



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Máster

CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO DE NUEVOS SISTEMAS ÓPTICOS EN EL CAMPO DE LA CONCENTRACIÓN FOTOVOLTAICA

Alumno/a: Aranda Ochando, Álvaro

Tutor/a: Prof. D^a. Florencia Marina Almonacid Cruz

Dpto.: Ingeniería electrónica y automática

julio, 2019



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Informática

Doña Florencia Marina Almonacid Cruz , tutora del Proyecto Fin de Carrera titulado: Contribución al desarrollo de nuevos sistemas ópticos en el campo de la Concentracion Fotovoltaica, que presenta Álvaro Aranda Ochando, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, julio de 2019

El alumno:

Álvaro Aranda Ochando

Los tutores:

Florencia Marina Almonacid Cruz

Agradecimientos

Quiero agradecer la disposición y toda la ayuda recibida a lo largo del presente trabajo de fin de máster por parte de los compañeros del grupo de investigación CEAEMA.

Especialmente quiero agradecer a mi co-tutor Eduardo Fernández Fernández por su entera disposición y por enseñarme los conocimientos necesarios para la realización del trabajo

También agradecer a Juan Pablo Ferrer, José Manuel Saura y Álvaro Valera por su colaboración diaria y ayuda en las diferentes dificultades y dudas que han ido surgiendo.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	7
2. OBJETIVOS	7
3. ENERGÍA FOTOVOLTAICA.....	8
3.1. Efecto fotovoltaico.....	8
3.2. Curva característica I-V.....	9
3.2.1. Tensión de circuito abierto (V_{OC})	10
3.2.2. Intensidad de cortocircuito (I_{SC}).....	10
3.2.3. Punto de máxima potencia (P_{MP}).....	11
3.2.4. Factor de forma o de relleno (FF).....	11
3.2.5. Influencia de la temperatura y la irradiancia sobre la curva	12
4. Energía solar fotovoltaica de alta concentración (HCPV). Fundamentos teóricos.....	14
4.1. Clasificación	16
4.2. Sistemas de alta concentración fotovoltaica.....	17
4.2.1. Célula solar:	17
4.2.2. Elementos ópticos primarios (esenciales) y secundarios (opcionales):	18
4.2.3. Estructura externa.....	21
4.3. Situación actual.....	21
5. Idea inicial	24
6. Diseño del módulo fotovoltaico.....	28
6.1. Fibras.....	29
6.2. Lentes	31
6.3. Célula solar	32
6.4. Placa superior	33
6.5. Estructura.....	35
6.6. Placa media	38
6.7. Piezas varias.....	40
6.7.1. Piezas ajuste de fibra en el foco.....	40
6.7.2. Pieza de sujeción del final de las fibras.....	42
6.7.3. Pieza para fijación de la célula solar	43
7. Fabricación y montaje	44
7.1. Métodos de fabricación	45
7.1.1. Impresión 3D.....	45
7.1.2. Corte por láser	47
7.1.3. Sierra circular de mesa automática	49

7.2.	Proceso de fabricación y montaje.....	51
7.2.1.	Estructura.....	51
7.2.2.	Placa superior y media.....	54
7.2.3.	Lentes	57
7.2.4.	Piezas de plástico	58
7.2.5.	Piezas de madera	61
7.2.6.	Fibras ópticas.....	61
7.2.7.	Célula solar	62
7.2.8.	Otros	64
8.	Optimización: Inclusión de SOE	65
8.1.	SOE reflexivo	66
8.1.1.	Criterios de diseño	66
8.2.	Diseño preliminar: Matlab.....	68
8.2.1.	SOE forma cónica:	69
8.2.2.	SOE curvo.....	75
8.3.	Optimización del diseño: Simulaciones ópticas en TracePro.....	79
8.3.1.	SOE cónico	79
8.3.2.	SOE curvo.....	88
8.4.	Comparación.....	91
9.	Ensayo experimental. Simulador solar	94
9.1.	Procedimiento de medida.....	95
9.1.1.	Colocación del módulo en la parrilla.....	95
9.1.2.	Alineamiento del módulo	95
9.1.3.	Calibración del foco con las fibras	96
9.1.4.	Realización de medidas	98
9.2.	Resultados. Curva I-V	99
9.2.1.	Isc y Voc	102
9.2.2.	Factor de forma o de relleno (FF).....	102
9.2.3.	Potencia.....	103
9.2.4.	Rendimientos y eficiencias	103
10.	Conclusiones	105
10.1.	Pérdidas	105
10.1.1.	Pérdidas en la lente Fresnel.....	106
10.1.2.	Pérdidas a la entrada de la fibra.....	106
10.1.3.	Pérdidas a lo largo de la fibra.....	106
10.1.4.	Pérdidas en la célula solar	107

11. Línea de actuación futura	110
Referencias	112

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de fin de máster pretende avanzar en el campo de la energía solar fotovoltaica de alta concentración con el diseño, simulación y fabricación de un nuevo tipo de módulo de concentración basado en el uso de fibra óptica para conducir la luz concentrada proveniente de lentes Fresnel hacia una misma célula fotovoltaica de alta eficiencia (célula de triple unión).

Con esta idea se pretende desarrollar un mono-módulo trabajando a altas concentraciones.

La estructura seguida en el trabajo va a ser, en primer lugar, introducir brevemente la tecnología solar fotovoltaica de concentración y describir su situación actual. Posteriormente, se procederá con el grueso del trabajo donde se describirá todo el proceso seguido en la creación del módulo, englobando este la idea inicial, diseño y fabricación y montaje. Finalmente, las simulaciones, tanto por ordenador en un software óptico, como reales en un simulador solar, nos darán una idea del funcionamiento y comportamiento que tiene del módulo, proporcionándonos datos relevantes en cuanto a sus eficiencias, potencia máxima, etc.

Para concluir se analizarán los resultados obtenidos y se procederá con las conclusiones finales extraídas de la realización del presente trabajo.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo consiste en el diseño, fabricación y caracterización de un módulo basado en la idea antes expuesta capaz de alcanzar altas concentraciones. El objetivo final es adquirir el conocimiento y obtener datos necesarios acerca de su funcionamiento y comportamiento que nos permita sentar unas bases y principios que sean útiles de cara a implementarlo de manera óptima en un futuro, siempre y cuando se considere factible.

No es un objetivo del trabajo la caracterización del módulo a sol real. Se pretende desarrollar un prototipo que sirva de prueba de concepto de la tecnología desarrollada, se pretende por tanto caracterizarlo bajo condiciones controladas mediante el simulador solar. De esta manera es posible utilizar en la fabricación del prototipo

materiales no resistentes a las altas temperaturas que se alcanzan en la tecnología de concentración fotovoltaica.

Adicionalmente, se presenta como objetivo también la introducción al mundo de los sistemas solares de concentración (tecnología, funcionamiento, comparación con sistemas convencionales), analizando además su estado actual.

3. ENERGÍA FOTOVOLTAICA

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable, obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula solar (unión pn).

El principio de funcionamiento de las células solares se basa en el efecto fotovoltaico.

3.1. Efecto fotovoltaico

La célula solar está formada por la unión de dos semiconductores extrínsecos, p y n (unión pn), que son semiconductores intrínsecos (cuerpos que presentan una resistencia intermedia al paso de los electrones) dopados con impurezas. El dopaje permitirá la formación de enlaces de manera que en un semiconductor aparezca un exceso de huecos (semiconductor extrínseco tipo p) y en el otro un exceso de electrones (tipo n).

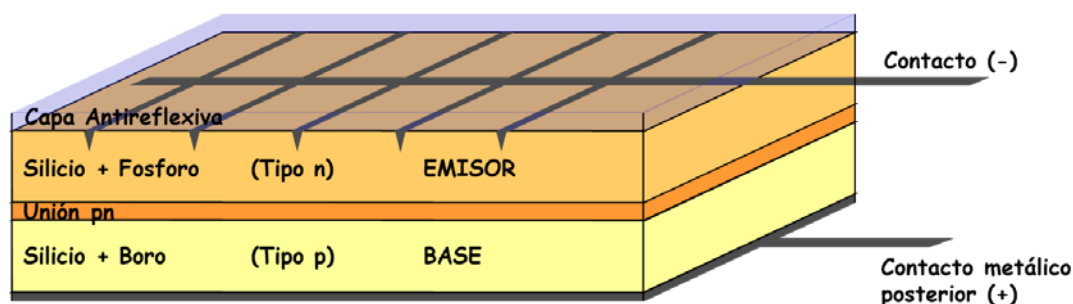


Ilustración 3.1. Estructura de una célula de silicio.

