

CPCdise: UNA HERRAMIENTA DE DISEÑO DE CONCENTRADORES CPC BAJO MATHEMATICA

G. DURAN, M. CONDORI

INENCO, Instituto de Investigación en Energía No Convencional. (UNSa-CONICET)
 Universidad Nacional de Salta,

Avda. Bolivia 5150, A4408FVY, Salta, Argentina.

Te: 54-387-4255424, Fax: 54-387-4255489, E-mail: gondur99@yahoo.com.ar, condori@unsa.edu.ar

RESUMEN: CPCdise es un programa bajo Mathematica 3 o superior, que permite el prediseño de concentradores CPC para distintos tipos de absorbedores, mediante el principio de los rayos extremos. Permite además truncar la altura del concentrador diseñado y ver una secuencia de marchas de rayos en este, evaluando la tasa de rayos absorbidos / incidentes, y exportar el diseño efectuado en formato DXF.

Palabras Claves: CPC, concentrador, rayos extremos, absorbedor.

INTRODUCCIÓN

Los concentradores parabólicos compuestos (CPC, por sus siglas en inglés), son aquellos que alcanzan el límite termodinámico de concentración máximo, cuyo coeficiente está dado por:

$$C = \frac{1}{\text{sen} \theta_a} \quad \text{en 2 D} \quad (1)$$

$$C = \frac{1}{\text{sen}^2 \theta_a} \quad \text{en 3 D} \quad (2)$$

Debido a sus propiedades ópticas, son también llamados concentradores ideales; y consisten de dos reflectores parabólicos que concentran la radiación que ingresa en la abertura, hacia el absorbedor.

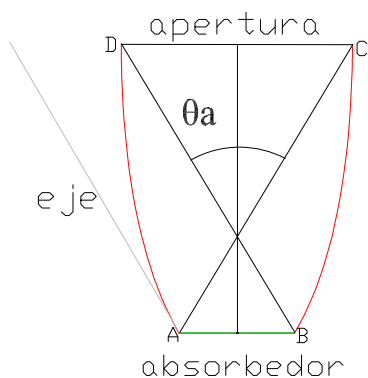


Figura 1: Esquema de un CPC en 2D con absorbedor plano

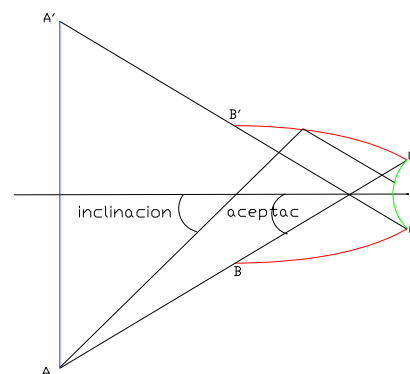


Figura 2: Esquema del principio de rayos extremos

En la figura 1, se muestra el esquema de un CPC en 2D, con absorbedor plano. El eje de la parábola derecha subtende un ángulo θ_a con el eje del concentrador y tiene foco en A. La parábola izquierda es simétrica de la derecha pero con foco en B y subtende un ángulo de $-\theta_a$ con el eje. En los puntos C y D, la pendiente de las curvas es casi paralela a su eje.

Al trazar unos rayos, puede verse que los rayos incidentes en la abertura, con un ángulo de incidencia menor que θ_a alcanzan al absorbedor, mientras que los rayos con ángulo $\theta > \theta_a$ se reflejan hasta salir por la abertura. La concentración geométrica es, entonces:

$$C = n \frac{\text{Sen} \theta_a}{F_{ap-s}} \quad (3)$$

donde n es el índice de refracción del medio que rodea al reflector, y F_{ap-s} es el factor de forma para radiación difusa de la abertura a la fuente.

