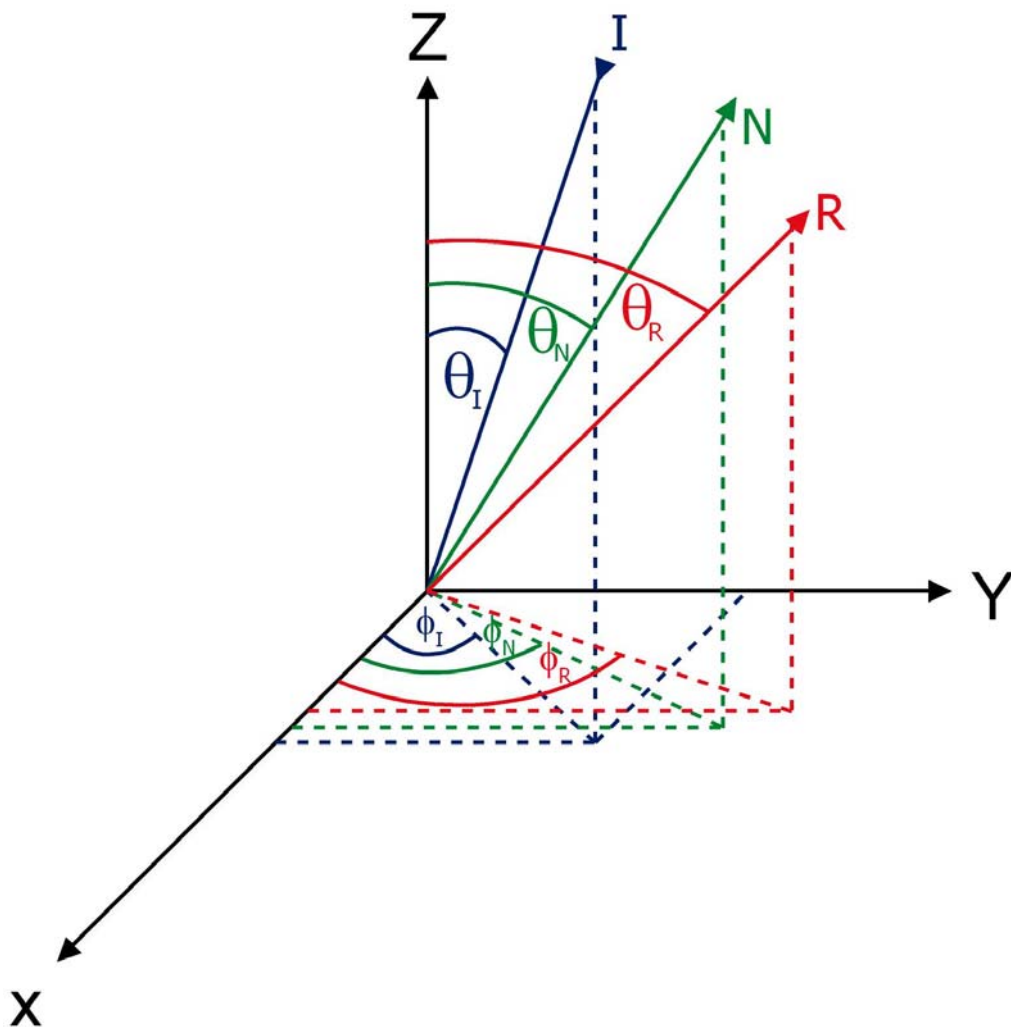
Este método tiene varias ventajas sobre los otros métodos y a medida que han avanzado los computadores, también ha avanzado el uso de este método entre los científicos del área solar.

### **3.2 Trazado de Rayos**

La base de los programas de trazados de rayos es crear un programa de seguimiento de los rayos dentro del sistema hasta que este es absorbido o rebotado hacia el exterior, también existe la posibilidad de que el rayo disminuya demasiado su energía producto de un excesivo número de reflexiones. En cada reflexión existe pérdidas por defectos que disminuyen substancialmente la energía de los rayos reflejado en comparación con el incidente. Para lo que concierne esta memoria la cantidad máxima de reflexiones es 3, dado que después de la cuarta reflexión, la energía que transporta este rayo es considerado insignificante.

El programa consiste en la utilización del método de Monte Carlo en conjunto a un trazado de rayos que se basa en las leyes de la reflexión especular, suposiciones y parámetros que incluyen los defectos de los colectores.

El trazado de rayos utiliza los el vector inicial o de entrada, el vector normal a la superficie donde el rayo inicial hace contacto con la superficie del colector y el vector reflejado. Cada vector tiene un ángulo con respecto a la vertical y otra con respecto a su orientación en el plano XY, (ver Figura 3).



**Figura 3, Angulos y Rayos**



### 3.2.1. Ecuación del Rayo

Un rayo es definido por un origen,  $E = (X_E, Y_E, Z_E)$ , y un vector offset,  $D = (X_D, Y_D, Z_D)$ .

Mientras que la ecuación del rayo es:

$$P(t) = E + t \times D, t \geq 0$$

Cuando se busca el punto de intersección entre el rayo y el objeto, se esta buscando punto de intersección con el menor valor positivo de  $t$ .

Para trazar los rayos será necesario encontrar las primitivas de todas las geometrías que se estudiaran durante el trabajo de titulo del alumno. Con las primitivas se puede interceptar la geometría con un rayo arbitrario, substituyendo la ecuación del rayo con la primitiva de la geometría a estudiar.

### 3.3. Simulaciones Monte Carlo

El hecho de que esta técnica estadista reciba el nombre del famoso casino se debe precisamente a que explota las posibilidades de la “aleatoriedad” que permiten los paquetes informáticos. En esencia, una simulación de Monte Carlo (MC) consiste en replicar un ejerció una gran cantidad de veces, de modo que cada replicación individual no tenga una incidencia revelante en el total.

Se puede definir una simulación MC como cualquier programa computacional que utilice números aleatorios para simular procesos estocásticos, [7]. En esta memoria se utiliza el método de Monte Carlo para escoge los rayos solares de entrada al colector y para escoger el diametro del cono solar asociado a cada rayo.

## **4. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA.**

En este capítulo se describe en detalle, el programa de trazado de rayos en tres dimensiones desarrollado durante la memoria.

El programa fue desarrollado en Matlab 7.0 y ocupa tres elementos: reflector, rayos y receptor. El programa tiene la una estructura que muestra un menú principal donde el usuario ingresa las características principales del colector (reflector y receptor) y a su vez el programa entrega un diagrama del flujo energético y un imagen representativo de la trayectoria de los rayos.

Los rayos solares, reflectores y receptores, están definidos mediante geometría analítica en tres dimensiones, así como los procedimientos de cálculo de intersección y reflexión.

### **4.1 Mejoras del Programa**

Este trabajo de título tiene como objetivo secundario mejorar lo hecho por alumnos de la Universidad de Chile en los años 1990 y 1991, por Carlos Silva y Carlos Contreras respectivamente.

El trabajo de Carlos Silva fue un programa computacional escrito en Basic, programa que por la época tiene poca validez hoy en día y se ha vuelto obsoleto. El programa escrito por Carlos Silva, analizó solo casos bidimensionales y se restringió al estudio de 3 tipos de colectores.

El programa escrito por Carlos Contreras fue escrito en C. Lo que en su momento ya se estaba volviendo obsoleto en comparación con su sucesor C+. Este programa si analizó varios colectores de buena forma, pero no sirvió como una herramienta para seguir con los estudios, por la falta de módulos que ayudaran a comprender el programa.

Como resultado el programa escrito por Jorge Coronado, es modular de fácil comprensión y variable para el estudio de distintos tipos de colectores y situaciones. La interfase es simple y los gráficos son representativos. Otra mejora es el uso de una función del tipo Monte Carlo para escoger los rayos incidentes al colector, y no un barrido sistemático como en el caso de las dos memorias anteriores. De esta forma se reduce el error asociado al método numérico.

## 4.2 Hipótesis

Las hipótesis de trabajo son:

1. Se considera el rayo solar como un ángulo sólido de magnitud  $\varepsilon_0$ , (ver Figura 4).

2. Al ángulo sólido del rayo solar se le asocia una distribución energética dada por:

$$E(\varepsilon) = 0.31 + 0.69 \times \left[1 - \left(\frac{\text{sen}\varepsilon}{\text{sen}\varepsilon_0}\right)^2\right]^{1/2}$$

3. Se divide el reflejo del rayo solar en un número finito de subrayos escogidos por un método Monte Carlo. Cada uno de estos rayos transporta una fracción de la energía total del rayo solar.

4. Se considera que los rayos incidentes y reflejados cumplen con las leyes básicas de la reflexión especular.

5. Los defectos del receptor que provocan la dispersión son cuantificados mediante un mayor ángulo sólido de los subrayos.

6. Se considera la reflectividad del reflector como una constante del material,  $\rho$ .

7. Dado que se trabaja con la energía que llega a los receptores y no con los materiales de estos, se supone una absorptividad constante e igual a la unidad.

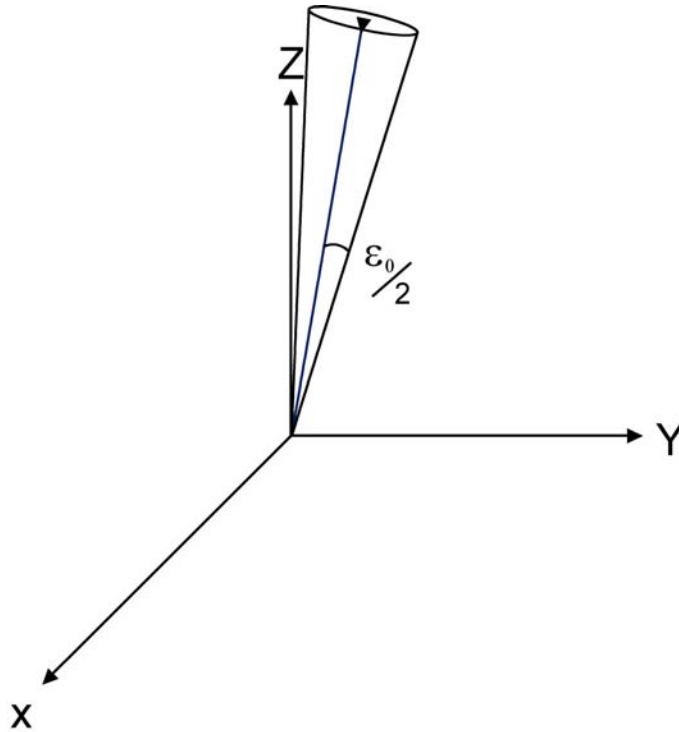


Figura 4, Cono Solar.

### 4.3 Alcances

Con las suposiciones indicadas, y la forma en la cual se desarrolló el programa, este tiene los siguientes alcances:

1. El proyecto se limita al método numérico de trazados de rayos utilizando el método numérico de Monte Carlo.
2. Se limita el estudio a los colectores del tipo Parabólico Lineal, Facetado Lineal, Paraboloide con Revolución, Casquete Hemisférico, y Facetado Lineal Parabólico.

3. Se estudiarán superficies continuas y facetadas.
4. Se limita el estudio a los receptores planos rectangulares.
5. El programa computacional utilizado será Matlab, en su versión 7.0.
6. Analizar la densidad del flujo de energía.
7. Utilizando Matlab 7.0 crear una interfase que entregue los resultados en forma clara.

A pesar de sus alcances limitados el programa está desarrollado de una forma que permite su modificación para expandir su alcance. De esta forma se podrán incorporar distintos reflectores y receptores, para su estudio.

#### **4.4 Estructura General del Programa.**

El programa fue creado para ser usado como una herramienta de trabajo que permitiera su futura expansión. Por esta razón se creó de la forma más simple posible y en subrutinas que permiten la comprensión de cada función paso a paso. La lógica del presente programa consiste en hacer un seguimiento de rayo por rayo. Las trayectorias de los rayos son seguidas a través de su paso por el colector solar, hasta que ellos son absorbidos, perdidos o hasta que su energía se vea tan disminuida que no afecta los cálculos. En el plano de estudio se analiza la energía entregada al receptor en cada punto de este.