En la célula solar la parte iluminada será el semiconductor tipo n y la no iluminada será el tipo p. El efecto fotovoltaico se produce al incidir la radiación solar (fotones) sobre la cara iluminada (semiconductor n). Los fotones con energía suficiente son capaces de romper un enlace covalente y generar un par electrón-hueco. Por cada

enlace que se rompe queda un electrón y un hueco para circular dentro del semiconductor. El movimiento de los electrones y huecos en sentidos opuestos (conseguido por la existencia del campo eléctrico que se forma en torno a la unión de los dos semiconductores p y n) genera una corriente eléctrica en el semiconductor la cual puede circular por un circuito externo y liberar la energía cedida por los fotones para crear los pares electrón-hueco. [1]

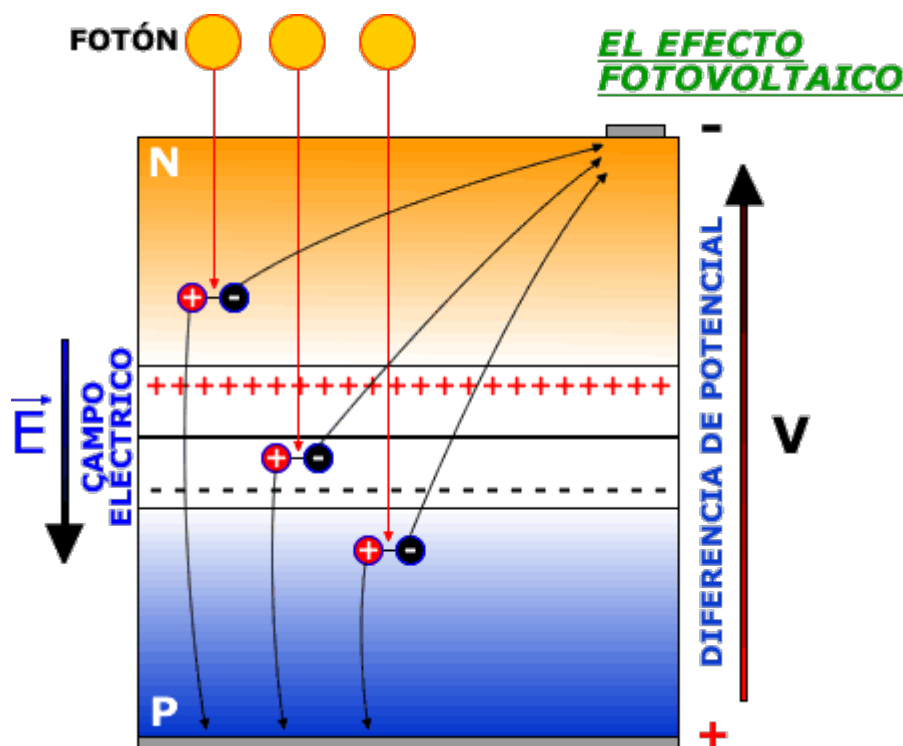


Ilustración 3.2. El efecto fotovoltaico.

3.2. Curva característica I-V

Una célula solar se caracteriza obteniendo su curva característica o curva I-V. La curva I-V de una célula solar representa pares de valores de tensión e intensidad en los que puede encontrarse funcionando la célula. La curva se obtiene haciendo trabajar la célula con diferentes cargas de menor a mayor valor, desde cortocircuito (resistencia prácticamente nula) hasta circuito abierto (resistencia muy elevada), mientras la célula o módulo se encuentra en condiciones de trabajo. [1]

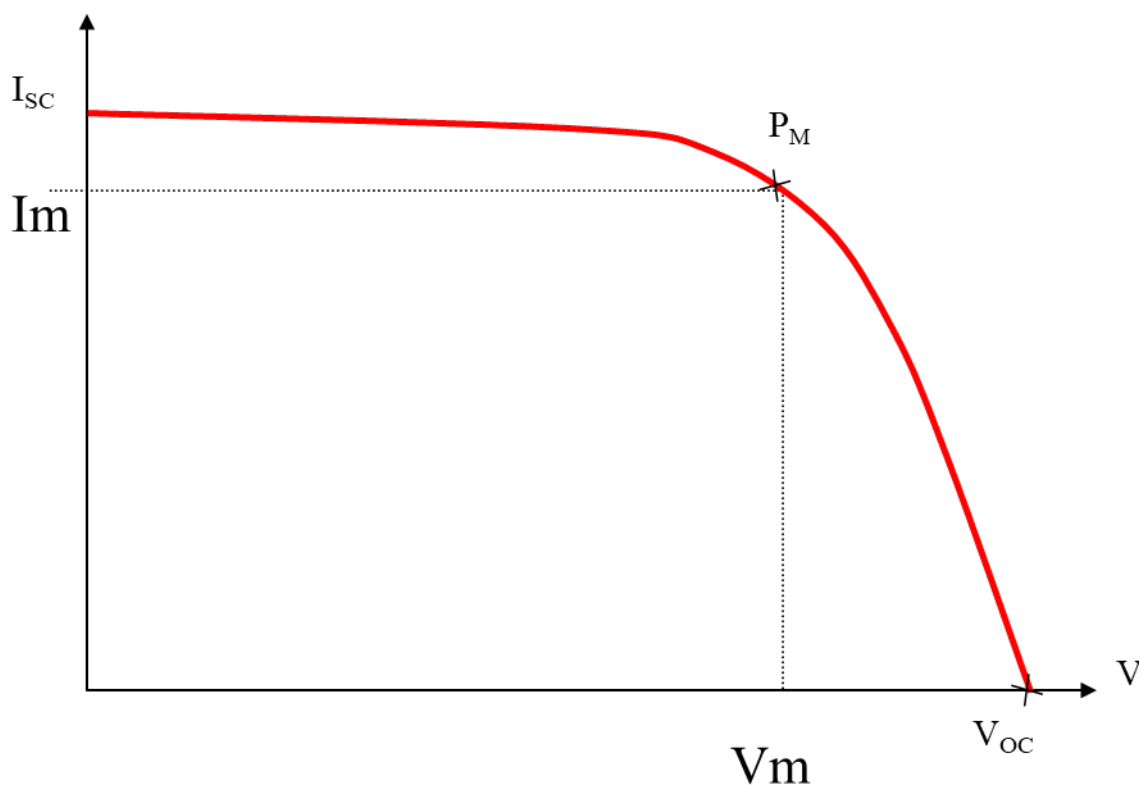


Ilustración 3.3. Curva I-V.

Los valores característicos de una curva I-V son los siguientes:

3.2.1. Tensión de circuito abierto (V_{oc})

Es el máximo valor de tensión en extremos de la célula y se da cuando esta no está conectada a ninguna carga, es decir, a intensidad 0.

La tensión en circuito abierto no depende de la radiación incidente, sino fundamentalmente de las características de la célula.

3.2.2. Intensidad de cortocircuito (I_{sc})

Es el máximo valor de corriente que circula por una célula solar y se da cuando la célula está en cortocircuito, es decir, a tensión 0.

La intensidad de cortocircuito depende principalmente de las características de la célula y de la cantidad de energía o radiación que incide sobre ella y es capaz de captar.

3.2.3. Punto de máxima potencia (P_{MP})

Es el producto del valor de tensión máxima (V_M) e intensidad máxima (I_M) para los que la potencia entregada a una carga es máxima.

Es decir, es el punto de la curva donde el producto de la intensidad con el voltaje es mayor. Por tanto, si queremos obtener el máximo rendimiento de una célula, la debemos de hacer trabajar en ese punto.

3.2.4. Factor de forma o de relleno (FF)

El factor de forma es un parámetro que viene a indicar la calidad de una curva I-V. Es uno de los parámetros clave de una curva característica porque va ligado con el rendimiento.

Se define como el cociente de potencia máxima que se puede entregar a una carga entre el producto de la tensión de circuito abierto y la intensidad de cortocircuito

$$FF (\%) = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \cdot 100$$

Por tanto, un mejor factor de forma implica que la curva característica se asimile más a un rectángulo, donde no exista caída de intensidad a medida que se aumenta el voltaje y llegados a la tensión de circuito la caída sea totalmente brusca.

La obtención de un buen factor de forma dependerá de diversos factores, entre ellos destacan las características de la célula y la uniformidad de la luz que incide sobre su superficie.