DISEÑO DE CONCENTRADORES CPC

El diseño de los concentradores CPC planos es determinado por el principio de los rayos extremos, definidos como los rayos que provienen del borde de la fuente. Considerando que el número medio de reflexiones debe ser el menor posible, el criterio de diseño exige maximizar la pendiente de la curva del reflector sujeto a la condición de que los rayos iluminen el absorbedor para un ángulo menor al de aceptación. Esto implica que los rayos generados con un ángulo θ_a en el absorbedor emergerán del concentrador como rayos extremos después de una reflexión.

En la Figura 2 se muestra un esquema con el diseño de CPC. La radiación de la fuente difusa S entra en la apertura BB' y es concentrada en el absorbedor. La curva del reflector debe tener una pendiente tal que un rayo emitido en cualquier punto P del absorbedor con un ángulo menor a θ_a sea reflejado a través del eje AA' de la fuente. Matemáticamente, la pendiente del concentrador es determinada por una ecuación diferencial con una condición de borde, que es dada por la intersección de la curva del reflector con un extremo del absorbedor.

Para el caso de un absorbedor tubular, sea elíptico o circular, la ecuación que describe la distancia ρ del absorbedor al reflector es:

$$\rho = \begin{cases} r\theta & \text{para } \theta < \theta_a + \pi/2 \\ r \frac{\theta + \theta_a + \pi/2 - \text{Cos}(\theta - \theta_a)}{1 + \text{Sen}(\theta - \theta_a)} & \text{para } \theta_a + \pi/2 < |\theta| < \frac{3}{2}\pi - \theta_a \end{cases} \quad (4)$$

La primera rama de la ecuación describe un segmento de involuta de la circunferencia de radio r , donde r es el radio del absorbedor.

Para cualquier tipo de CPC, la distribución de flujo en el absorbedor depende del ángulo de incidencia y de su forma, su determinación exacta requiere de marcha de rayos. Sin embargo, si la radiación incidente en la abertura se distribuye uniformemente sobre el ángulo de aceptación, alcanzara al absorbedor de forma isotrópica; independientemente de la forma del absorbedor.

Al tener grandes áreas reflectoras, los CPC pueden truncarse en su porción superior con una pequeña pérdida de concentración, pues esta porción es casi paralela al eje del concentrador, con lo cual contribuye de forma mínima a la radiación incidente en el absorbedor.

DISEÑO DE CONCENTRADORES CPC USANDO CPCdise

CPCdise utiliza el método de los rayos extremos y la visualización de la marcha de rayos para diseñar los concentradores. En líneas generales el método de diseño que sigue el programa está basado en encontrar una parábola con foco en un extremo del absorbedor y cuyo eje subtienda un ángulo θ_a con el eje del CPC, y que intercepte al absorbedor en su otro extremo, tomando como eje de simetría axial al eje del concentrador. Luego de determinar la primera componente del concentrador, la segunda es obtenida por simetría axial respecto al eje del CPC, y en los casos en que sea necesario se utiliza una involuta de circunferencia o un arco como segunda superficie reflectora.

Para todos los casos, el prediseño del concentrador es realizado con un grupo de “funciones de diseño”, y la marcha de rayos, con el grupo de “funciones de raytracing”. El código de las funciones, y el detalle de lo que hace cada una se encuentra en la notebook “Auxiliar”.

CPCdise es capaz de diseñar concentradores simétricos para las siguientes geometrías:

- Absorbedor lineal, en la dirección del eje del concentrador; y en dirección perpendicular a él.
- Absorbedor elíptico, para elipse de eje mayor paralelo o perpendicular al eje del concentrador, y para absorbedor circular; como caso especial de elipse de ejes iguales.
- Absorbedor triangular.
- Absorbedor rectangular y cuadrado, como absorbedor rectangular con base y altura iguales.

Requerimientos de sistema

Mathematica 3 o superior. Mathematica 3 trabaja desde un procesador 386 en adelante, con 16 Mb Ram, 50 Mb de espacio en disco, y Windows 9X/Me/NT/XP. Además un programa de descompresión de archivos zip (como WinZip o WinRAR), para desempaquetar el programa.