La estructura general del programa se divide en 17 subrutinas, las cuales son iteradas varias veces para entregar al usuario el flujo energético y una imagen en 3 dimensiones del flujo de energía.

A continuación se detalla la función de cada subrutina:

#### **4.4.1 Modulos**

##### **4.4.1.1 SelecColec**

En esta subrutina, se selecciona el tipo de colector. El usuario puede escoger entre los siguientes colectores con concentración: Cilindro Parabólico, Paraboloides, Casquete Hemisférico, Concentrador Parabólico Compuesto (Concentrador Parabólico Compuesto), Concentrador Cónico Facetado del tipo Fresnel.

Una vez que el usuario selecciona el tipo de colector, la interfase GUI traslada el usuario hacia la subrutina Inputs.

##### **4.4.1.2 Inputs**

Inputs, es la interfase donde el usuario ingresa todas las características y valores de las variables que le interesan para el software del programa. Esta interfase, fue hecha utilizando la herramienta de Matlab conocida como Gui.

Con esta simple interfase el usuario ingresa las distintas características del colector con concentración seleccionado en “SelecColec”.

Posteriormente se ingresa las características del receptor, la superficie de estudio es un rectángulo plano. Las características de interés son el largo, ancho y altura con respecto a la base del reflector.

Y finalmente el usuario ingresa los valores de los ángulos incidentes, Teta  $\theta_{in}$  y Sigma  $\Phi_{in}$ .

#### **4.4.1.3 Cálculos Iniciales**

En este sub programa se hacen todos los cálculos simples preliminares necesarios para el programa. Se establecen los rangos de las variables X, Y, e Z, los extremos de la superficie del colector y el valor de los ángulos ingresado en **Inputs** en radianes.

Aquí también se aprovecha de especificar los valores de las matrices o variables antes que empiece las iteraciones, como por ejemplo se especifica que todos los valores iniciales de la matrice de energía, A, tienen un valor igual a cero.

#### **4.4.1.4 CreateMatrix3d**

Esta sub rutina crea la matrice de almacenamiento de energia, la cual representa la superficie del receptor. La matrice se crear utiulizando el imput Delta, ingresado en el segundo subprograma, detallado en 4.4.1.2.

#### **4.4.1.5 MC1**

Utilizando una función del tipo Monte Carlo se procede a escoger un punto cualquier de la superficie superior (tapa) del reflector. Este punto es conocido como el “Punto 0”. A partir de este punto se traza una recta con las direcciones dadas por Sigma  $\Phi_{in}$  y Teta  $\theta_{in}$ .

#### **4.4.1.6 IntRecepIN**

Si el rayo que se origina en el punto entregado por la subrutina MC1 intercepta el Receptor, esta fuljo energético es dado por perdido y se procede a incrementar en una unidad el numero de la Subrutina “IncrementMC1”.

En el caso que el rayo no intercepta la parte superior del receptor este intercepta directamente con la superficie reflectante del colector.

#### **4.4.1.7 IntRefl1**

Cuando el rayo no se vez obstruido por el receptor este intersectaria al reflector. Esta subrutina entrega las coordenadas del punto correspondiente al la intersección del rayo con la superficie del reflector. Este punto es conocido como el “Punto 1”.

#### **4.4.1.8 RayoRefl1**

Esta subrutina entrega las características que describen el rayo reflejado desde el Punto 1, utilizando la normal de dicho punto.

#### **4.4.1.9 FRhoE1**

Cuando un rayo es reflejado, este sufre una perdida de energía que transporta, debido a los defectos superficiales de los materiales de reflexión. Esta perdida se ve disminuido según el índice Rho de cada material. En esta función se calcula el nuevo flujo de energía asociado al rayo reflejado.

#### **4.4.1.10 IntRecep1**

En esta subrutina se entrega las coordenadas de la intersección entre el rayo y el plano de estudio ( $z = 0$ ) y calcula si el rayo intersecto el receptor. En este caso el rayo que no es absorbido por el reflector puede ser reflejado o es perdido en el espacio. En ambos casos, cuando un rayo no intercepta el receptor en la subrutina IntRecep1, el rayo pasa a “IntRefl2”.

#### **4.4.1.11 HeatGraf3d**

Para graficar el flujo de energía se utiliza esta subrutina. HeatGraf3d grafica de forma tridimensional el flujo energético, apoyado en las herramientas de Matlab, HeatGraf3d es capaz de mostrar el flujo energético representado por colores que demarcan las zona con mayor flujo.

Esta es una de las subrutinas mas importantes, en esta subrutina se almacena la cantidad de flujo energético absorbido por el receptor en la Matrice 3D. Esta matrice



tiene la forma del rectángulo del plano de estudio y entrega en forma clara el flujo energético sobre la superficie del receptor. La sumatoria de la energía de esta matrice represente la energía total absorbida por el sistema y corresponde al numerador del coeficiente de concentración.

#### **4.4.1.12 RayGraf3d**

RayGraf3d utiliza solo los primeros 50 rayos de las iteraciones de Monte Carlo, MC1, que no interceptan con el receptor en IntRecepIN. Los 50 rayos son proyectados desde el espacio, pasando por su intersección con el colector, Punto 1, hasta su intersección con el plano de estudio,  $Z = 0$ . En este grafico se muestra claramente el comportamiento del sistema de colector solar con concentración, incluyendo todos sus elementos: reflector, rayos (incidentes y reflejados) y el receptor (plano de estudio).

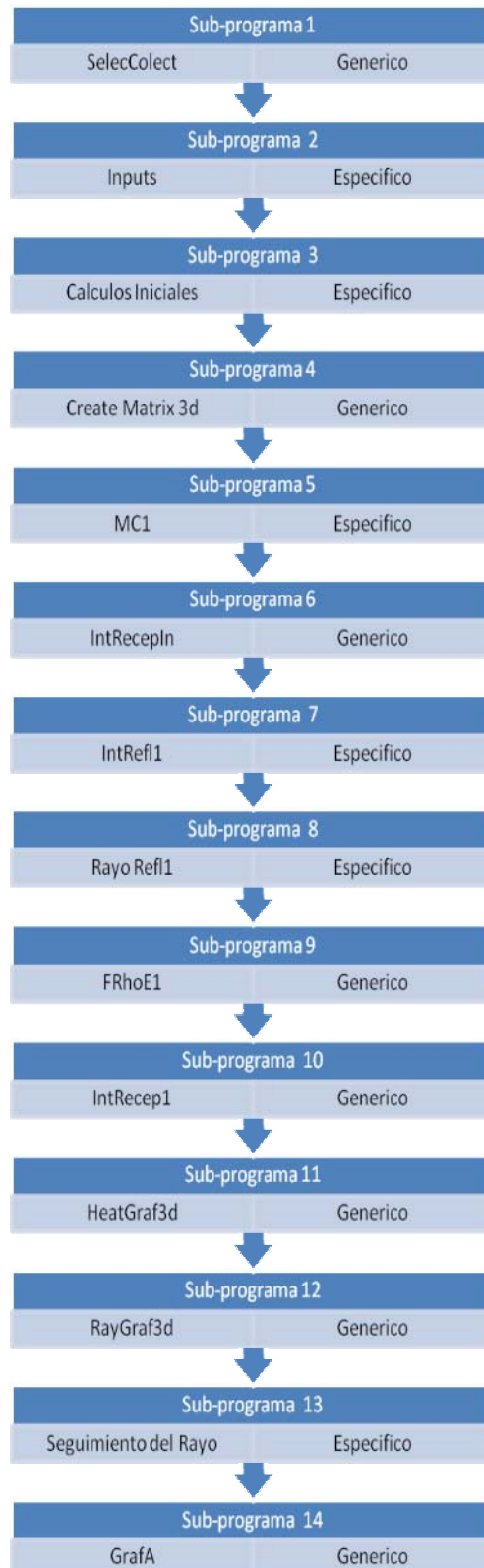
#### **4.4.1.13 Seguimiento del Rayo**

En el caso de que el rayo reflejado originalmente producto del rayo incidente, no fuera absorbido por el receptor, IntRecep1, se procede a estudiar la trayectoria de este rayo. Si el rayo intersecta el reflector, entonces se calcula el lugar de intersección y el rayo resultante para analizar si este fue absorbido o perdido en el espacio.

#### **4.4.1.14 GrafA**

Este sub programa grafica la matrice A, para que el usuario pueda ver gráficamente el flujo de energía en el receptor.

## 4.5 Diagrama de Flujo



## 4.6 Algoritmos de Cálculo.

El análisis de las trayectorias de los rayos, y de los flujos de energía, se hace mediante algoritmos de cálculos. A continuación se muestran los algoritmos utilizados en el desarrollo del programa computacional.

### 4.6.1 Cálculos Iniciales

Los cálculos iniciales que se utilizan en los sub programas *a3Calculos* son simples, y fueron creados para asegurar que las variables estén en las unidades utilizadas por Matlab y para predefinir matrices y variables, las cuales serán iteradas mas adelante en el programa.

Primero se definen los extremos del plano receptor. A continuación se muestra los cálculos:

$$x_{maxrecep} = \frac{Lxrecep}{2}$$

$$x_{minrecep} = \frac{-Lxrecep}{2}$$

$$y_{maxrecep} = \frac{Ayrecep}{2}$$

$$y_{minrecep} = \frac{-Ayrecep}{2}$$

*donde:*

*x<sub>maxrecep</sub> = X máximo del receptor*

*x<sub>minrecep</sub> = X mínimo del receptor*

*y<sub>maxrecep</sub> = Y máximo del receptor*

*y<sub>minrecep</sub> = Y mínimo del receptor*

*Lxrecep = Largo del receptor, eje X.*

*Ayrecep = Ancho del receptor, eje Y.*

En segundo lugar se definen los ángulos de entrada de los rayos incidentes en radianes, los cuales se muestran a continuación.

$$\theta_I = \frac{\pi \times \theta_{Ideg}}{180}$$

$$\varphi_I = \frac{\pi \times \varphi_{Ideg}}{180}$$

*donde:*

*$\theta_I$  = Angulo Incidente con respecto al eje Z expresado en radianes.*

*$\varphi_I$  = Angulo Incidente con respecto al eje X expresado en radianes.*

*$\theta_{Ideg}$  = Angulo Incidente con respecto al eje Z expresado en grados.*

*$\varphi_{Ideg}$  = Angulo Incidente con respecto al eje X expresado en grados.*

#### **4.6.2 Rayo Incidente**

El rayo incidente parte desde un punto del plano correspondiente a la tapa del colector, donde el valor de la variable z es igual a cero, a través de la subrutina MC1, este punto es escogido de forma aleatoria, así disminuyendo el error asociado a tesis anteriores que escogían sus punto de partida mediante un barrido esquemático. Por ende el rayo incidente es caracterizado por el Punto 0 y la dirección dado por  $\theta_I$  y  $\varphi_I$ .

En el programa se calcula de la siguiente manera:

*Punto de partida.*

$$MC1y = rand$$

$$y_0 = MC1y \times Aycolec - \frac{Aycolec}{2}$$

$$xmaxplano = \sqrt{\left(\frac{Aycolec}{2}\right)^2 - y_0^2}$$

$$MC1x = rand$$

$$x_0 = MC1x \times 2 \times xmaxplano - xmaxplano$$

$$z_0 = 0$$

$$Punto_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$$

*donde:*

*rand = es una función aleatoria de Matlab.*

*MC1y = es la función aleatoria asociada a la variable Y.*

*xmaxplano = es el valor máximo de la variable X en el plano circular.*

*MC1x = es la función aleatoria asociada a la variable X.*

*Punto<sub>0</sub> = es el punto de partida de los rayos, (X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>, Z<sub>0</sub>).*

#### **4.6.3 Intersección con la Parte Superior del Receptor**

Si el rayo que se origina en el punto entregado por la subrutina MC1 intercepta el Receptor, este flujo energético es dado por perdido y se procede a incrementar en una unidad el numero de la Subrutina “IncrementMC1”.