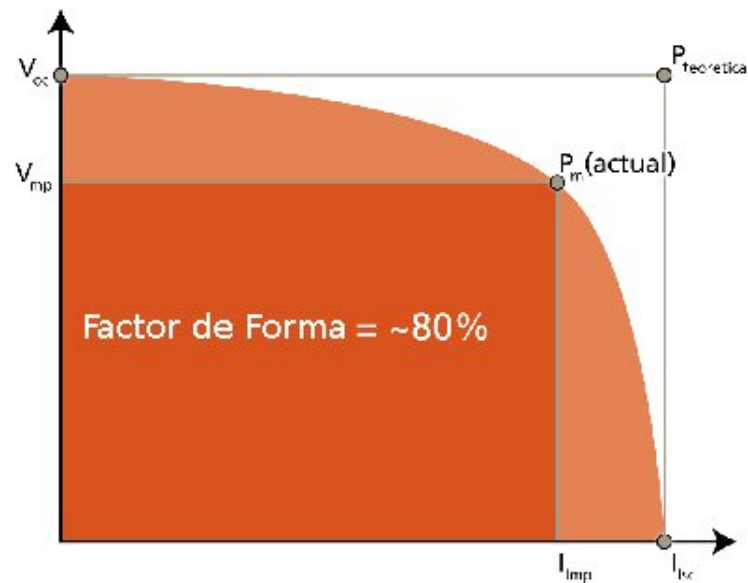


Ilustración 3.4. Factor de forma. Fuente [2]

3.2.5. Influencia de la temperatura y la irradiancia sobre la curva

Las condiciones externas a las que está expuesta la célula solar tienen una influencia total sobre su curva I-V. Principalmente hablamos de la radiación, temperatura y el espectro.

Altas temperaturas, como las que se dan cuando una célula está trabajando a sol real, producen una merma considerable en el funcionamiento de las células fotovoltaicas. La influencia que tiene sobre la curva es la siguiente:

- Aumenta ligeramente la intensidad de cortocircuito.
- Disminuye la tensión de circuito abierto (-2,3 mV/°C aproximadamente).
- Disminuye el factor de forma.
- Decrece el rendimiento.

Todos estos factores aunados, provocan una reducción del punto de máxima potencia de la curva.

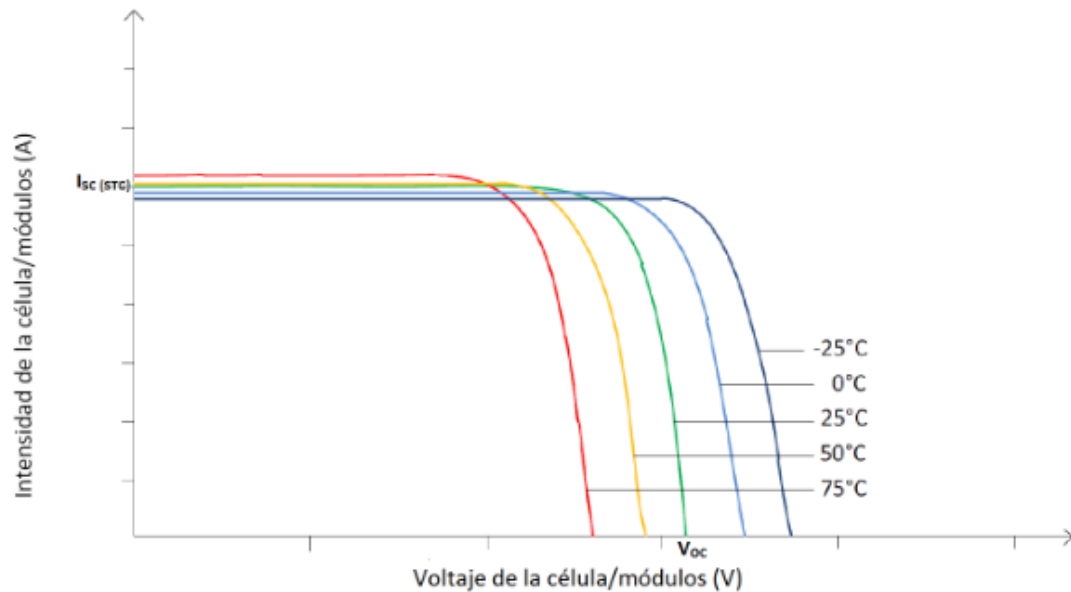


Ilustración 3.5. Influencia de la temperatura sobre la curva I-V. Fuente [3]

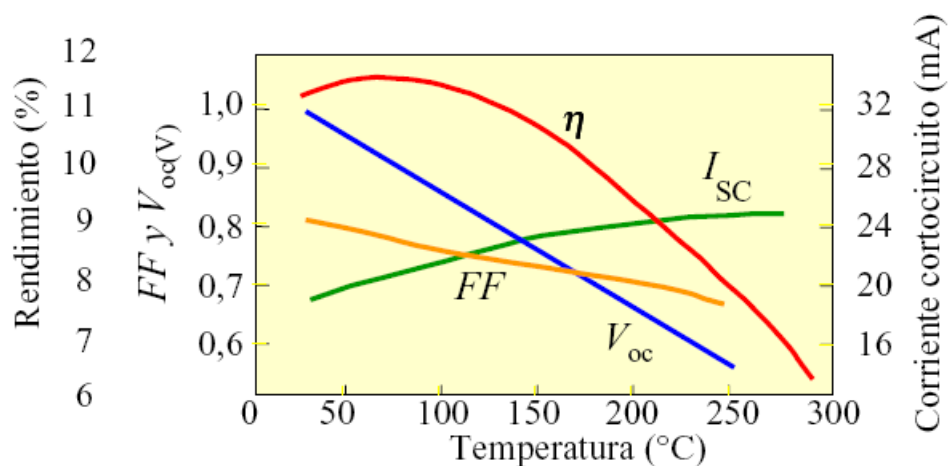


Ilustración 3.6. Influencia de la temperatura sobre los parámetros de la curva I-V.

Igualmente, la curva variará en función de la irradiancia sobre la célula. Mayores irradiancias provocan principalmente el incremento en la intensidad de cortocircuito, de manera que obtenemos mayor potencia a la salida.

Las células solares también se van a ver afectadas por la distribución espectral de la radiación solar incidente.

4. Energía solar fotovoltaica de alta concentración (HCPV). Fundamentos teóricos.

La energía solar fotovoltaica de concentración se basa en el uso de elementos ópticos que incrementen la luz recibida sobre la superficie de las células. A su vez, los sistemas de este tipo de energía disponen de células de alta eficiencia para un mayor aprovechamiento de la energía. Por tanto, la idea es usar elementos ópticos (espejos o lentes convergentes), que son mucho más baratos y simples, reduciendo así la superficie de las caras y complejas células fotovoltaicas de alta eficiencia. Resumiendo, el objetivo es reducir el coste de la electricidad producida remplazando superficie de células por elementos ópticos, es decir, reducir la relación coste-energía eléctrica producida.

Como se ha comentado en la anterior definición, el elemento mediante el cual se produce la concentración de luz puede ser refractivo (lentes) o reflexivo (espejos), existiendo de esta manera dos tipos de módulos fotovoltaicos de concentración bien diferenciados.

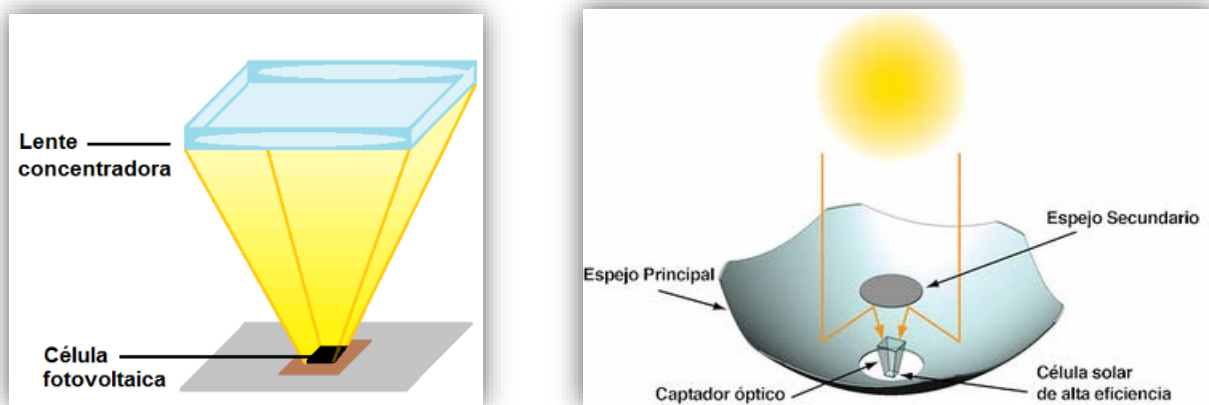


Ilustración 4.1. Módulo de concentración refractivo y reflexivo. Fuente [4] [5]

Como resulta evidente, para que las lentes concentren la radiación solar correctamente en la célula, será necesario que las mismas estén en todo momento del día totalmente perpendiculares a la luz del sol que incide sobre ellas. En caso de una mala orientación, el foco (de un tamaño similar al de la célula solar) no incidirá totalmente sobre la célula, existiendo grandes pérdidas o incluso totales en la producción de energía eléctrica.