FORMA DE DISEÑO

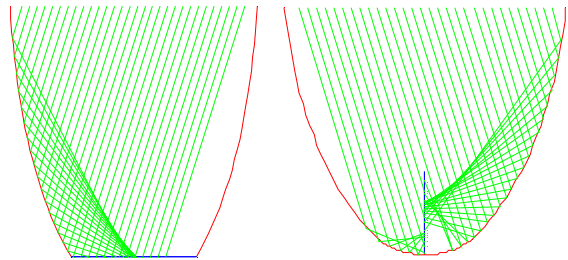
El diseño depende principalmente de la función Parábola que tiene como argumentos a: ángulo de inclinación respecto a la vertical, foco, punto de intersección, con la que se realiza el gráfico paramétrico de cada parábola del concentrador. En la mayor parte de los casos, para unir ambas, se define una segunda curva como involuta o arco de circunferencia. Al describirse paraméricamente, las curvas son del tipo {parábola(x), parábola(x)}, donde los extremos del segmento de parábola son llamados Ex1 y Ex2.

En los diseños donde el absorbedor une a las parábolas, Ex1 es el punto extremo del absorbedor. En todos los casos donde se utilizan involutas o arco para unir las parábolas, estas curvas auxiliares parten del extremo del absorbedor, Ex1 coincide con su extremo. La altura máxima del concentrador, llamada Ex2, es obtenida al evaluar la función en el parámetro x_{max} , cuyo valor depende de la concentración ideal, y la longitud del absorbedor. Una vez obtenido el prediseño, el programa permite truncar en altura, con lo cual se modifica internamente el valor de x_{max} .

La marcha de rayos está controlada por las funciones Propagación, Intersección y Reflexión las que actúan sobre la matriz Lista de Curvas. Esta matriz tiene referenciada la información de los segmentos de parábola, la curva de absorbedor y los arcos que forman el concentrador, con sus puntos extremos, la información del algoritmo que usará internamente Intersección y un bit de control que indica si la superficie es reflectora o absorbente. La función Propagación, de argumentos (rayo, lista de curvas); se encarga de propagar por la lista de curvas los rayos incidentes con un ángulo θ respecto de la vertical. La intersección de los rayos con las curvas de la lista esta dada por Intersección (rayo, lista de curvas), que posee tres algoritmos: InterseccionSolve, InterseccionFindRoot e InterseccionFindRootSeparado, controlados por las funciones propias de Mathematica Solve y FindRoot. Según el algoritmo elegido, varía el método, el tiempo de calculo y la precisión para interceptar los rayos con las curvas. La función Reflexión calcula la reflexión de los rayos con las superficies reflectoras de la lista de curvas. Para ello, calcula el ángulo entre el rayo incidente y la normal a la superficie en el punto donde Intersección detecto la incidencia del rayo; al tener el ángulo de incidencia, se conoce el ángulo de reflexión por ley de Snell.

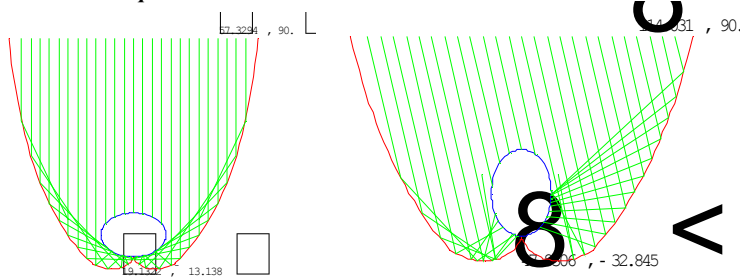
Absorbedor lineal

En el diseño para absorbedor horizontal, la rama derecha es una parábola cuyo eje está inclinado un valor de θ_{acep} respecto del eje y; con foco en $(-L/2, 0)$, y que intercepta al absorbedor en el punto $(L/2, 0)$. El gráfico se realiza variando un parámetro θ desde 0 al valor extremo Ex2, que depende de la concentración ideal y de la longitud del absorbedor L. Este valor extremo será la variable a modificar al truncar el concentrador. La parábola izquierda se tiene por simetría axial de la derecha.