Los valores de las variables X e Y en el plano de estudio son calculados proyectando sus ángulos de incidencia por la distancia en el eje Z, entre el punto0 (Z = 0) y la altura del plano de estudio Hp.

$$x_{dif} = \cos \varphi_i \times \tan \theta_i \times H_p$$

$$y_{dif} = \sin \varphi_i \times \tan \theta_i \times H_p$$

*donde:*

$$H_d = \text{Altura desde Punto0 a } z = 0.$$

$$x_{dif} = \text{Proyeccion en el eje X.}$$

$$y_{dif} = \text{Proyeccion en el eje Y.}$$

Por ende el rayo a travesia el plano donde se ubica el receptore en:

$$(X_0 + X_{dif}, Y_0 + Y_{dif}, H_p)$$

#### **4.6.4 Intersección entre Rayo y Colector.**

El punto de intersección entre el rayo incidente y la superficie del reflector es la intersección de ambas ecuaciones. En forma genérica se sustituye las variables, X,Y e Z de la ecuación del colector por,  $X_0(t)$ ,  $Y_0(t)$  e  $Z_0(t)$ , del punto 4.4.1. Esta igualdad de ecuaciones entrega las coordenadas del punto correspondiente al la intersección del rayo con la superficie del reflector. Este punto es conocido como el “Punto 1”.

En el programa se calcula de la siguiente manera:

*Punto de Interseccion.*

*Ecuación de la recta*

$$x(t) = x_0 + tx_d$$

$$y(t) = y_0 + ty_d$$

$$z(t) = z_0 + tz_d$$

*Caso 1: Si  $\theta_i \neq 0$  e  $\varphi_i \neq 0$ ,*

$$x_d = \sin\theta_i \cos\varphi_i$$

$$y_d = \sin\theta_i \sin\varphi_i$$

$$z_d = \cos\theta_i$$

*Caso 2: Si  $\theta_i \neq 0$  e  $\varphi_i = 0$ ,*

$$x_d = \sin\theta_i$$

$$y_d = 0$$

$$z_d = \cos\theta_i$$

*Se procede a remplazar las ecuaciones de,  $x_0, y_0$  e  $z_0$ , en la*

*ecuación de la superficie del colector de la forma  $0 = f(x, y, z)$ .*

*Lo que entrega una ecuación de segundo grado de la siguiente forma:*

$$0 = at^2 + bt + c$$

*lo que entrega el siguiente valor para t:*

$$t = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

*El signo que precede la raíz cuadrado es negativo porque si la superficie no fuese acotada la ecuación de la recta intersectaría la ecuación de la superficie en dos puntos siendo el menor de estos la intersección de interés*

*Remplazando el valor de t en  $x(t)$ ,  $y(t)$  e  $z(t)$  se obtiene la intersección.*

*Caso 3: Si  $\theta_i = 0$ ,*

$$x_1 = x_0$$

$$y_1 = y_0$$

$$z_1 = f(x_1, y_1)$$

$$\text{Punto 1} = [x_1, y_1, z_1]$$

#### **4.6.5 Rayo Reflejado**



Para calcular el rayo reflejado, se empieza por el punto de intersección entre el rayo incidente y la superficie del colector, Punto 1. La reflexión del rayo incidente, se realiza siguiendo la ley de Snell, es decir, que los rayos (incidente y reflejado) y la normal a la superficie están en el mismo plano; y los ángulos entre los rayos y la normal son iguales, esto significa que el ángulo incidente es igual al rayo reflejado. Para caracterizar el rayo reflejado es necesario resolver las siguientes ecuaciones.

a) Este es el parámetro de la normal vertical de la superficie en el Punto 1. Este parámetro corresponde a la distancia entre el punto 1 y el punto nv, en el plano vertical (ver figura 4.6.5):

$$d3_{nv} = \sqrt{(x'^2 + y'^2 + 1)}$$

donde:

$x'$  : es la derivada parcial de la ecuación de la curva según  $x$  (eje X).

$y'$  : es la derivada parcial de la ecuación de la curva según  $y$  (eje Y).

b) Este es el parámetro de la normal horizontal de la superficie en el Punto 1. Este parámetro corresponde a la distancia entre el punto 1 y el punto nh, en el plano horizontal:

$$d3_{nh} = \sqrt{(x'^2 + y'^2 + 1)}$$

La solución numérica de este sistema de ecuaciones se realiza por simple despeje de las variables de interés:

$$\theta_R = 2 \times \cos^{-1}(1/d3_{nv}) - \theta_i$$

Si  $\theta_i = 0$ , entonces:

$$\varphi_R = \cos^{-1}(-x'/d3_{nh})$$

Si  $\theta_i \neq 0$ , entonces:

$$\varphi_R = 2 \times \cos^{-1}(-x'/d3_{nh}) - \varphi_i$$

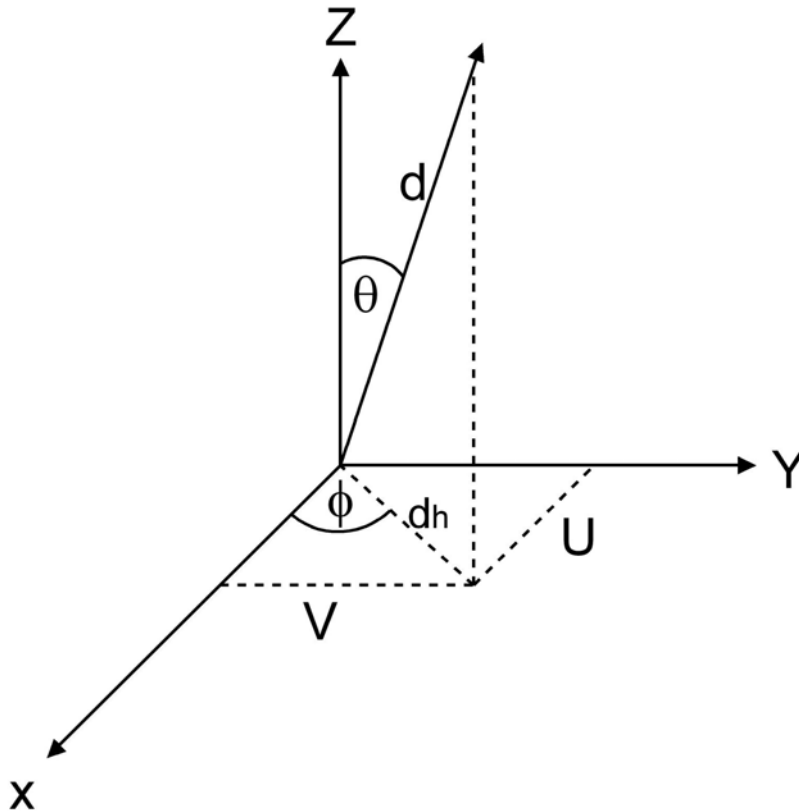
donde:

$\theta_i$ : es el ángulo incidente con respecto al eje Z.

$\varphi_i$ : es el ángulo incidente con respecto al plano XY.

$\theta_R$ : es el ángulo reflejado con respecto al eje Z.

$\varphi_R$ : es el ángulo reflejado con respecto al plano XY.



**Figura 4.6.5, Descomposicion de la derivada del vector normal**

#### **4.6.6 Intersección entre el rayo reflejado y el plano de estudio.**

Para ver si el rayo reflejado hace contacto con el receptor se procede a igualar ambas ecuaciones, lo que entrega el Punto 2. Con el Punto 2 se analizan las variables para ver si estas están dentro de los rangos del receptor.

En un principio los rayos son utilizados como rayos puntuales o mejor dicho como rectas, estas rectas corresponden a los ejes de los rayos, pero en realidad los rayos incidentes y reflejados tiene formas de conos, lo que se explica en mayor detalle en el punto 4.6.7.

$$X_2 = \{(HP - Z_1) \times (\sin \theta_R) \times (\cos \phi_R) / (2 \times \cos \theta_R)\} + X_1$$

$$Y_2 = \{(Hp - Z_1) \times (\sin \theta_R) \times (\sin \varphi_R) / (2 \times \cos \theta_R)\} + Y_1$$

$$Z_2 = Hp$$

Siendo el Punto2 =  $(X_2, Y_2, Z_2)$

#### 4.6.7 Intersección del cono reflejado con el plano de estudio.

Mas adelante se procederá a analizar el como cono, esto es importante porque cuando el rayo reflejado hace contacto con el plano de estudio, el cual es paralelo al plano que corresponde a la área de apertura del sistema y tangente al plano Z, esta intersección representa una elipse. El eje del rayo reflejado corresponde al centro de la elipse. Las características de esta elipse se muestran a continuación en la figura 4.6.7.

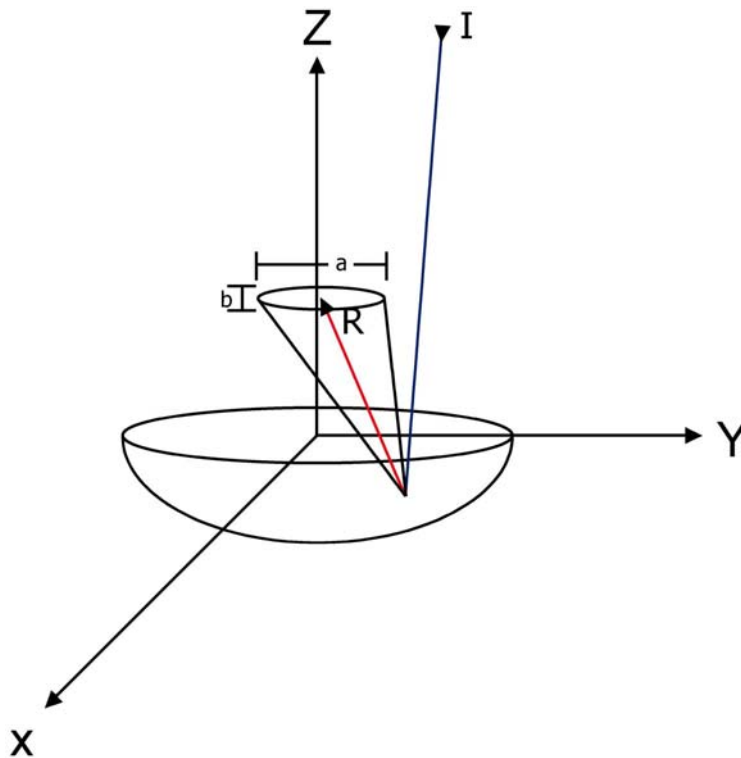


Figura 4.6.7, Cono reflejado.

i) Semi-eje menor:

$$b = d \times \tan\left(\frac{\xi}{2}\right)$$

ii) Semi-eje mayor:

$$a = d \times \sin \theta_R - d \times \cos \theta_R \times d \times \tan\left(\theta_R - \left(\frac{\xi}{2}\right)\right)$$

*donde:*

*d: es la distancia entre el Punto1 y el Punto2.*

Mediante un par de funciones aleatorias se escoje un punto dentro de la elipse,  $(X_E, Y_E)$ , con este punto y la orientacion com respecto al sistema de coordenadas se calcula el Punto3, el cual se el punto de recepcion del sub-rayo.

*donde:*

$$X_3 = X_2 + X_E \times \cos \varphi_R$$

$$Y_3 = Y_2 + Y_E \times \cos \varphi_R$$

$$Z_3 = Z_2$$

$$Punto3 = (X_3, Y_3, Z_3)$$

#### 4.6.8 Flujo de Energía.

Para el análisis del flujo de energía que transporta cada rayo reflejado (cono reflejado), se procedió a dividir este cono en un número finito de subrayos. Estos subrayos fueron escogidos mediante una función del tipo Monte Carlo y cada uno tiene asignada una cantidad de energía proporcional al segmento que lo rodea.