Para ello, se requieren de unos sistemas mecánicos comandados por controladores y dotados de una estructura en forma de parrilla, sobre la que se colocan los módulos, que permitan el seguimiento total del Sol, tanto en el ángulo azimutal como en el cenital. Estos sistemas son los denominamos seguidores solares o trackers.



Fotografía 4.1. Tracker o seguidor solar. Fuente [6]

Todo esto quiere decir que un sistema fotovoltaico de concentración solo permite el aprovechamiento de la radiación solar directa, al contrario que los paneles solares planos convencionales, los cuales son capaces de captar y aprovechar tanto la radiación solar directa como la difusa y la de albedo (entendemos por radiación solar directa la que proviene directamente del Sol sin que sus rayos se encuentren obstáculo alguno ni sufran cualquier cambio de dirección; por radiación solar difusa la radiación solar que tras atravesar la atmósfera queda reflejada en todas las direcciones debido a las reflexiones y absorciones de las nubes, partículas de polvo atmosférico, montañas, etc.; y por radiación de albedo la radiación que es reflejada por la superficie terrestre que depende del coeficiente de reflexión de tenga la superficie). Por tanto, esta particularidad los hace más adecuados para zonas con muy poca nubosidad y pocas brumas, donde la radiación solar directa es la predominante. [7]

4.1. Clasificación

Los sistemas de concentración se clasifican normalmente de acuerdo a la ratio de concentración de la radiación solar sobre la célula. Esta ratio indica el número de veces que la luz solar es concentrada y se conoce como “soles”. Se calcula mediante la siguiente fórmula que tiene en cuenta la superficie plana del elemento óptico y la superficie efectiva de la célula solar: [8]

$$C_g = \frac{A_{lente}}{A_{célula}}$$

Siendo,

$C_g \equiv$ Concentración geométrica

$A \equiv$ Superficie o Área

Por tanto, según la concentración geométrica podemos encontrar tres sistemas diferentes de concentración fotovoltaica:

- Baja concentración (LCPV): Se corresponde con los sistemas cuya concentración geométrica se encuentra entre 1 y 40 soles.
- Media concentración (MCPV): Estos sistemas concentran la radiación solar entre 40 y 300 soles.
- Alta concentración (HCPV): Los sistemas fotovoltaicos cuya concentración sea superior a 300 soles quedan englobados dentro de este grupo.

Adicionalmente, existe otro parámetro similar más representativo ya que tiene en cuenta los rendimientos del módulo. Este es la concentración efectiva. Tomando como referencia la intensidad de cortocircuito capaz de alcanzar la célula con una irradiancia de 1 sol (1000 W/m^2), podemos conocer la correspondiente a cualquier irradiancia, puesto que la relación se considera proporcional. Por tanto, a partir de un cierto valor obtenido de intensidad de cortocircuito a la salida de la célula, podemos extraer su concentración efectiva.

En muchas ocasiones, la clasificación de los módulos se realiza tomando como referencia la concentración efectiva, ya que resulta más representativa en cuanto a las características de un módulo.

4.2. Sistemas de alta concentración fotovoltaica

Un sistema de alta concentración fotovoltaica es un sistema compuesto de un conjunto de módulos de alta concentración fotovoltaica interconectados eléctricamente y el “balance de sistema” o “BOS” (resto del sistema, que incluye mecanismo de seguimiento, cableado externo, conexión entre cajas, inversores, etc.). [8]

Un módulo de alta concentración fotovoltaica es el conjunto completo más pequeño que es capaz de transformar una luz incidente directamente del Sol en energía eléctrica. Así, un módulo fotovoltaico de alta concentración estará compuesto de los siguientes elementos:

4.2.1. Célula solar:

Actualmente, los módulos de alta concentración pueden estar compuesto de dos tipos de células fotovoltaicas diferentes: Células de silicio de alta eficiencia o células multi-unión.

La mayor eficiencia de las células multiunión hace que su uso sea de mayor interés y que actualmente las investigaciones se centren en su desarrollo con el objetivo de mejorar sus eficiencias y su coste, ya que se trata de una tecnología más novedosa con más camino por recorrer. Estas células, diferentes a las convencionales de silicio, aunque con un mecanismo similar a la hora de producir electricidad, están formadas por la unión de tres células (de materiales diferentes), cada una de las cuáles es capaz de captar la energía para una determinada longitud de onda del espectro solar. Por tanto, la principal diferencia respecto a las de silicio radica en que son más sensibles a un rango más ancho del espectro solar y no están limitadas a un rango específico. [8]

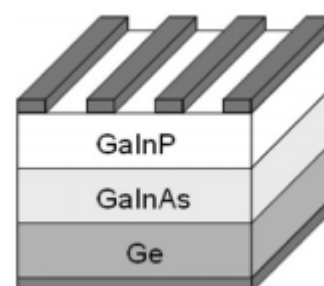


Ilustración 4.2. Célula solar de triple unión.

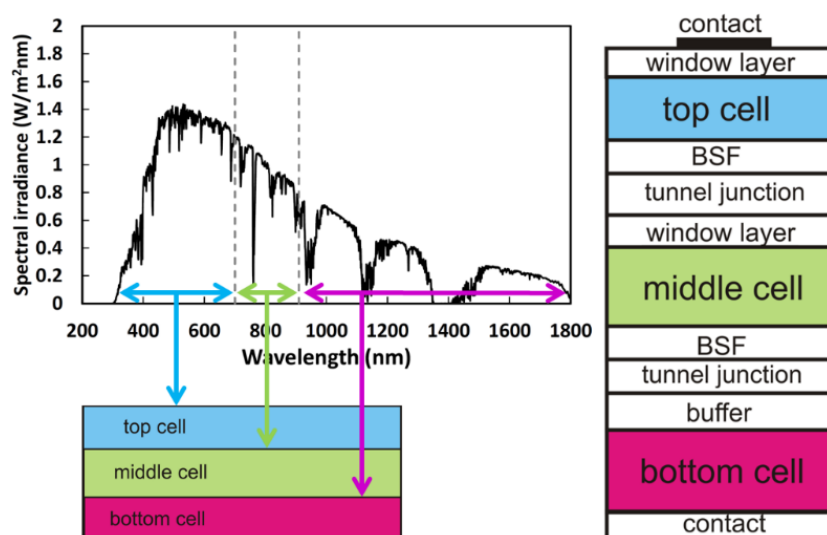


Ilustración 4.3. Espectro absorbido por cada capa.

Las células multi-uni3n suponen uno de los principales campos de desarrollo de este tipo de energa, persiguiéndose la consecuci3n de células cada vez m1s eficaces y a un menor precio, de manera que se pueda competir de t1 a t1 con las células convencionales de Silicio que tanto se han abaratado en los 1ltimos a1os. Por tanto, entra1a un gran reto el poder competir con ellas a nivel de relaci3n coste – energa el3ctrica producida.

4.2.2. Elementos 3pticos primarios (esenciales) y secundarios (opcionales):

Las células multiuni3n comentadas anteriormente no seran rentables en t1rminos econ3micos ni de energa sin el uso de elementos 3pticos de concentraci3n. Estos elementos persiguen dos prop3sitos:

- Incrementar el flujo de luz sobre la superficie de la célula de manera que esta pueda producir m1s energa el3ctrica.
- Reemplazar la parte m1s cara de un m3dulo fotovoltaico (célula solar), por materiales de pl1stico mucho m1s baratos (elemento 3ptico).