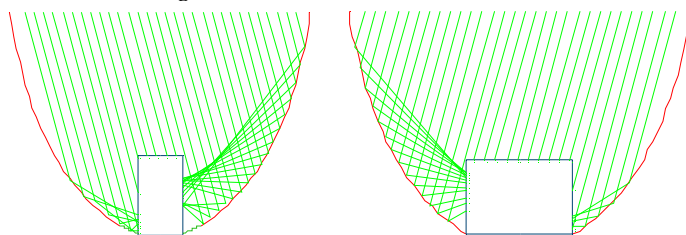
El diseño para absorbedor vertical, es similar al caso anterior, pero para unir las parábolas con el absorbedor se define una segunda superficie reflectora con un arco de circunferencia de radio L. El arco se grafica desde el punto de coordenadas correspondiente al parámetro angular $\theta = 0$, al punto correspondiente para $\theta = L \text{ Sen}(\theta_{acep})$.

Absorbedor elíptico



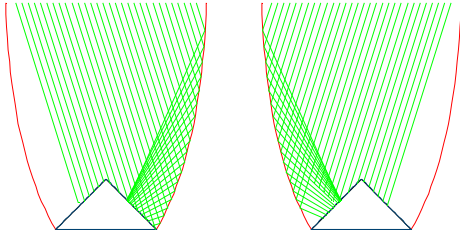
El diseño se realiza siguiendo la ecuación (4). Para un absorbedor elíptico, se diseña evaluando la función Parábola en $(\theta_{acep}, C, Ex1)$, donde C es la coordenada del foco de la elipse, y Ex1 el punto inferior de la parábola, obtenido para $\theta = \theta_{acep} + \pi/2$, valor del parámetro θ de (4). Se usa como segunda superficie reflectora la involuta de circunferencia de radio igual a la longitud del eje mayor, que es graficada desde $\theta = 0$ a $\theta = \theta_{acep} + \pi/2$. El extremo superior Ex2 se obtiene con el criterio ya mencionado.

Absorbedor rectangular



Al diseñar para absorbedor rectangular, se utiliza como longitud de diseño al mayor de los lados del absorbedor. Si ambos son iguales, o la base es mayor, el diseño para absorbedor cuadrado es análogo a uno para absorbedor lineal horizontal ubicado sobre el origen. En caso contrario, se diseña de forma similar a dos absorbedores lineales verticales, separados entre si por la distancia de la base. Para unir las parábolas con el absorbedor se usa un arco de circunferencia.

Absorbedor triangular



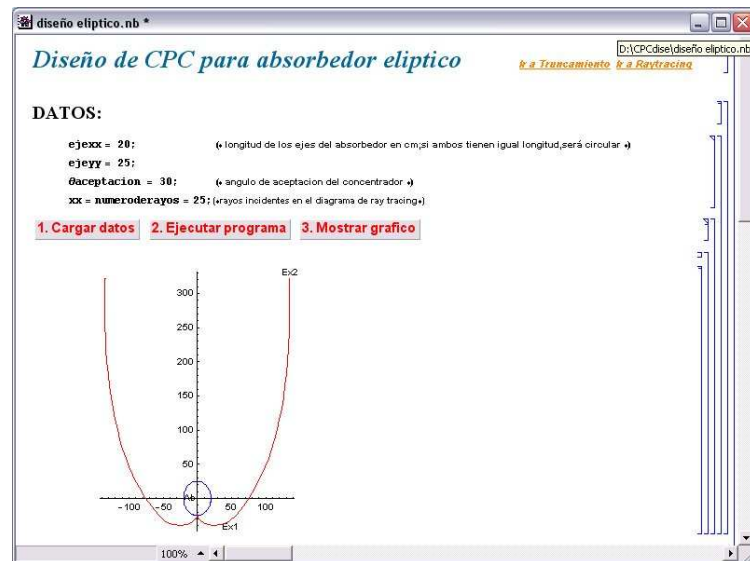
El diseño para absorbedor triangular está basado en el diseño para absorbedor lineal horizontal, por lo que sigue sus lineamientos. Se diseña entonces para un absorbedor lineal de longitud igual a la base de un triángulo isósceles.