Como ya se dijo anteriormente, el cono reflejado intercepta el plano de estudio en forma de elipse. Esta elipse fue dividida en una elipse central y dos anillos, estos anillos fueron divididos en 8 sub áreas cada uno, lo que implica 17 sub áreas de igual tamaño, (ver figura 4.5.8). Mediante la función de Monte Carlo se escoge un punto de la elipse mayor al azar, a este punto se le asigna un subrayo con el flujo de energía equivalente al lugar de intersección con el plano de estudio.

Por lo tanto la energía que contiene cada anillo queda definido por:

$$E_{r_2-r_1} = \pi \times L_r \times \left\{ a \times (r_2 - r_1) + b \times \frac{2}{3} \times (1 - r_1)^{\frac{3}{2}} - (1 - r_2)^{\frac{3}{2}} \right\}$$

donde:

$$L_r = 0.0539372 / \text{sen}^2 \varepsilon^1$$

$r_1$  = radio interior del sub anillo

$r_2$  = radio exterior del sub anillo

Por ende la energía que contiene cada subrayo es:

$$E_{\text{subrayo}} = \frac{E_{r_2-r_1}}{8}$$

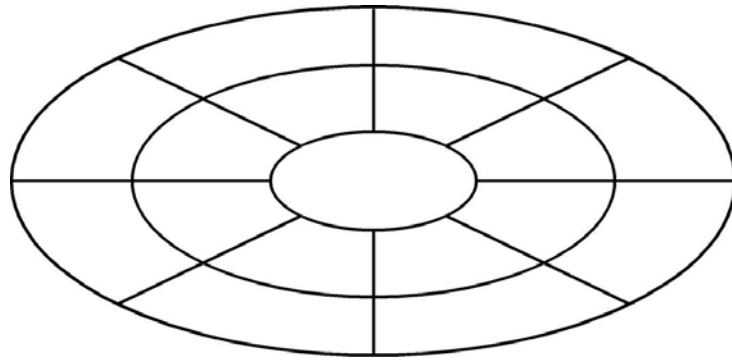


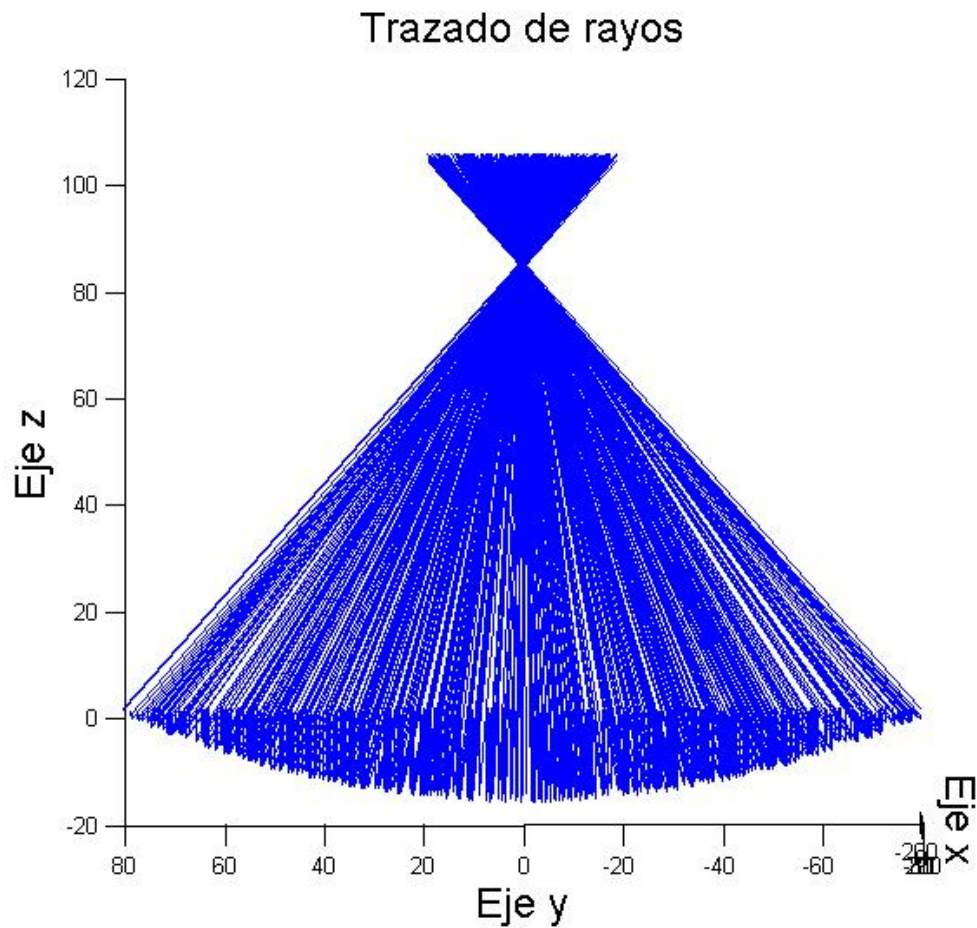
Figura 4.5.8

## 5. RESULTADOS DEL PROGRAMA

### 5.1 Sistemas Lineales

#### 5.1.1 Concentrador Solar Parabólico Lineal

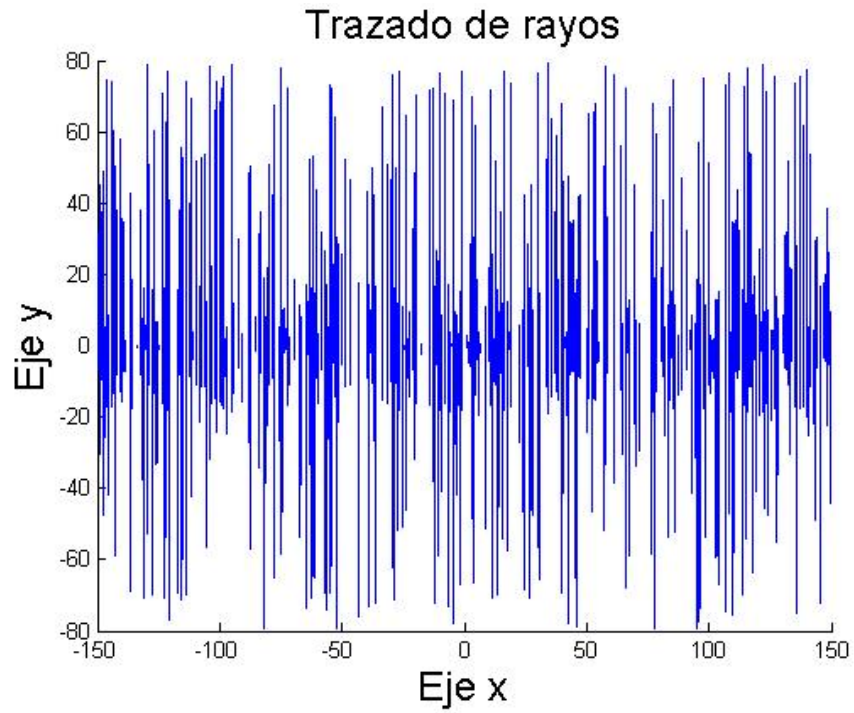
Este sistema fue validado mediante los gráficos junto a la profesora guía. Se aprecia que los rayos llegan a la zona focal, se concentran en una línea focal para distintos ángulos de incidencia entre. Los errores fueron corregidos y el resultado final es satisfactorio, (ver figura 5.1.1).



**Figura 5.1.1, Rayos reflejados a la zona focal, Parabolico Lineal.**



También se aprecia gráficamente que los rayos son escogidos de forma aleatoria sin dar indicios de saturaciones o patrones, lo cual implica que la función Monte Carlo esta cumpliendo su función, (ver figura 5.1.2).



**Figura 5.1.2, Funcion Aleatoria Monte Carlo, Parabolico Lineal.**

### **5.1.2 Concentrador Solar Fresnel Lineal**

El subprograma utilizado para estudiar el los colectores Lineales del tipo Fresnel, es básicamente el mismo desarrollo que el utilizado para los colector Parabólicos Lineales, dado que los Fresnel siguen un perfil parabólico.

El desarrollo de este subprograma fue creado para ser la herramienta de construcción de los colectores del tipo Fresnel Lineales. El usuario solo tiene que ingresar las características del perfil parabólico y en ancho del espejo que se utiliza en el arreglo facetado. El programa utiliza estos datos y construye el colector y posterior con los ángulos de incidencia entregados calcula el flujo energético y grafica los rayos incidentes y reflejados.

## **5.2 Sistemas Puntuales**

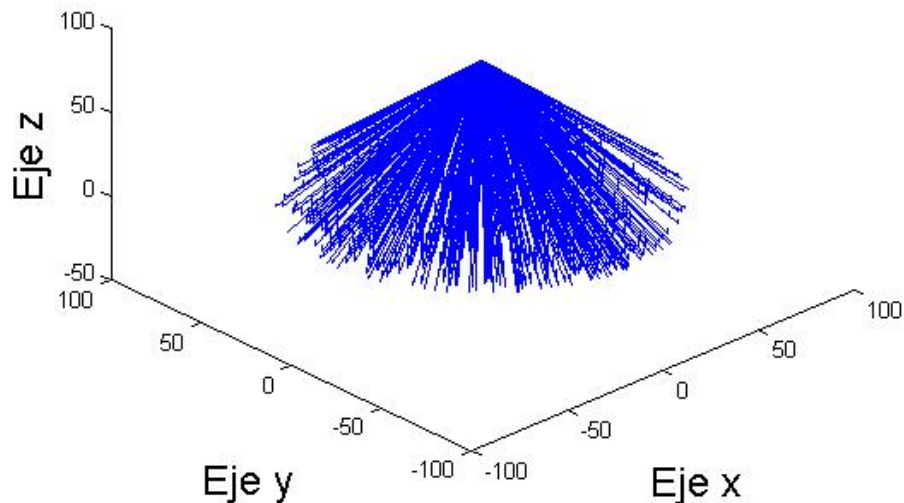
### **5.2.1 Concentrador Parabolico por Revolucion**

Los resultados del sub-programa del colector solar Parabolico por Revolucion son considerados muy buenos. Se aprecia en forma grafica que todos los rayos llegan a la zona focal, para angulos de incidencia igual a cero, (ver figura 5.2.1). Tambien se aprecia los desvíos cuando se hacen cambios en los angulos de incidencia de los rayos.

Tambien los resultados son buenos cuando los rayos son tomados como conos de energía y no simplemente como rayos puntuales.

El grafico de energía muestra de forma clara, pero sin mayor detalle el flujo de energía en el receptor.