Como su propio nombre indica, son los elementos que realizan la concentraci3n de la luz solar. Estos elementos pueden ser de dos tipos, reflexivos o refractivos, en funci3n de si la concentraci3n se realice mediante espejos o lentes, respectivamente. Mientras los primeros se basan en el reflejo de los rayos que inciden sobre su superficie redireccion1ndolos hacia la superficie de la célula, los otros se basan en el

cambio de dirección de los rayos provocado al atravesar estos la superficie de separación de dos medios cuyo índice de refracción es distinto (Ley de Snell).

El tipo de concentradores más usados en el campo de la concentración fotovoltaica son las lentes de Fresnel. Estas, son lentes convergentes cuyo diseño especial permite una reducción en peso y volumen respecto a las convencionales. Su diseño es tal que se mantienen los radios de curvatura de las lentes separándolas en anillos circulares. El grosor de la lente en cada anillo es diferente, eliminando así el enorme espesor que tendría la lente en caso de ser sus superficies continuas. En la siguiente imagen podemos entender de manera más gráfica su diseño.

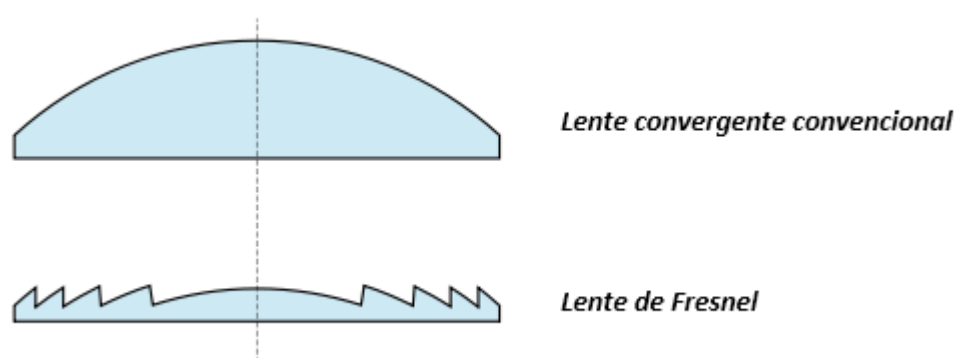


Ilustración 4.4. Lente convencional vs lente Fresnel. Fuente [9]

En ocasiones resulta necesario una segunda fase de concentración realizada por medio de los llamados elementos ópticos secundarios (SOE). Su función principal es la de aumentar la aceptación angular de estos sistemas de concentración fotovoltaica, así como asegurar una distribución uniforme de la energía incidente en la célula que evite la generación de puntos calientes sobre la misma. [10]

Es decir, permiten que el módulo no pierda demasiada eficiencia en situaciones donde existe cierto grado de desapuntamiento con respecto a la normal con el Sol, recogiendo la luz proveniente del elemento principal de concentración en una superficie más amplia y focalizándolo en la célula. Asimismo, también permiten homogeneizar la luz sobre la superficie de la célula, efecto beneficioso ya que aumentamos la eficiencia de la célula debido a una mejora del factor de forma de la curva característica de la misma, además de evitar posibles daños irreparables como consecuencia de la aparición de puntos calientes.

Al igual que los concentradores primarios, los SOE pueden ser de tipo refractivo o reflexivo.

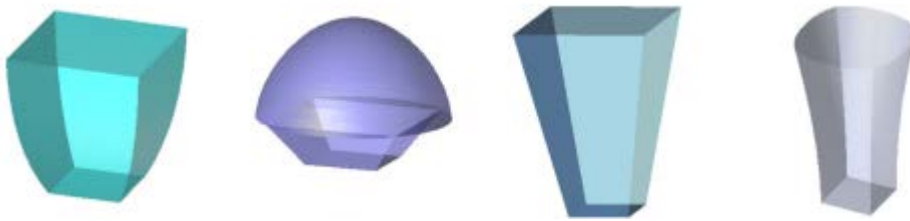


Ilustración 4.5. Diferentes diseños de SOE. Fuente [11]

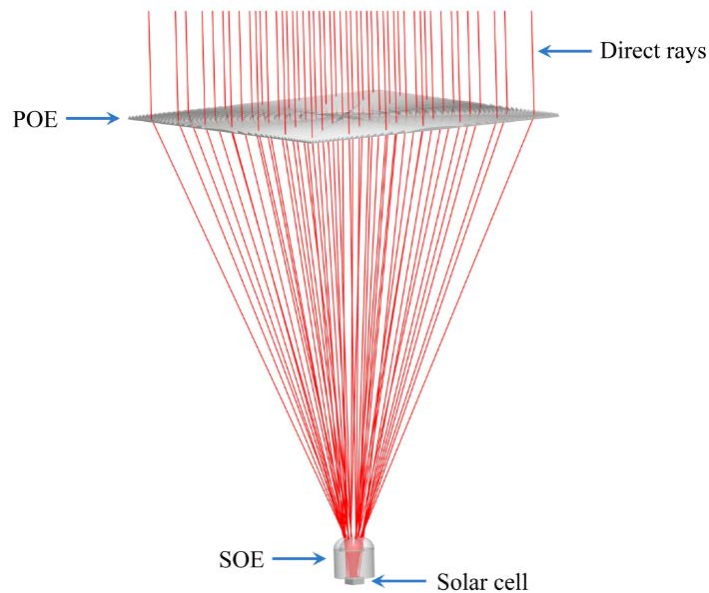


Ilustración 4.6. Módulo de concentración con elementos primarios y secundarios. Fuente [12]

4.2.3. Estructura externa

Caja que protege los elementos del módulo contra los agentes externos, además de dar forma, resistencia y consistencia al módulo.



Fotografía 4.2. Sistema fotovoltaico de concentración de la marca Isofotón.

4.3. Situación actual

La energía fotovoltaica de concentración se encuentra actualmente en una fase de investigación y perfeccionamiento. Tiene que competir con innumerables fuentes de energía de origen renovable con un mayor camino recorrido y en fases de desarrollo más avanzadas. Por tanto, su línea de desarrollo reside en conseguir mayores concentraciones efectivas y, por tanto, mayores potencias, a un menor precio, de manera que pueda ser competitiva.

Fundamentalmente, la expansión o no en un futuro cercano de este tipo de tecnología dependerá principalmente de su comparación con la energía fotovoltaica plana convencional. El balance entre potencia entregada y coste bajo un mismo horizonte de tiempo marcará la elección de una tecnología u otra.

Actualmente, se da la situación de que los sistemas fotovoltaicos tradicionales se han popularizado en gran medida, lo que los hace un duro competidor. Esto ha sido provocado principalmente por los siguientes factores:

- Abaratamiento por economía de escala: El aumento de la producción de células fotovoltaicas convencionales de Silicio reduce enormemente su coste unitario provocando que su precio de venta disminuya.

- Mejora de su eficiencia: Aunque las células de Silicio no son capaces de alcanzar las eficiencias de las caras células multiunión, consiguen unos rendimientos más que aceptables en el caso de las de tipo monocristalino (llegando al 20 %). [13]
- Aumento de vida útil: Un sistema fotovoltaico convencional es capaz de alcanzar hoy en día una vida útil aproximada de 20/25 años sin producirse mermas considerables en su rendimiento.

Por tanto, para la expansión de la energía solar fotovoltaica de alta concentración, ésta debe de luchar contra las ventajas que presenta la energía fotovoltaica tradicional.

Para ello, las líneas de actuación se deben de basar en la mejora de la relación potencia entregada – coste por año de vida útil.

Parte de esta mejora radica en el aumento de las eficiencias de las células fotovoltaicas. En esta tecnología se usan células fotovoltaicas de alta eficiencia. Las más extendidas y que están siendo un punto clave de investigación en la actualidad son las células multiunión. Este tipo de células posee una eficiencia mucho mayor a las convencionales, debido principalmente a que son más sensibles al espectro de la luz solar. Las más comunes estas están compuestas de tres capas superpuestas (comúnmente llamadas TOP, MIDDLE y BOTTON), cada una de las cuales es sensible a una cierta longitud de onda, permitiendo captar la mayor parte de la energía solar.

Otro punto de evolución se encuentra en el desarrollo de elementos y sistemas ópticos que alcancen mayores concentraciones.

Por último, la consecución de un aumento de la vida útil de estos sistemas junto con unos costes de mantenimiento y explotación reducidos resulta clave para mejorar este balance potencia entregada – coste por año de vida útil. Esto tiene su hándicap en la duración de los elementos ópticos y en cómo sus rendimientos se ven afectados por el paso del tiempo debido a los agentes externos.