USO DEL PROGRAMA



Al descomprimir la carpeta y abrirla encontramos un grupo de notebooks. Cargando “CPCdise.nb” se ejecuta el cuerpo principal del programa. En él, se elige entre los de posibles diseños según el tipo de absorbedor que se disponga. Al elegir el tipo de diseño, el programa llamara a la notebook correspondiente. Las notebooks de cada tipo de diseño tienen la siguiente estructura:

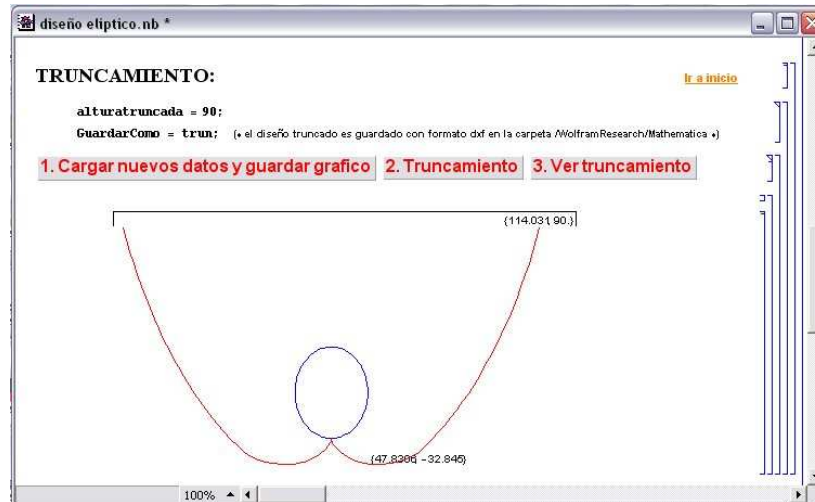
- *Datos:
- *Truncamiento:
- *Ray tracing (marcha de rayos)



Datos: En ella se realiza la entrada de datos del absorbedor a diseñar. En todos los casos se necesita dar por teclado las dimensiones del absorbedor, la concentración pretendida y el semiángulo de aceptación del concentrador.

Para obtener el prediseño, es necesario cargar los datos en el Kernel, haciendo clic en el botón “1.- Cargar datos”, luego al hacer clic en “2.- Ejecutar el programa”, mediante un hipervínculo se carga y evalúa en el Kernel el código de la sección correspondiente, que se encuentra incluido en la notebook Auxiliar. Al evaluar “3.- Mostrar gráfico”, el programa llama a Auxiliar, y se obtiene un prediseño del concentrador.