## Trazado de rayos



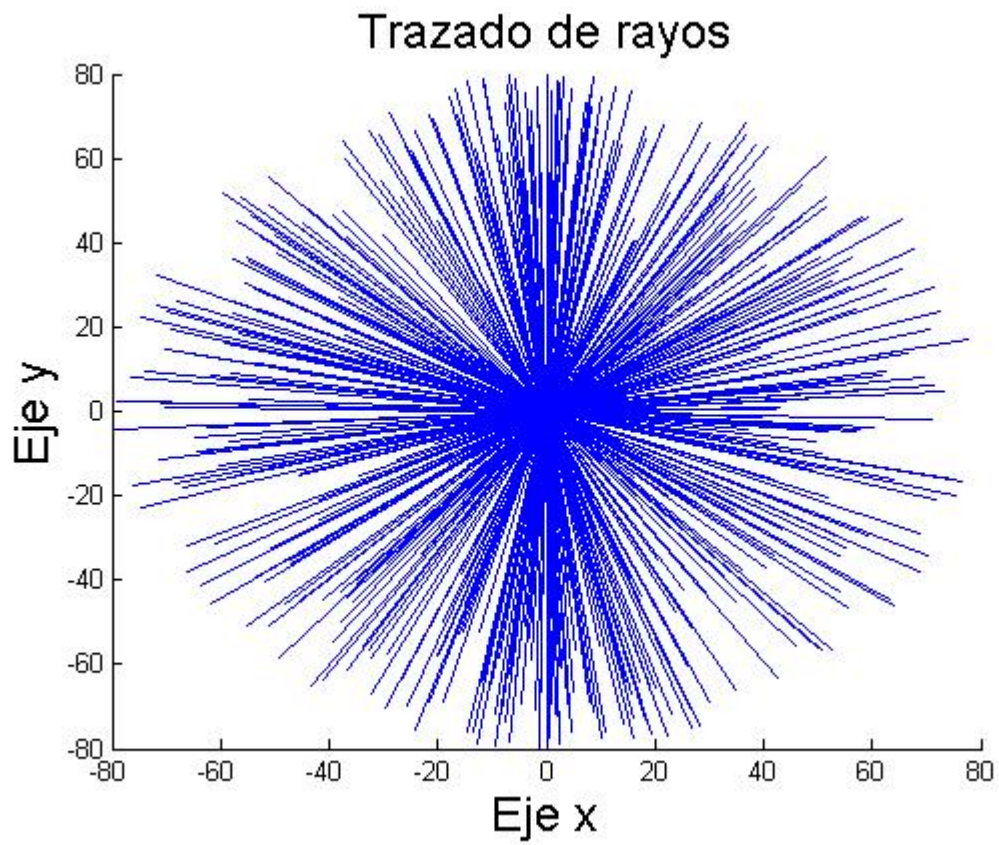
**Figura 5.2.1, Zona Focal Rayos Puntuales, Parabolico por Revolucion.**

### 5.2.2 Concentrador Solar de Casquete Hemisférico

El programa del Casquete Hemisférico, estaba entregando problemas, los cuales fueron solucionado de buena forma. Los resultados del sub-programa del colector solar de casquete hemisférico son simlares a los del colector solar parabolico por revolucion, y son considerados muy buenos. Tambien se aprecia los desvíos cuando se hacen cambios en los angulos de incidencia de los rayos.

Tambien los resultados son buenos cuando los rayos son tomados como conos de energía y no simplemente como rayos puntuales.

El grafico de rayos muestra con buen detalle el funcionamiento del método Monte Carlo, ya que no se aprecia ningún patrón o acumulación de rayos en un lugar específico, (ver figura 5.2.2).



**Figura 5.2.2, Funcion Aleatoria Monte Carlo, Casquete Hemisferico.**

## 6. CONCLUSIONES FINALES

### 6.1 Conclusiones del funcionamiento del Programa

El programa esta funcionando de buena forma para los caso lineales, entregando buenos gráficos, con una función de Monte Carlo que esta cumpliendo su objetivo.

El programa corre de forma rapida, no entrega errores y es facil de manipular, hay detalle que se tienen que pulir, pero en general el funcionamiento del programa y sub-programas es bueno.

### 6.2 Logros de los Objetivos

Se han cumplido varios objetivos, que se detallan a continuación:

- i) Diseñar el software en Matlab utilizando un método de trazado de rayos del tipo Monte Carlo.

Efectivamente el programa fue escrito en Matlab (Versión 7.0) utilizando un método de Monte Carlo que funciona de buena forma.

- ii) Estudiar a los colectores del tipo Parabólico Lineal, Facetado Lineal Parabolico, Paraboloides con Revolución, Casquete Hemisférico, y el Conico Facetado Parabólico del tipo Fresnel

Todos los colectores han sido estudiado de buena forma con buenos resultados, el grafico de flujo de energía necesita ser mejorado para poder entregar resultados visuales mas detallados.

Se han resultados varios problemas que se presentaron a lo largo del trabajo de memoria.

- iii) Entregar un imagine en 3D que muestre de forma clara la distribución de la energía en el receptor.

El grafico 3 dimensional del flujo energético funciona de buena forma pero no es lo suficientemente detallado. Esto se estima por un función de matlab mal aplicada y debería ser solucionado sin mayores contra-tiempos.

- iv) Crear el software que entregue los resultados en forma clara.

El mayor logro del software, es que tiene una forma sistemática en la cual está escrito el programa y los sub-programas, es muy fácil cambiar las características de los colectores y receptores cumpliendo así con los objetivos de crear una herramienta para futuras aplicaciones. También es posible acoplar una interfase GUI, para mayor interacción con usuarios sin conocimientos en Matlab.

### **6.3 Usos del Programa**

Durante el periodo de trabajo del presente trabajo de título, se ha variado el programa en iteradas instancias. El esquema general del programa fue desarrollado para poder utilizar las subrutinas indistintamente para los distintos tipos de colectores con concentración.

De esta forma se podrá en un futuro utilizar el programa como una herramienta para crear distintas aplicaciones o incluir otros tipos de colectores, como por ejemplo el colector con concentración parabólico del tipo Scheffler.

## **6.4 Mejoras Recomendadas**

Las mejoras recomendadas es mejorar la grafico del flujo de energía y trabajar mas en la interfase GUI.

Tambien en el futuro se puede hacer una sub rutina que utilice como input una función que represente la superficie del colector. De esta forma el programa seria general y no solo para algunos colectores, aunque la estructura del programa permite este un modulo con esta características se integre la programa sin mayores dificultades.

## 7. Referencias

1. C. Silva, *Desarrollo de un Programa Computacional de Trazado de Rayos para el Estudio de Colectores Solares Concentradores Bidimensionales*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil mecánico, Universidad de Chile, 1990.
2. W. Naudy, *Diseño, Construcción y Análisis Térmico de un Colector Solar Integrado Tubular con Concentrador Parabólico Compuesto (CPC)*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil mecánico, Universidad de Chile, 2005.
3. G. Vaccarezza, *Análisis Térmico y Evaluación de Colectores Acumuladores Integrados*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil mecánico, Universidad de Chile, 2004.
4. W. Welford, R Winston, *The Optics of Nonimaging Concentrators, Light and Solar Energy*, Academic Press, New York, 1978.
5. David Gudino Ayala, *Notas sobre el curso de energía Sola*, Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales, División de Ingeniería. 1995.
6. Dr. Manuel Romero Álvarez, *energía Solar Termoeléctrica*, Director Plataforma Solar de Almería-CIEMAT, Apartado 22; 04200 Tabernas, Almería.
7. F. Betancourt, *Estudio Cinético y Simulaciones de Monte Carlo de la Reacción de Reducción de No por Co*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Químico, Universidad de Chile, 2003.
8. <http://www.cl.cam.ac.uk/Teaching/1999/AGraphHCI/SMAG/node2.html>
9. <http://www.colostate.edu/orgs/SEAL/research/IAM/iam.html>



10. Plantas de Energia Solar Termicas.Fundamentos de Tecnologia published in Renewable Energy World 06/2003 pp. 109-113
11. P.D. Jose *The Flux Distribution Through the Focal Spot of a Solar Furnace*. Solar Energy 1, 19 (1975).
12. R.B. Pettite *Characterización of the Reflected Beam Profile of Solar Mirror Materiales*. Solar energía 19,733, 1977.
13. R. Bohn A. *concentración Solar sin imagen CPC*. Memoria para optar al Titulo de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile, 1982.
14. *Charles Smith*, Technology Review: July 95: Solar Power

## 8. Anexos

### 8.1 Anexos Programas

#### 8.1.1 Parabólico Lineal

```
%0
% Los inputs para el Parabolico Lineal son:
% Radio [cm]
% Largo [cm]
%Angulo de apertura
%Rho
% Tetainicial = Teteini = 0
%Los inputs para el receptor son:
% Largo [cm]
% Ancho [cm]
% Altura [cm] = alturaplano
%AnguloIncidencia
%Dado todo esto se empieza
%1
%Caracteristazion del plano superior, Tapa
%function planXYZmaxcilin = planotapacilin (GeoCilin, AngAper)
%Input
largoxcilin = 50;
radiocilin = 25;
AngAper = 45;
tetainci = 0
alturaplano = -5
sigmainci = 0
%radiocilin^2 = z ^2 + y^2
ymaxcilin = radiocilin * sin (AngAper)
zmaxcilin = -radiocilin * cos (AngAper)
```

```

%planoXYZmaxcilin
% x = [- largoxcilin/2, largoxcilin/2]
% y = [- ymaxcilin, ymaxcilin]
% z = zmaxcilin

%%%%%%%%% 1.- comienzo iteraciones %%%%%%%%%%%
% Se itero solo 5 veces para ver el comportamiento general

for it=1:5
    MC1y = rand;
    ypuntoMC1cilin = MC1y*(2*ymaxcilin) - ymaxcilin

    xmaxcilin = largoxcilin/2;
    MC1x = rand;
    xpuntoMC1cilin = MC1x*(2*xmaxcilin) - xmaxcilin

    zpuntoMC1cilin = zmaxcilin
    %Este es el punto de adonde parte el rayo vertical
    %%%%%%%%%%% % 1er punto %%%%%%%%%%%
    PuntoRayoMC1cilin = [xpuntoMC1cilin, ypuntoMC1cilin, zpuntoMC1cilin + 50]

    %Calcular el punto de interseccion1.
    %Entrega el punto de interseccion entre el rayo incidente y el concentrador
    %cilindrico.
    %Dado la geometria y el punto del plano superior.
    %Se traza un rayo vertical, prependicular al plano

    zpuntopcilin = - (radiocilin^2 - ypuntoMC1cilin^2)^(1/2)
    xpuntopcilin = xpuntoMC1cilin
    ypuntopcilin = ypuntoMC1cilin

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% % 2do punto %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
puntointpcilin1 = [xpuntopcilin, ypuntopcilin, zpuntopcilin]

%4
%Caracterizar la normal vertical y el plano tangente en p.

%syms x y z
%z = radiocilin^2 - y^2
%dfx= diff(z,x)
%dfy= diff(z,y)

syms y
z = radiocilin^2 - y^2
dfy = diff(z)
dfx = 0

%dfy = -2*y

% puntointpcilin1 = [xpuntopcilin, ypuntopcilin, zpuntopcilin]
%xnv = xpuntopcilin
%ynv = (ypuntopcilin - 2 * ypuntopcilin)
%znv = zpuntopcilin + 1

d3nv = (( 2 * ypuntopcilin)^2 + 1)^(1/2)

%Caracterizar la normal horizontal y el plano tangente en p.
%xnh = xpuntopcilin
%ynh = (ypuntopcilin - 2 * ypuntopcilin)
%znh = zpuntopcilin + 1

```

```

d3nh = (2 * ypuntopcilin)

tetaref = 2*acos(1/d3nh)-tetainci
% si tetainci = 0
sigmaref = acos(-dfx/d3nh)
%else

%sigmaref = 2*acos(-dfx/d3nh)-sigmainci
%Interseccion con el plano de estudio
%xlplano = ((alturaplano-
zpuntopcilin)*sin(tetaref)*cos(tetaref))/cos(tetaref)+xpuntopcilin

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% % 3er punto %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
xlplano=xpuntopcilin
ylplano = ((alturaplano-
zpuntopcilin)*sin(tetaref)*sin(sigmaref))/cos(tetaref)+ypuntopcilin
zplano = alturaplano
PuntoRayofinal = [xlplano, ylplano, zplano]
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Interseccion del Cono Reflejado con el plano de estudio
% La interseccion es una elipse
d = ((xpuntopcilin-xlplano)^2+(ypuntopcilin-ylplano)^2+(zpuntopcilin-
zplano)^2)^(1/2)
% Semi eje menor
epsilon = 16/3.14
asemiejemenor = (d*tan(epsilon)*sin(1.5708)-epsilon)/(sin(1.5708)+epsilon-
tetaref)
%Semi eje mayor
bsemiejemayor=(d/tan(epsilon))

```

```

% Trazar rayos          %
% tengo:
% PuntoRayoMC1cilin
% puntointpcilin1
% PuntoRayofinal
Mrayos=[PuntoRayoMC1cilin ; puntointpcilin1 ; PuntoRayofinal]
[X,Y] = meshgrid(-largoxcilin:.2:largoxcilin,-ymaxcilin:.2:ymaxcilin);
Z = -sqrt(radiocilin^2-Y.^2);
mesh(X,Y,Z,'EdgeColor','green')
hold on % no borra grafico
plot3(Mrayos(:,1),Mrayos(:,2),Mrayos(:,3))
end
xlabel('Eje x','fontsize',18)
ylabel('Eje y','fontsize',18)
zlabel('Eje z','fontsize',18)
title('Trazado de rayos','fontsize',18)