Anteriormente, hemos visto que uno de los objetivos a conseguir en el campo de la concentración fotovoltaica era la consecución de sistemas fotovoltaicos que presenten cada vez una mayor concentración efectiva. Sin embargo, existen ciertas limitaciones que nos impiden alcanzar los grados deseables de concentración, tanto en sistemas de tipo refractivo como reflexivo.

Los concentradores de tipo reflexivo (lentes Fresnel) presentan problemas para concentrar la luz en un punto minúsculo. Esto es debido principalmente al fenómeno de las aberraciones cromáticas, además de las pérdidas de luz existentes en los diferentes elementos ópticos (Absorción, reflexión, etc.). Esto provoca que estos elementos ópticos no sean capaces de alcanzar concentraciones efectivas superiores 1100 soles. [14]

Sí que se pueden alcanzar mayores concentraciones con los elementos de tipo reflexivo (espejos), que no presentan este inconveniente. Sin embargo, para alcanzar altas concentraciones se requiere de espejos muy grandes, los cuales resultan difíciles y caros de fabricar. [14]

A continuación, se explica el fenómeno de las aberraciones cromáticas presente en las lentes.

Aberraciones cromáticas

En óptica, la aberración cromática es un tipo de distorsión óptica provocada por la imposibilidad de una lente para enfocar todos los colores en un único punto de convergencia. [15]

Es decir, el índice de refracción del material del que están hechas las lentes varía con la longitud de onda y, en consecuencia, ocasiona una importante aberración cromática que limita la concentración alcanzable. [16]

De esta manera, se obtiene un foco de cierto tamaño disgregado por colores, que corresponden a las diferentes longitudes de onda.

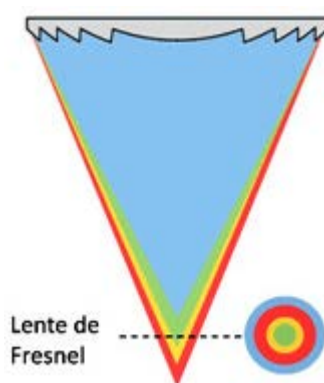


Ilustración 4.7. Aberraciones cromáticas. Fuente [17]

5. Idea inicial

Una vez introducidos en la materia de la energía solar fotovoltaica de alta concentración, procedemos al objetivo principal de este trabajo.

Como dijimos anteriormente, los sistemas fotovoltaicos de concentración buscan mejorar la relación potencia – coste por año de vida útil. Es decir, aumentar la eficiencia y rentabilidad de un módulo.

Por tanto, la idea que da origen a este trabajo persigue la consecución de un módulo fotovoltaico de alta concentración capaz de alcanzar concentraciones efectivas muy elevadas, logrando de esta manera altas potencias

Esta idea consiste en recoger y dirigir por medio de cables de fibra óptica la luz proveniente de varias lentes de Fresnel hacia una sola célula solar multiunión. De tal manera, vamos a ser capaces de conseguir una concentración geométrica muy elevada.

Concretamente en el prototipo propuesto se usarán 4 lentes Fresnel de $135 \times 135 \text{ mm}^2$ y una de $130 \times 130 \text{ mm}^2$ colocadas en cruz, siendo la central la de menor tamaño. Aunque lo ideal sería usar 9 lentes que aprovechen la superficie cuadrada que tenemos de manera más eficiente, (llegando más radiación solar a la célula y obteniendo un mayor rendimiento de ella) por razones logísticas se usarán 5. No obstante, los resultados obtenidos al final del trabajo serán igualmente válidos y suficientemente determinantes y concluyentes. Estas 5 lentes concentrarán, teóricamente, la energía solar de una superficie de 89.800 mm^2 ($4 \times 135 \times 135 \text{ mm}^2 +$

1 x 130 x 130 mm²) sobre una sola célula de 5,5 x 5,5 mm². Por tanto, tendríamos la siguiente concentración geométrica:

$$C_{Geométrica} = \frac{A_{Lentes}}{A_{Célula}} = \frac{89.800}{5,5 \cdot 5,5} = 2.969 \text{ soles}$$

Evidentemente, esta alta concentración geométrica nunca se traduce en concentración efectiva debido a la existencia de cantidad de pérdidas de energía en cada uno de los elementos de los que consta el sistema. En nuestro módulo estas pérdidas estarán muy acentuadas debido a la cantidad de elementos de los que consta el conjunto, aunque por ahora, no nos centraremos en eso.

En resumen, la idea inicial consta principalmente de los siguientes elementos:

- 4 lentes Fresnel cuadradas de 135 mm de lado y una, también cuadrada, de 130.
- 5 cables de fibra óptica.
- Célula solar multicapa de alta eficiencia.

En la ilustración 5.1, podemos ver a modo de esquema un diseño aproximado de la idea inicial, donde se representan los elementos principales antes enumerados.

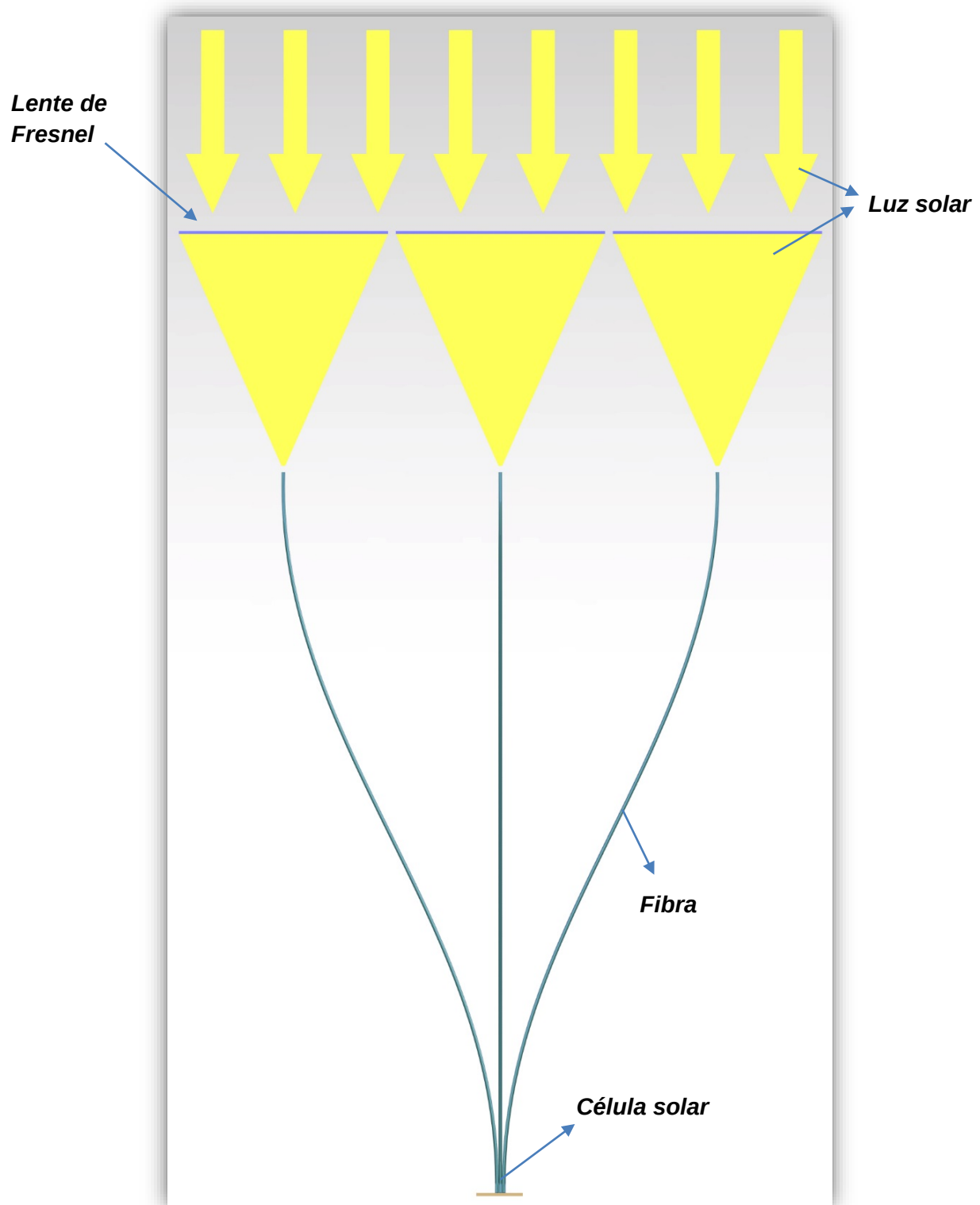


Ilustración 5.1. Esquema idea inicial.