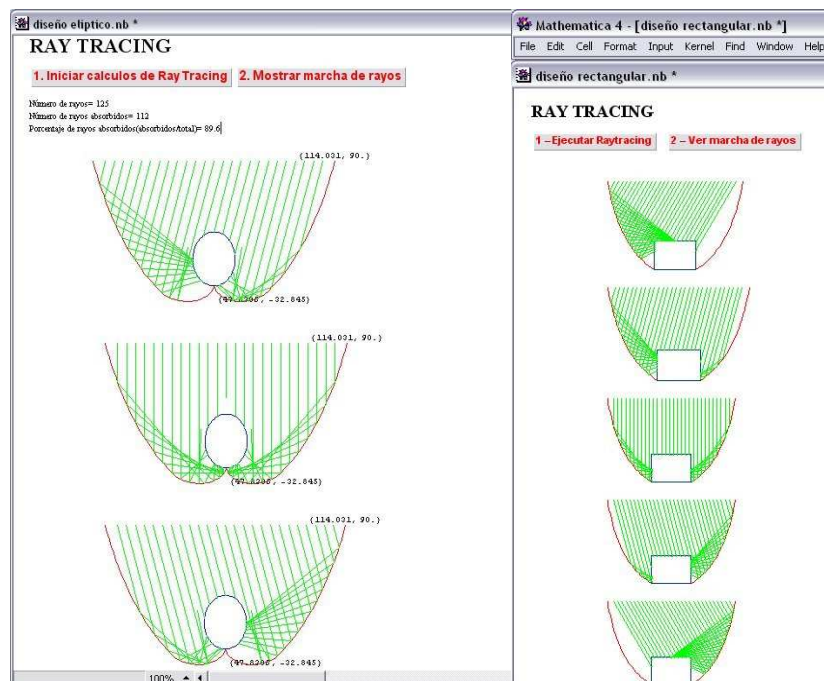
Para evitar recargar la pantalla con el código del programa, este se encuentra enteramente incluido en Auxiliar, además al separarse los diseños en varias notebooks, se tiene mayor facilidad en su uso. Sin embargo, debe respetarse el orden de carga dado por los botones, el cual se repite en todas las entradas de datos.



Truncamiento: En la sección truncamiento, se ingresa por teclado la longitud a la que se desea truncar, y el nombre con el cual se guardará el diseño truncado. Este es guardado en la carpeta WolframResearch/Mathematica con extensión .dxf; lo que permite exportarlo a programas CAD y el ploteo a escala real del concentrador.

Ray tracing: Para tener una idea mas clara del funcionamiento, del concentrador se puede observar la marcha de rayos y la tasa de rayos absorbidos / rayos incidentes.

Puede elegirse entre entrar el ángulo de barrido de los rayos incidentes, o usar el valor del ángulo de aceptación. Hay que recordar que la forma de operación de Matemática, esto es cargar y evaluar en el Mathematica Kernel las funciones permite agilizar la optimización del diseño, ya que cuando se desea cambiar alguna entrada en las secciones Truncamiento o Ray Tracing, (ver la marcha de rayos con un ángulo de barrido distinto, o cambiar la longitud de truncamiento, por ejemplo) no es necesario correr todo el diseño del programa desde la sección Datos, ya que su entrada fue evaluada y cargada en el Kernel, y no necesita modificarse.



CONCLUSIONES

Se ha construido una plataforma útil para el diseño de CPC en 2D para varios tipos de geometría de absorbedor. Entre estas se encuentran las geometrías más utilizadas: cilíndrico, plano y triangular. La plataforma permite cambiar fácilmente los parámetros geométricos del diseño, realizar el truncamiento de la altura, la marcha de rayos para distintos ángulos de incidencia y el cálculo de la eficiencia de captación del CPC. El dibujo del diseño final puede ser convertido a formato DXF y leído luego por programas como ACAD para plotearlo en tamaño real.

Una versión comprimida de la plataforma está disponible en la web o por correo electrónico. La plataforma aquí presentada corre bajo Matemática, pero se trabaja en una versión ejecutable de la misma en otro lenguaje.

REFERENCIAS

Rabl, A. (1985). *Active Solar Collectors and their Applications*. Oxford Univ. Press, New York.

Welford W. T., Winston R. (1989). *High Collection Nonimaging Optics*. Academic Press Inc., California.

Chavez, J. Correspondencia personal

Agradecimientos: Los autores agradecen la colaboración del Dr. Julio Chávez. Del INETI, Portugal.

Reconocimientos: Este trabajo está parcialmente financiado por el CIUNSa, CONICET y COFECYT.

ABSTRACT:

CPCdise is a program working on MATHEMATICA 3 or upper version. It is used to design CPC concentrators for several types of absorbers applying the principle of extreme rays. In the software, the CPC length can be truncated. Also, the sequence of rays tracing on CPC is shown. The ratio between the incident rays on the aperture and the incident on the absorber is performed. The final design can be exported in DXF format.

Keywords: CPC, concentrator, ray tracing, absorber.