```

### 8.1.2 Paraboloide con Revolución

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%1 SelecColec

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%2 Inputs  Esta es la INTERFASE GUI.

```

```

%Aquí el usuario puede ingresar todos los Inputs necesario para los

```

```

%distintos colectores, receptores, angulos de entrada y extras.

```

```

%Parabolico Lineal:

```

```

%z = (x^2/(4*P)) + (y^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))

```

```

% Distancia Focal = P

```

```

% Ancho Colector max = Aycolec

```

```

% LargoX = Lx
%I1)
P = 100;
%I2)
Aycolec = 160
%Receptor:
%Largo = Lxrecep = Lx [cm]
%Ancho = Ayrecep [cm]
%Altura del Receptor desde la Base del colector = Hp
%I3)
Lxrecep = 10 %largo del receptor
%I4)
Ayrecep = 10 %Ancho del receptor
%I5)
Hp = 100 %Altura del receptor desde la base del colector.
%Angulos de Entrada
%I6)
TetaIdeg = 0 %Angulos en Grados
%I7)
SigmaIdeg = 0 %Angulo en Grados
%Predefinicion del Angulo.
TetaR = 0
%El ancho del cuadrado del plano de estudio en el receptor para el
%HeatGraf3d.
%Predefinicion del Delta del cuadrado del plano de estudio en el receptor .
%I8)
Delta = 0.1
%La constante del material rfectante
%I9)
Rho = 1

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%3 CalculosPR, Aqui se Procesan los datos de 2
```

```
%Aqui se tiene que caracterizar el receptor segun el Eje principal.
```

```
% z = (x^2/(4*P)) + (y^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))
```

```
% x = [-Lx/2 , Lx/2]
```

```
% y = [-Aycolec/2 , Aycolec/2]
```

```
% z = [Hp, -(R - zcp)]
```

```
% Htp = Altura desde la tapa del colector al plano del receptor
```

```
xmaxrecep = Lxrecep/2;
```

```
xminrecep = -Lxrecep/2;
```

```
ymaxrecep = Ayrecep/2;
```

```
yminrecep = -Ayrecep/2;
```

```
zrecep = Hp;
```

```
ym = Aycolec/2;
```

```
%Htp = Altura entre receptor
```

```
Htp = Hp - (ym^2/(4*P));
```

```
TetaI = (pi*TetaIdeg)/180; %en radianes    %Angulos en Grados
```

```
SigmaI = (pi*SigmaIdeg)/180; %en radianes    %Angulo en Grados
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%4 Create Matrix3d
```

```
i = Ayrecep/Delta;
```

```
j = Lxrecep/Delta;
```

```
for n = 1:i;
```

```
    for m = 1:j;
```

```
        A(n,m) = 0;
```

```
    end;
```

```
end;
```



```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%5MC1
```

```
%Utilizando una función del tipo Monte Carlo se procede a escoger un punto cualquiera de la superficie superior (tapa) del reflector.
```

```
%Este punto es conocido como el "Punto 0". A partir de este punto se traza una recta con las direcciones dadas por SigmaI y TetaI.
```

```
%La funcion del plano es  $(Aycolec/2)^2 = x^2 + y^2$ 
```

```
MC1y = rand;
```

```
y0 = MC1y*(2*ym) - (ym);
```

```
xmaxplano = ((ym^2) - (y0^2))^(1/2);
```

```
MC1x = rand;
```

```
x0 = MC1x*(2*xmaxplano) - (xmaxplano);
```

```
% z =  $(y^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))$ 
```

```
% x = 0
```

```
% y = Aycolec/2
```

```
z0 = 0;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% % Punto de Partida%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
Punto0 = [x0, y0, z0]
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%6 IntRecepIN
```

```
%Si el rayo que se origina en el punto entregado por la subrutina MC1 intercepta el %Receptor,
```

```
%esta fuljo energético es dado por perdido y se procede a incrementar en una unidad el numero de la Subrutina "IncrementMC1".
```

```
%En el caso que el rayo no intercepta la parte superior del receptor este intercepta %directamente con la superficie reflectante del colector.
```

```
xdif = cos (SigmaI) * tan (TetaI) * Hp;
```

```

ydif = sin (SigmaI) * tan (TetaI) * Hp;
if (xminrecep <= (x0 - xdif)) & ((x0-xdif) <= xmaxrecep) & (yminrecep <= (y0 -
ydif)) & ((y0-ydif) <= ymaxrecep)
HitIn = 1; % HitIn podria ser un contador en una aplicacion en el futuro
else
HitIn = 0
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%7IntRefl1PR

```

%Cuando el rayo no se vez obstruido por el receptor este intersectaria al reflector.  
 %Esta subrutina entrega las coordenadas del punto correspondiente al la intersección  
 del %rayo con la superficie del reflector.  
 %Este punto es conocido como el “Punto 1”.

```

%Punto0 = [x0, y0, z0]
%SigmaI %Angulo en Grados
%TetaI %Angulos en Grados
if (TetaI == 0)
x1 = x0
y1 = y0
z1 = (x1^2/(4*P)) + (y1^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))
else
xd = sin(TetaI)*cos(SigmaI);
yd = sin(TetaI)*sin(SigmaI);
zd = cos(TetaI);
%z = (y^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))
%x(t) = x0 + t*xd
%y(t) = y0 + t*yd
%z(t) = z0 + t*zd

```

```

a1 = (xd^2) + (yd^2);
b1 = (2*xd*x0 + 2*yd*y0) - (zd*4*P);
c1 = (x0^2) + (y0^2) - (ym^2) - (4*P*z0);
t1 = (-b1 - (b1^2 - 4*a1*c1)^(1/2)) / (2*a1) ;
x1 = x0 + t1*xd;
y1 = y0 + t1*yd;
z1 = z0 + t1*zd;
if (SigmaI == 0);
    xd = sin(TetaI);
    zd = cos(TetaI) ;
    a1 = (xd)^2;
    b1 = (2*xd) - (zd*4*P);
    c1 = (x0^2) + (y0^2) - (ym^2) - (4*P*z0);
    t1 = (-b1 - (b1^2 - 4*a1*c1)^(1/2)) / (2*a1) ;
    x1 = x0 + t1*xd;
    y1 = y0 ;
    z1 = z0 + t1*zd;
end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Punto Interseccion%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Punto1 = [x1, y1, z1]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%8 RayoReflejado

%Esta subrutina entrega las características que describen el rayo reflejado desde el
%Punto 1.
%z = (y^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))
%Descomponiendo segun a la ecuacion anterior.
%y pasando de coordenadas polares a cartesianas

```

```

%radio = d3
% d3 = (dfx^2 + dfy^2 + dfz^2)^(1/2)
%dfx = x1/((R^2 - x1^2 - y1^2)^(1/2))
%dfy = y1/((R^2 - x1^2 - y1^2)^(1/2))
dfz = 1
%d3 = (dfx^2 + dfy^2 + dfz^2)^(1/2)
if ( x1 >= 0)
    xs1 = x1 - 0.00001
    ys1 = y1
    U1 = (x1^2/(4*P)) + (y1^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))
    U1delta = (xs1^2/(4*P)) + (ys1^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))
    U = (U1delta - U1)/0.00001
else
    xs1 = x1 + 0.00001
    ys1 = y1
    U1 = (x1^2/(4*P)) + (y1^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))
    U1delta = (xs1^2/(4*P)) + (ys1^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))
    U = (-U1delta + U1)/0.00001
end
if ( y1 >= 0)
    ys1 = y1 - 0.00001
else
    ys1 = y1 + 0.00001
end
xs1 = x1
V1 = (x1^2/(4*P)) + (y1^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))
V1delta = (xs1^2/(4*P)) + (ys1^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))
V = (V1delta - V1)/0.00001
%Proyeccion de d3 en el plano xy = d3h
% d3h = (dfx^2 + dfy^2 )^(1/2)
d3h = (U^2 + V^2 )^(1/2)

```

```

d3 = (U^2 + V^2 + dfz^2)^(1/2)
%Para descomponer los angulos de incidencia, normal y reflexion y estudia
%el plano que contiene dfz,d3 y d3h.
if (TetaI == 0)
    %Cuadrante 1
    if ((x1 >= 0) & (y1 >= 0))
        TetaN = (acos(1/d3))
        SigmaN = -(acos(U/d3h))
        AlfavIN = TetaN
        AlfavNR = AlfavIN
        AlfahIN = SigmaN
        TetaR = AlfavIN + AlfavNR
        SigmaR = SigmaN
    %Cuadrante 2
    elseif ((x1 >= 0) & (y1 <= 0))
        TetaN = (acos(1/d3))
        SigmaN = (acos(U/d3h))
        AlfavIN = TetaN
        AlfavNR = AlfavIN
        AlfahIN = SigmaN
        TetaR = AlfavIN + AlfavNR
        SigmaR = SigmaN
    %Cuadrante 3
    elseif ((x1 <= 0) & (y1 <= 0))
        TetaN = (acos(1/d3))
        SigmaN = (acos(U/d3h))
        AlfavIN = TetaN
        AlfavNR = AlfavIN
        AlfahIN = SigmaN
        TetaR = AlfavIN + AlfavNR
        SigmaR = SigmaN

```

```

%Cuadrante 4
elseif ((x1 <= 0) & (y1 >= 0))
    TetaN = (acos(1/d3))
    SigmaN = (acos(U/d3h))

    AlfavIN = TetaN
    AlfavNR = AlfavIN
    AlfahIN = SigmaN
    TetaR = AlfavIN + AlfavNR
    SigmaR = SigmaN
end
end
%para calcular la ecuacion del rayo reflejado se utiliza un cambio de
%coordenadas polars a cartesianas.
%zdr = cos(TetaR)
%xdr = sin(TetaR)*cos(SigmaR)
%ydr = sin(TetaR)*sin(SigmaR)
% Osea la ecuacion de la recta, para el rayo reflejado queda como
%Xr(t)= x1 + t*sin(TetaR)*cos(SigmaR)
%Yr(t)= y1 + t*sin(TetaR)*sin(SigmaR)
%Zr(t)= z1 + t*cos(TetaR)
%Sabemos que cuando Zr(t)= Hp , es la interseccion del rayo reflejado con el
%plano de estudio,y corresponde al Punto2.
%Igualando Zr(t)= Hp y depejando se llega a:
%t2 = (Hp-z1)/cos(TetaR)
%reemplazando
% 1.5708 = 90 grados ( en radianes)
if ((x1 >= 0) & (y1 >= 0))
    x2 = x1 + (Htp - z1)*tan(TetaR)*sin(SigmaR + 1.5708)
    y2 = y1 - (Htp - z1)*tan(TetaR)*cos(SigmaR + 1.5708)
%Cuadrante 2

```

```

elseif ((x1 >= 0) & (y1 <= 0))
x2 = x1 - (Htp - z1)*tan(TetaR)*sin(SigmaR - 1.5708)
y2 = y1 + (Htp - z1)*tan(TetaR)*cos(SigmaR - 1.5708)
%Cuadrante 3
elseif ((x1 <= 0) & (y1 <= 0))
x2 = x1 + (Htp - z1)*tan(TetaR)*cos(SigmaR)
y2 = y1 + (Htp - z1)*tan(TetaR)*sin(SigmaR)
%Cuadrante 4
elseif ((x1 <= 0) & (y1 >= 0))
x2 = x1 + (Htp - z1)*tan(TetaR)*cos(SigmaR)
y2 = y1 - (Htp - z1)*tan(TetaR)*sin(SigmaR)
end
z2 = Htp
Punto2 = [x2, y2, z2]
M = [Punto0;Punto1;Punto2]
% Interseccion del Cono Reflejado con el plano de estudio
% La interseccion es una elipse
%d      =      ((xpuntopcilin-xplano)^2+(ypuntopcilin-yplano)^2+(zpuntopcilin-
zplano)^2)^(1/2)
% Semi eje menor
%epsilon = 16*(1/21600)*360
%asemiejemenor = (d*tan(epsilon)*sin(1.5708)-epsilon)/(sin(1.5708)+epsilon-
tetaref)
%Semi eje mayor
%bsemiejemayor=(d/tan(epsilon))