La distribución final de la luz sobre la célula solar quedaría aproximadamente de la siguiente manera:

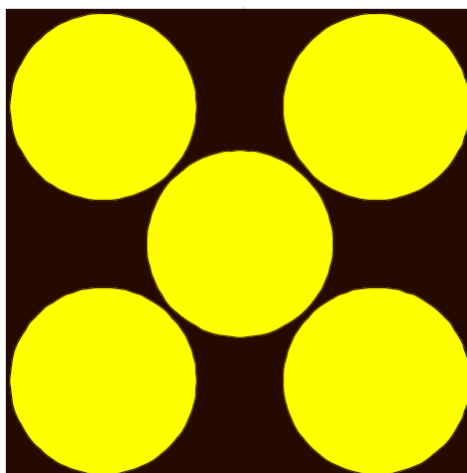


Ilustración 5.2. Luz incidente sobre la célula.

La idea parece clara y concisa a simple vista. Pero tiene una gran cantidad de aspectos que se deben de tener en cuenta a la hora de realizar un diseño adecuado. Habrá que tener en cuenta las características de los elementos, su comportamiento, etc.

Al final de la fibra se produce el fenómeno de que la luz, al salir de la misma se expande. Esto se debe a que los rayos de luz en su interior cuando circulan a través de la misma no llevan una dirección paralela a la misma, sino que van continuamente chocando con las paredes. Esto provoca que los rayos, cuando se acaba la fibra, salen despedidos con el ángulo que adquirieron en el último choque. Debido a esto, el final de las fibras se deberá de colocar muy próximo a la célula, pero sin llegar al punto de tocarla ya que esta es muy sensible y puede dañarse con el mínimo contacto.

Más adelante habrá que tener en cuenta aspectos como rendimiento total del módulo, profundidad del mismo, etc., ya que son aspectos importantes a considerar en el diseño de un módulo fotovoltaico.

6. Diseño del módulo fotovoltaico

Para realizar el diseño del módulo será necesario tener en cuenta cada uno de los elementos principales de los que consta el mismo expuestos en la idea inicial. Se deberá de analizar cada elemento para que pueda encajar adecuadamente en el conjunto del módulo. Con analizar, nos referimos a estimar su rigidez, elasticidad, resistencia, etc. así como establecer sus dimensiones exactas, de manera que no se nos escape detalle alguno a la hora de la posterior construcción del módulo. Además, también es necesario conocer cómo se comportan los materiales ante diferentes agentes externos y, por supuesto, el comportamiento exacto de la luz en los diferentes elementos ópticos que componen el diseño.

Aparte de esto, para que el diseño sea útil a la hora de su posterior fabricación, deberemos de considerar las herramientas puestas a nuestra disposición. Con herramientas queremos decir tanto materiales como técnicas y procesos de fabricación.

En la parte de diseño, haremos uso de softwares de dibujo paramétrico que permitan realizar modelos a ordenador del diseño para su mejor valoración durante todo el proceso.

Como ya se dijo anteriormente, el módulo constará de los siguientes elementos principales:

- 4 lentes Fresnel cuadradas de 135 mm de lado y una de 130 mm.
- 5 cables de fibra óptica.
- Célula solar multicapa de alta eficiencia.

A estos hay que incluir los demás elementos que forman el módulo:

- Estructura.
- Placa superior de sujeción de lentes.
- Placa media para acoplamiento del comienzo de las fibras.
- Pieza de fijación de la célula solar.

- Piezas de ajuste de las fibras (comienzo y final).

Ya hemos visto todos los elementos que engloban el diseño. A continuación, se detalla el diseño de cada uno de ellos.

6.1. Fibras

Contamos con una fibra óptica de alta calidad cuyo núcleo es de sílica fundida. El material en cuestión presenta muy buena calidad óptica, debido principalmente a su alta transmisividad. Sin embargo, no podemos decir lo mismo de su apertura numérica.

Definimos la apertura numérica (AN) de un sistema óptico como un número adimensional que caracteriza el rango de ángulos para los cuales el sistema acepta luz. [18]

Según la hoja de características proporcionada por el fabricante la fibra posee una apertura numérica de $0,37 \pm 0,02$, equivalente a una aceptación angular de 43° , siempre y cuando la longitud sea inferior a 2 metros. Esta característica resulta un inconveniente para el módulo ya que provoca numerosas pérdidas a la entrada, puesto que parte de los rayos no son aceptados al incidir demasiado oblicuos a la superficie de la fibra.

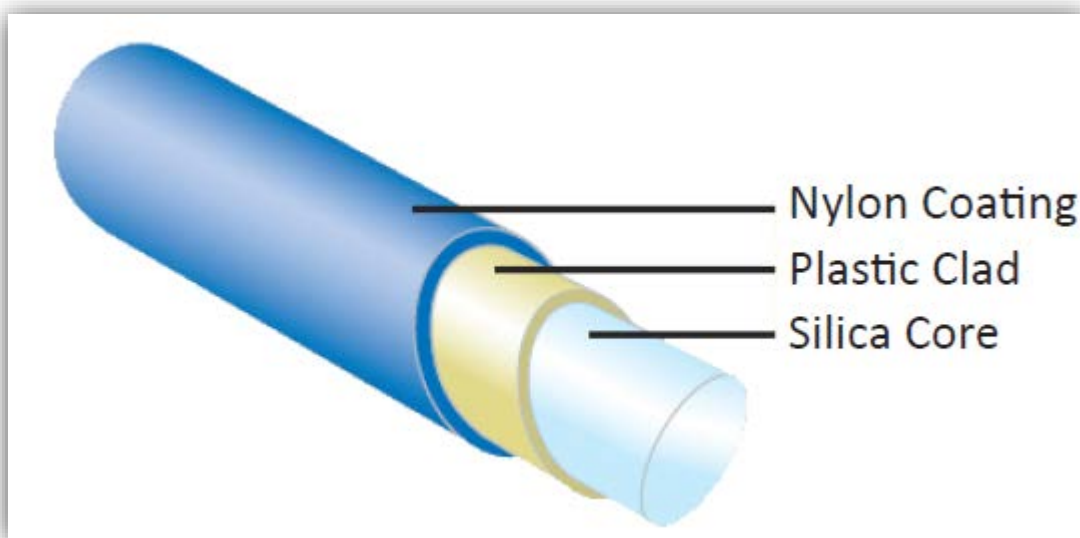


Ilustración 6.1. Estructura de la fibra óptica.

De cara al diseño, debemos de considerar su diámetro. Aunque el diámetro de la sílica fundida es de 2 mm, el recubrimiento hace que éste aumente. El diámetro total de la misma es por tanto de 2,3 mm contando todas las capas.

Otro aspecto a considerar es su flexibilidad. Se puede comprobar al primer contacto que se trata de un material bastante rígido y poco flexible. Por tanto, deberemos de tener cuidado a la hora de elegir la distancia entre el foco y la célula, que nos servirá para obtener posteriormente las dimensiones de la estructura.

Por un lado, si observamos la idea inicial, se debe de salvar una distancia horizontal en el recorrido de la fibra, lo que significa que esta, en su recorrido, deberá de realizar una curva. Debido a su poca elasticidad, esta curva no puede ser demasiado pronunciada puesto que el material rompería.

Por otro, sabemos que la fibra, como elemento óptico, posee unas pérdidas de luz que serán mayores cuanto mayor sea la longitud de la misma. Debido a esto, esta deberá de ser lo más corta posible, siempre y cuando sea capaz de realizar la curva desde el foco de las lentes de los extremos hasta el centro sin que pueda llegar a fracturarse. Por tanto, habrá que alcanzar un equilibrio entre la longitud y la rigidez que permita unas pérdidas lo más pequeñas posibles sin comprometer la integridad de la costosa fibra.

Finalmente, tras analizar el material de la fibra y realizar varias pruebas a mano, se llega a la conclusión que la longitud óptima en cada una de las fibras correspondientes a los focos de las lentes de los lados será de unos 40 cm, lo que significa una distancia vertical de 35 cm entre el foco y la célula.