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%9 FRhoE1

%Cuando un rayo es reflejado, este sufre una pérdida de energía que transporta,
%debido a los defectos superficiales de los materiales de reflexión.

```

```

%Esta perdida se ve %disminuido según el índice Rho de cada material.
%En esta función se calcula el nuevo %flujo de energía asociado al rayo reflejado.
Rho = 1
%10 IntRecep1
%En esta subrutina se entrega las coordenadas de la intersección entre el rayo y el
plano de estudio (z = 0 )
%y calcula si el rayo intersecciona el receptor.
%En este caso el rayo que no es absorbido por el reflector puede ser reflejado o es
perdido en el espacio.
%En ambos %casos, cuando un rayo no intercepta el receptor en la subrutina
IntRecep1, el rayo pasa %a "IntRefl2".
%Lxrecep %largo del receptor
%Ayrecep %Ancho del receptor
if (((-Lxrecep/2) <= x2 <= (Lxrecep/2)) & ((-Ayrecep/2) <= y2 <= (Ayrecep/2)))
% Interseccion del Cono Reflejado con el plano de estudio
% La interseccion es una elipse
d = ((x1-x2)^2+(y1-y2)^2+(z1-z2)^2)^(1/2);
epsilon = 2;
epsi= 2*pi/180;
% Semi eje menor
b =(d*tan(epsi));
% Semi eje mayor
a = d*sin(TetaR)- d*cos(TetaR)*tan(TetaR-epsi);
%Ecuacion de la Elipse
% (x^2/(4*a^2))+ (y^2/(4*b^2)) = 1
MC1yE = rand;
yE = MC1yE*(2*b) - (b);
xmaxplanoE = ((1-(yE^2/(4*b^2)))*(4*a^2))^(1/2);
MC1xE = rand;
xE = MC1xE*(2*xmaxplano) - (xmaxplano);
rE=(xE^2+yE^2)^(1/2);

```



```
x3= x2 + xE*cos(SigmaR);
```

```
y3= y2 + yE*cos(SigmaR);
```

```
z3 = z2;
```

```
Punto3 = [x3, y3, z3];
```

```
%
```

```
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%11 HeatGraf3d
```

```
%HeatGraf3d grafica de forma tridimensional el flujo energético,
```

```
%Hace una sumatoria sobre A que guarda el flujo energetico en el receptor.
```

```
%HeatGraf3d es capaz de mostrar el flujo energético representado por colores que demarcan las zona con mayor flujo.
```

```
if ((-Lxrecep/2 <= x2) & (x2<= Lxrecep/2));
```

```
    if ((-Ayrecep/2 <= y2) & (y2 <= Ayrecep/2));
```

```
        k = x2 + (Lxrecep/2);
```

```
        l = y2 + (Ayrecep/2);
```

```
        k1 = floor(k/Delta) + 1;
```

```
        l1 = floor(l/Delta) + 1;
```

```
        A (l1 , k1) = A (l1 , k1) + E;
```

```
    end;
```

```
end;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%12 RayGraf3d
```

```
%RayGraf3d utiliza solo los primeros 50 rayos de las iteraciones de Monte Carlo, MC1,
```

```
%que no interceptan con el receptor en IntRecepIN. Los 50 rayos son proyectados desde el espacio,
```

%pasando por su intersección con el colector, Punto 1, hasta su intersección %con el plano de estudio,  $Z = 0$ .

%En este grafico se muestra claramente el %comportamiento del sistema de colector solar con concentración,

%incluyendo todos sus %elementos: reflector, rayos (incidentes y reflejados) y el receptor (plano de estudio).

```
Mrayos=[Punto0 ; Punto1 ; Punto2]
hold on % no borra grafico
plot3(Mrayos(:,1),Mrayos(:,2),Mrayos(:,3))
xlabel('Eje x','fontsize',18)
ylabel('Eje y','fontsize',18)
zlabel('Eje z','fontsize',18)
title('Trazado de rayos','fontsize',18)
% flecha -> click -> style arreglar grafico, y
% [X,Y] = meshgrid(-Lx/2:.2:Lx,-ym:.2:ym);
%  $Z = (Y^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))$ ;
% mesh(X,Y,Z,'EdgeColor','green')
```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%13 Seguimiento del Rayo

%En el caso de que el rayo reflejado originalmente producto del rayo incidente,  
%no fuera absorbido por el receptor, IntRecep1, se procede a estudiar la trayectoria  
de este %rayo.

%Si el rayo interseca el reflector, entonces se calcula el lugar de intersección  
%y el rayo resultante para analizar si este fue absorbido o perdido en el espacio.

%17Graf A

%contour3 (A)

### **8.1.3 Facetado Conico Parabólico.**

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%1 SelecColec

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%2 Inputs Esta es la INTERFASE GUI.
```

```
%Aqui el usuario puede ingresar todos los Inputs necesario para los
%distintos colectores, receptores, angulos de entrada y extras.
```

```
%Parabolico:
```

```
%z = (x^2/(4*P)) + (y^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))
```

```
% Distancia Focal = P
```

```
% Ancho Colector max = Aycolec
```

```
%I1)
```

```
P = 100;
```

```
%I2)
```

```
%Ingrese el numero de Conos
```

```
% Numero Conos = 7
```

```
% Ingresar los puntos de interseccion entre los conos.
```

```
Ycf1 = 0
```

```
Ycf2 = 15
```

```
Ycf3 = 28
```

```
Ycf4 = 39
```

```
Ycf5 = 48
```

```
Ycf6 = 53
```

```
Ycf7 = 58
```

```
Ycf8 = 61
```

```
Aycolec = Ycf8*2
```

```
%Receptor:
```

```
%Largo = Lxrecep = Lx [cm]
```

```
%Ancho = Ayrecep [cm]
```

```
%Altura del Receptor desde la Base del colector = Hp
```

```
%I3)
```

```
Lxrecep = 10 %largo del receptor
```

```
%I4)
```

```
Ayrecep = 10 %Ancho del receptor
```

```
%I5)
```

```
Hp = 100 %Altura del receptor desde la base del colector.
```

```
%Angulos de Entrada
```

```
%I6)
```

```
Tetaldeg = 0 %Angulos en Grados
```

```

%i7)
SigmaIdeg = 0 %Angulo en Grados
%Predefinicion del Angulo.
TetaR = 0
%El ancho del cuadrado del plano de estudio en el receptor para el
%HeatGraf3d.
%Predefinicion del Delta del cuadrado del plano de estudio en el receptor .
%i8)
Delta = 0.1
%La constante del material rfectante
%i9)
Rho = 1
%%%%%%%%%%%%Energia Asociado al Rayo
E = 10

%%%%%%%%%%%%
%3 CalculosPR Aqui se Procesan los datos de 2
%%%%%%%%%%%%

%Aqui se tiene que caracterizar el receptor segun el Eje pricipal.
% z = (x^2/(4*P)) + (y^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))
% x = [-Lx/2 , Lx/2]
% y = [-Aycolec/2 , Aycolec/2]
% z = [Hp,-(R - zcp)]
% Htp = Altura desde la tapa del colector al plano del receptor

xmaxrecep = Lxrecep/2;
xminrecep = -Lxrecep/2;
ymaxrecep = Ayrecep/2;
yminrecep = -Ayrecep/2;
zrecep = Hp;
ym = Aycolec/2;
%Htp = Altura entre receptor
Htp = Hp - (ym^2/(4*P));

TetaI = (pi*TetaIdeg)/180; %en radianes    %Angulos en Grados
SigmaI = (pi*SigmaIdeg)/180; %en radianes    %Angulo en Grados

Zcf1 = (Ycf1^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))
Zcf2 = (Ycf2^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))
Zcf3 = (Ycf3^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))
Zcf4 = (Ycf4^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))
Zcf5 = (Ycf5^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))
Zcf6 = (Ycf6^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))

```

$$Zcf7 = (Ycf7^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))$$

$$Zcf8 = (Ycf8^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))$$

$$Mcf1 = (Ycf2-Ycf1)/(Zcf2-Zcf1)$$

$$Mcf2 = (Ycf3-Ycf2)/(Zcf3-Zcf2)$$

$$Mcf3 = (Ycf4-Ycf3)/(Zcf4-Zcf3)$$

$$Mcf4 = (Ycf5-Ycf4)/(Zcf5-Zcf4)$$

$$Mcf5 = (Ycf6-Ycf5)/(Zcf6-Zcf5)$$

$$Mcf6 = (Ycf7-Ycf6)/(Zcf7-Zcf6)$$

$$Mcf7 = (Ycf8-Ycf7)/(Zcf8-Zcf7)$$

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%4 Create Matrix3d
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

i = Ayrecep/Delta;
j = Lxrecep/Delta;

```

```

for n = 1:i;
    for m = 1:j;
        A(n,m) = 0;
    end;
end;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%5MC1

```

%Utilizando una función del tipo Monte Carlo se procede a escoger un punto cualquier  
 %de la superficie superior (tapa) del reflector.  
 %Este punto es conocido como el "Punto 0". A partir de este punto se traza una recta  
 con las direcciones dadas por Sigma ?in y Teta ?in.  
 %La funcion del plano es  $(Aycolec/2)^2 = x^2 + y^2$

```

MC1y = rand;
y0 = MC1y*(2*ym) - (ym);

xmaxplano = ((ym^2) - (y0^2))^(1/2);
MC1x = rand;
x0 = MC1x*(2*xmaxplano) - (xmaxplano);

% z = (y^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P))
% x = 0
% y = Aycolec/2
z0 = 0;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% % Punto de Partida%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Punto0 = [x0, y0, z0]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%6 IntRecepIN

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Si el rayo que se origina en el punto entregado por la subrutina MC1 intercepta el %Receptor,

%esta fuljo energético es dado por perdido y se procede a incrementar en una unidad el numero de la Subrutina "IncrementMC1".

%En el caso que el rayo no intercepta la parte superior del receptor este intercepta %directamente con la superficie reflectante del colector.

xdif = cos (SigmaI) \* tan (TetaI) \* Hp;

ydif = sin (SigmaI) \* tan (TetaI) \* Hp;

if (xminrecep <= (x0 - xdif)) & ((x0-xdif) <= xmaxrecep) & (yminrecep <= (y0 - ydif)) & ((y0-ydif) <= ymaxrecep)

HitIn = 1; % HitIn podria ser un contador en una aplicacion en el futuro

else

HitIn = 0

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%7IntRef11PR

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Cuando el rayo no se vez obstruido por el receptor este intersectaria al reflector.

%Esta subrutina entrega las coordenadas del punto correspondiente a la intersección del %rayo con la superficie del reflector.

%Este punto es conocido como el "Punto 1".

%Punto0 = [x0, y0, z0]

%SigmaI %Angulo en Grados

%TetaI %Angulos en Grados

if (TetaI == 0)

x1 = x0;

y1 = y0 ;

r = (xo\*2 + yo\*2)\*(1/2);

r1 = y1;

r2 = y2;

r3 = y3;

r4 = y4;

r5 = y5;

```

r6 = y6;
r7 = y7;
r8 = y8;

if ((r >= r1) & (r <= r2));
    z1 = (r1^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P)) + (m1*(r -r1));
elseif((r >= r2) & (r <= r3));
    z1 = (r2^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P)) + (m2*(r -r1));
elseif((r >= r3) & (r <= r4));
    z1 = (r3^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P)) + (m3*(r -r1));
elseif((r >= r4) & (r <= r5));
    z1 = (r4^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P)) + (m4*(r -r1));
elseif((r >= r5) & (r <= r6));
    z1 = (r5^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P)) + (m5*(r -r1));
elseif((r >= r6) & (r <= r7));
    z1 = (r6^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P)) + (m6*(r -r1));
elseif((r >= r7) & (r <= r8));
    z1 = (r7^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P)) + (m7*(r -r1));
end

```

else

```

xd = sin(TetaI)*cos(SigmaI);
yd = sin(TetaI)*sin(SigmaI);
zd = cos(TetaI);

```

```

%zi = (ri^2/(4*P)) - (ym^2/(4*P)) + (mi*(((x^2+ y^2)*(1/2)) -ri)
%ox(t) = x0 + t*xd
%oy(t) = y0 + t*yd
%oz(t) = z0 + t*zd

```

```

if ((r >= r1) & (r <= r2));
    k1= ((r1^2)/(4*P)) - ((ym^2)/(4*P)) - (m1*r1);
    kz1= zo - k1;
    a1 = (m1^2)*((xd^2) + (yd^2)) - (zd^2);
    b1 = 2*(m1^2)*(xd*x0 + yd*y0) - (2*zd*kz1);
    c1 = (m1^2)*((x0^2) + (y0^2)) - (kz1^2);
elseif((r >= r2) & (r <= r3));
    k1= ((r2^2)/(4*P)) - ((ym^2)/(4*P)) - (m2*r2);
    kz1= zo - k1;
    a1 = (m2^2)*((xd^2) + (yd^2)) - (zd^2);
    b1 = 2*(m2^2)*(xd*x0 + yd*y0) - (2*zd*kz1);
    c1 = (m2^2)*((x0^2) + (y0^2)) - (kz1^2);
elseif((r >= r3) & (r <= r4));
    k1= ((r3^2)/(4*P)) - ((ym^2)/(4*P)) - (m3*r3);

```

```

kz1= zo - k1;
a1 = (m3^2)*((xd^2) + (yd^2)) - (zd^2);
b1 = 2*(m3^2)*(xd*x0 + yd*y0) - (2*zd*kz1);
c1 = (m3^2)*((x0^2) + (y0^2)) - (kz1^2);
elseif((r >= r4) & (r <= r5));
k1= ((r4^2)/(4*P)) - ((ym^2)/(4*P)) - (m4*r4);
kz1= zo - k1;
a1 = (m4^2)*((xd^2) + (yd^2)) - (zd^2);
b1 = 2*(m4^2)*(xd*x0 + yd*y0) - (2*zd*kz1);
c1 = (m4^2)*((x0^2) + (y0^2)) - (kz1^2);
elseif((r >= r5) & (r <= r6));
k1= ((r5^2)/(4*P)) - ((ym^2)/(4*P)) - (m5*r5);
kz1= zo - k1;
a1 = (m5^2)*((xd^2) + (yd^2)) - (zd^2);
b1 = 2*(m5^2)*(xd*x0 + yd*y0) - (2*zd*kz1);
c1 = (m5^2)*((x0^2) + (y0^2)) - (kz1^2);
elseif((r >= r6) & (r <= r7));
k1= ((r6^2)/(4*P)) - ((ym^2)/(4*P)) - (m6*r6);
kz1= zo - k1;
a1 = (m6^2)*((xd^2) + (yd^2)) - (zd^2);
b1 = 2*(m6^2)*(xd*x0 + yd*y0) - (2*zd*kz1);
c1 = (m6^2)*((x0^2) + (y0^2)) - (kz1^2);
elseif((r >= r7) & (r <= r8));
k1= ((r7^2)/(4*P)) - ((ym^2)/(4*P)) - (m7*r7);
kz1= zo - k1;
a1 = (m7^2)*((xd^2) + (yd^2)) - (zd^2);
b1 = 2*(m7^2)*(xd*x0 + yd*y0) - (2*zd*kz1);
c1 = (m7^2)*((x0^2) + (y0^2)) - (kz1^2);
end

t1 = (-b1 - (b1^2 - 4*a1*c1)^(1/2)) / (2*a1);

x1 = x0 + t1*xd;
y1 = y0 + t1*yd;
z1 = z0 + t1*zd;
end

if (SigmaI == 0);

xd = sin(TetaI);
zd = cos(TetaI) ;
if ((r >= r1) & (r <= r2));
k1= ((r1^2)/(4*P)) - ((ym^2)/(4*P)) - (m1*r1);
kz1= zo - k1;
a1 = (m1^2)*(xd^2) - (zd^2);
b1 = 2*(m1^2)*(xd*x0) - (2*zd*kz1);

```



```

    c1 = (m1^2)*((x0^2) + (y0^2)) - (kz1^2);
elseif((r >= r2) & (r <= r3));
    k1 = ((r2^2)/(4*P)) - ((ym^2)/(4*P)) - (m2*r2);
    kz1 = zo - k1;
    a1 = (m2^2)*((xd^2)) - (zd^2);
    b1 = 2*(m2^2)*(xd*x0) - (2*zd*kz1);
    c1 = (m2^2)*((x0^2) + (y0^2)) - (kz1^2);
elseif((r >= r3) & (r <= r4));
    k1 = ((r3^2)/(4*P)) - ((ym^2)/(4*P)) - (m3*r3);
    kz1 = zo - k1;
    a1 = (m3^2)*((xd^2)) - (zd^2);
    b1 = 2*(m3^2)*(xd*x0) - (2*zd*kz1);
    c1 = (m3^2)*((x0^2) + (y0^2)) - (kz1^2);
elseif((r >= r4) & (r <= r5));
    k1 = ((r4^2)/(4*P)) - ((ym^2)/(4*P)) - (m4*r4);
    kz1 = zo - k1;
    a1 = (m4^2)*((xd^2)) - (zd^2);
    b1 = 2*(m4^2)*(xd*x0) - (2*zd*kz1);
    c1 = (m4^2)*((x0^2) + (y0^2)) - (kz1^2);
elseif((r >= r5) & (r <= r6));
    k1 = ((r5^2)/(4*P)) - ((ym^2)/(4*P)) - (m5*r5);
    kz1 = zo - k1;
    a1 = (m5^2)*((xd^2)) - (zd^2);
    b1 = 2*(m5^2)*(xd*x0) - (2*zd*kz1);
    c1 = (m5^2)*((x0^2) + (y0^2)) - (kz1^2);
elseif((r >= r6) & (r <= r7));
    k1 = ((r6^2)/(4*P)) - ((ym^2)/(4*P)) - (m6*r6);
    kz1 = zo - k1;
    a1 = (m6^2)*((xd^2)) - (zd^2);
    b1 = 2*(m6^2)*(xd*x0) - (2*zd*kz1);
    c1 = (m6^2)*((x0^2) + (y0^2)) - (kz1^2);
elseif((r >= r7) & (r <= r8));
    k1 = ((r7^2)/(4*P)) - ((ym^2)/(4*P)) - (m7*r7);
    kz1 = zo - k1;
    a1 = (m7^2)*((xd^2)) - (zd^2);
    b1 = 2*(m7^2)*(xd*x0) - (2*zd*kz1);
    c1 = (m7^2)*((x0^2) + (y0^2)) - (kz1^2);
end

```

$$t1 = (-b1 - (b1^2 - 4*a1*c1)^{1/2}) / (2*a1);$$

```

x1 = x0 + t1*xd;
y1 = y0;
z1 = z0 + t1*zd;
end

```

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Punto Interseccion%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
Punto1 = [x1, y1, z1]

## 8.2 Anexos Definiciones

### 1 Flujo energético

Es la potencia energética (Q/t) emitida por una fuente transportada por un haz o recibida por una superficie bajo la forma de radiación.

### 2 Insolación energética

Es la densidad de energía que alcanza una superficie receptora colocada en la trayectoria de un flujo energético,  $E = d\phi/ds$  y se mide en  $W/m^2$ . Se ocupa indistintamente la palabra Irradiación.

### 3 Emitancia o Radiancia

Es el flujo energético global emitido por una unidad de superficie de la fuente.  $M = d\phi/ds$ .

### 4 Luminancia

Es la intensidad de la fuente por unidad de superficie emisora, en una dirección dada.  $L = d^2\phi/ds \cos\theta dw$ .

### 5 Área de apertura

El área de apertura es el área a través de la cual pasa la radiación que alcanza al reflector.

### 6 Ángulo de apertura

Es el valor del semiángulo cuyo vértice está en el foco y sus lados en las rectas que lo unen a los extremos del reflector. Para la circunferencia, el vértice del ángulo está en el centro.

### 7 Ángulo de aceptación

Es el máximo ángulo de incidencia para el cual el rayo incidente logra entrar al área de apertura y llegar al receptor.

### 8 Reflector o superficie reflectora

El reflector o superficie reflectora es una superficie que por sus características ópticas superficiales, tiene la propiedad de reflejar la radiación incidente sobre ella. La calidad de la reflexión, en términos de eficiencia, se mide por medio del coeficiente de reflectividad  $\rho$ , el cual es el cociente entre la energía recibida y la energía reflejada. En general,  $\rho$  depende de la longitud de onda y de la rugosidad superficial.

## 9 Ángulo de Incidencia y Reflexión

La superficie reflectora definida anteriormente, refleja los rayos de luz incidentes de acuerdo a 2 leyes clásicas de la reflexión. Si la reflexión es especular, la primera ley establece que el ángulo entre el vector normal a la superficie y el rayo incidente, es igual al ángulo entre el vector normal y el reflejado. Además, los tres vectores (incidente, normal y reflejado) están en el mismo plano.

### 10 Reflexión especular y reflexión difusa

Para las superficies metálicas, si la longitud de la onda incidente es mucho mayor que el parámetro de celda de la red cristalina, la reflexión ocurre en los términos descritos por las dos leyes clásicas. A medida que la longitud de onda se hace más pequeña, y de orden de magnitud más cercano al parámetro de celda, la reflexión es cada vez más caótica. Los rayos reflejados ya no siguen las leyes clásicas de reflexión, y se produce una dispersión del haz reflejado debido a los variados ángulos de los rayos reflejados.

A esto se le agrega el efecto de las rugosidades superficiales micro estructural. La superficie está compuesta de una gran cantidad de planos cristalinos expuestos, los cuales no corresponden a la formulación geométrica de una superficie reflectora.

Si la superficie reflectora es totalmente lisa y sin imperfecciones superficiales, entonces la reflexión se llama especular, y se caracteriza por tener un rayo reflejado en una sola dirección. Si la radiación reflejada está uniformemente distribuida en todas las direcciones, entonces se llama difusa. En la realidad no hay reflexión difusa ni especular pura, sino que es una mezcla entre ambas dependiendo de la superficie.

### 11 Foco, mancha focal y cáustica

Si se considera un haz de rayos paralelos que inciden sobre una superficie reflectora, cumpliendo con las leyes ya definidas de reflexión, entonces, podrá existir una zona del espacio en la cual convergerán los rayos reflejados. Si la zona es un punto,

entonces todos los rayos convergen en él, y se llama foco. Si es una zona dispersa, se llama mancha focal. La cáustica es la envolvente de las trayectorias de los rayos reflejados, y es una degeneración de la mancha focal.

## 12 Enfoque

Es una condición del ángulo de incidencia del haz en la cual se produce concentración puntual.

## 13 Receptor

Al tener un reflector bajo condiciones apropiadas de irradiación y orientación, se tiene definida una zona de concentración de rayos, o mancha focal. Para aprovechar la energía concentrada en esa zona, es necesario colocar en ella un objeto que la reciba y la transforme en alguna forma de energía aprovechable. Este objeto es el receptor o absorbente, y puede ser una celda fotovoltaica, un recipiente, u conducto caloportador, etc...

## 14 Superficie aparente

Es la superficie que representa un objeto en una dirección dada.

## 15 Factor de concentración

Se define como el cociente entre la potencia radiante que atraviesa la superficie de entrada del concentrador, y la que llegaría al receptor en ausencia de pérdidas por transmisión y reflexión.

$$C = E_{\text{recep}} / E_{\text{refl}}$$

donde:

$E_{\text{refl}}$ : Radiación incidente sobre la apertura del reflector, [W/cm<sup>2</sup>]

$E_{\text{recep}}$ : Energía incidente sobre el plano receptor, [W/cm<sup>2</sup>]