Por último, destacar el comportamiento de la luz al final de la fibra. A lo largo de la misma, la luz va rebotando por las paredes con un cierto ángulo. Esto provoca que, a la salida, los rayos hayan adquirido cierto ángulo, por lo que la luz se expande. Por tanto, será necesario que la célula esté prácticamente pegada a las fibras para evitar pérdidas de luz por los lados.

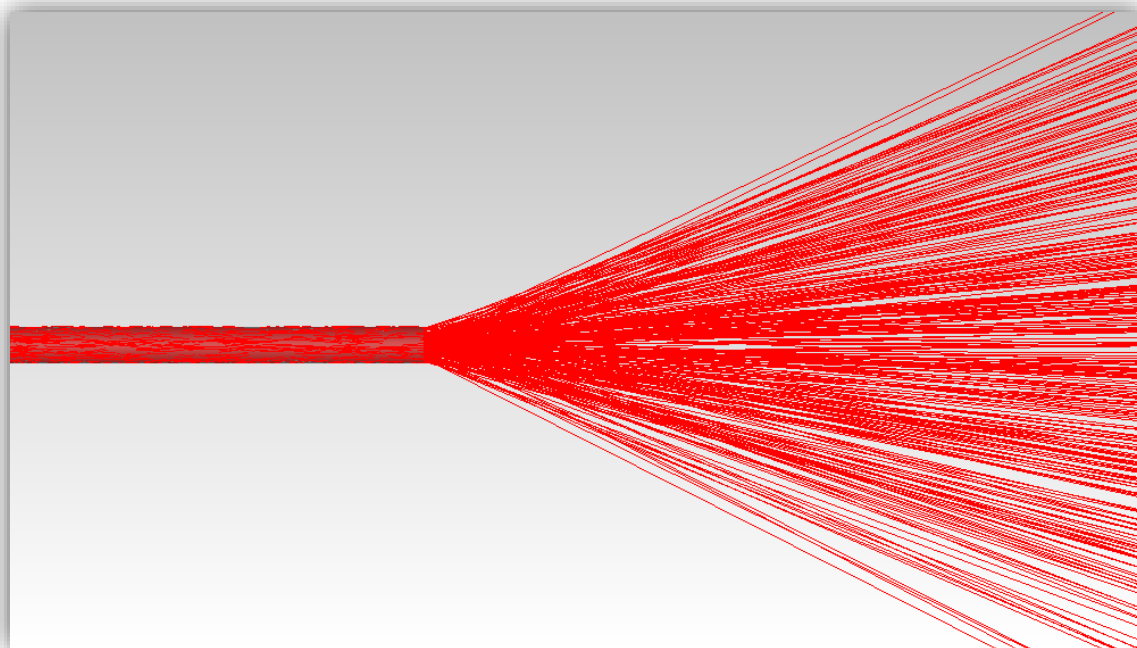


Ilustración 6.2. Simulación de la salida de la luz en la fibra óptica.

6.2. Lentes

En cuanto a las lentes deberemos de analizar principalmente sus dimensiones. Las lentes puestas a nuestra disposición se tratan de lentes de Fresnel cuadradas de PMMA cuyas dimensiones son de 135 x 135 mm de superficie y un espesor de 1,8 mm.

Además, como se puede observar la lente no posee ningún marco de sujeción, es decir, toda el área del elemento es efectiva. Por tanto, a la hora de sujetarlas o acoplarlas a la estructura tenemos dos opciones:

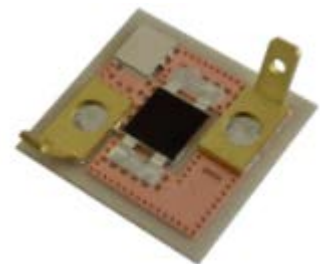
- Servirnos del mínimo espesor que tienen para que, haciendo presión a ambos lados de la lente, éstas queden fijas.
- Usar una parte mínima útil de la lente como marco.

Debido a la complejidad que entrañaría la primera opción, se optó por la segunda, aunque se esté comprometiendo parte del rendimiento de la lente.

6.3. Célula solar

El módulo irá provisto de una célula de triple unión de la marca AZURSPACE (modelo 3C42A) cuya composición es GaInP/GaInAs/Ge. Fosforo es sustrato de Ge. Puesto que el medio por el que se transmite la luz en el módulo será la sílica fundida de la fibra, la célula será del tipo MC/Glass. Esto quiere decir que está optimizada para concentraciones medias (500x aproximadamente) y para medios de transmisión de la luz tipo cristal.

Como dato a considerar para el diseño nos centraremos en sus dimensiones. También debemos de tener en cuenta que se trata de una pieza muy delicada que puede dañarse con facilidad con cualquier golpe o roce. Por tanto, debe de ir bien fijada en el módulo y de tal manera que se eviten daños durante la manipulación del módulo.



Fotografía 6.1. Célula solar de triple unión. Fuente [19]

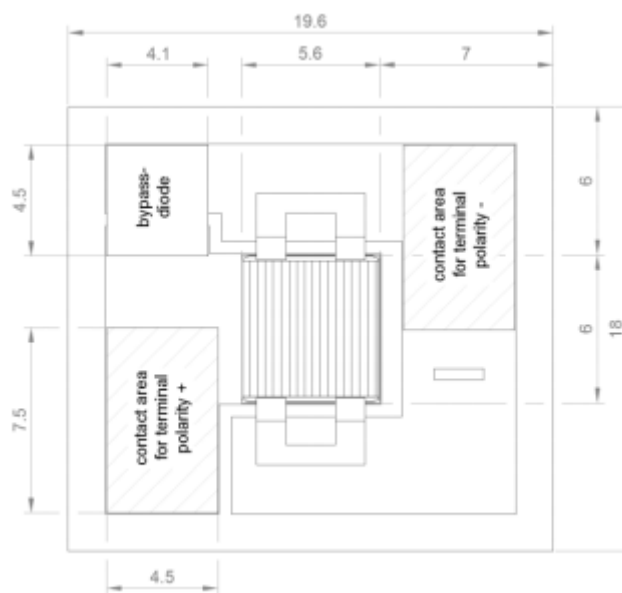


Ilustración 6.3. Dimensiones de la célula solar. Fuente [19]

Las características de la célula solar vienen detalladas en la tabla 6.1.

Sun Concentration	I_{sc} [A]	V_{oc} [V]	I_{MPP} [A]	V_{MPP} [V]	P_{MPP} [W _{MPP}]	FF [%]	D [%]
Version MC/Glass Grid optimized for medium concentration + Antireflective Coating adapted to glass							
X 250	1,15	3,07	1,13	2,81	3,18	90,1%	41,7
X 500	2,31	3,10	2,27	2,80	6,35	88,7%	41,6
X 1000	4,61	3,13	4,52	2,71	12,24	84,8%	40,1

Tabla 6.1. Características de la célula solar. Fuente [19]

6.4. Placa superior

En la parte superior del módulo deberán de ir colocadas las lentes de Fresnel. Habrá que diseñar, por tanto, una placa donde se puedan fijar las lentes y que se pueda acoplar en la futura estructura del módulo.

Esta parte no deberá ser especialmente resistente, ya que no va a soportar esfuerzos, salvo el del peso propio más el de las lentes. Eso sí, ha de asegurarse que la superficie de la placa sea totalmente plana para que los rayos incidan perpendicularmente a las lentes. Por tanto, se trata de un elemento bastante simple y sencillo de diseñar.

Como se comentó anteriormente, la sujeción de las lentes se realizaría usando como marco una pequeña parte de la sección útil de las mismas. Por tanto, bastará con dotar a la placa con huecos cuadrados con un pequeño escalón que permitan el perfecto acople de las lentes.

Adicionalmente, esta placa también deberá de disponer de algún sistema para fijarla a la estructura. Para tal propósito se dotó a la misma con un agujero en el centro de cada lado (alargado, para tener cierto margen a la hora de fijarlos), de tal manera que con un conjunto tornillo – tuerca es posible fijar la placa. Señalar que se trata de una tuerca especialmente diseñada para un tipo de perfiles que son los que usaremos para la construcción de la estructura, la cual se detallará en los párrafos siguientes.



Fotografía 6.2. Conjunto tornillo – tuerca para fijar la placa a la estructura

Teniendo en cuenta las dimensiones de las lentes, su disposición en la superficie (en forma de cruz), que se necesita unos milímetros de separación entre ellas y la zona de la superficie de la placa usada para la fijación a la estructura, las dimensiones de la placa serán de 457 x 457 mm².

Finalmente tendríamos un diseño de la placa como el que se muestra en la ilustración 6.4.

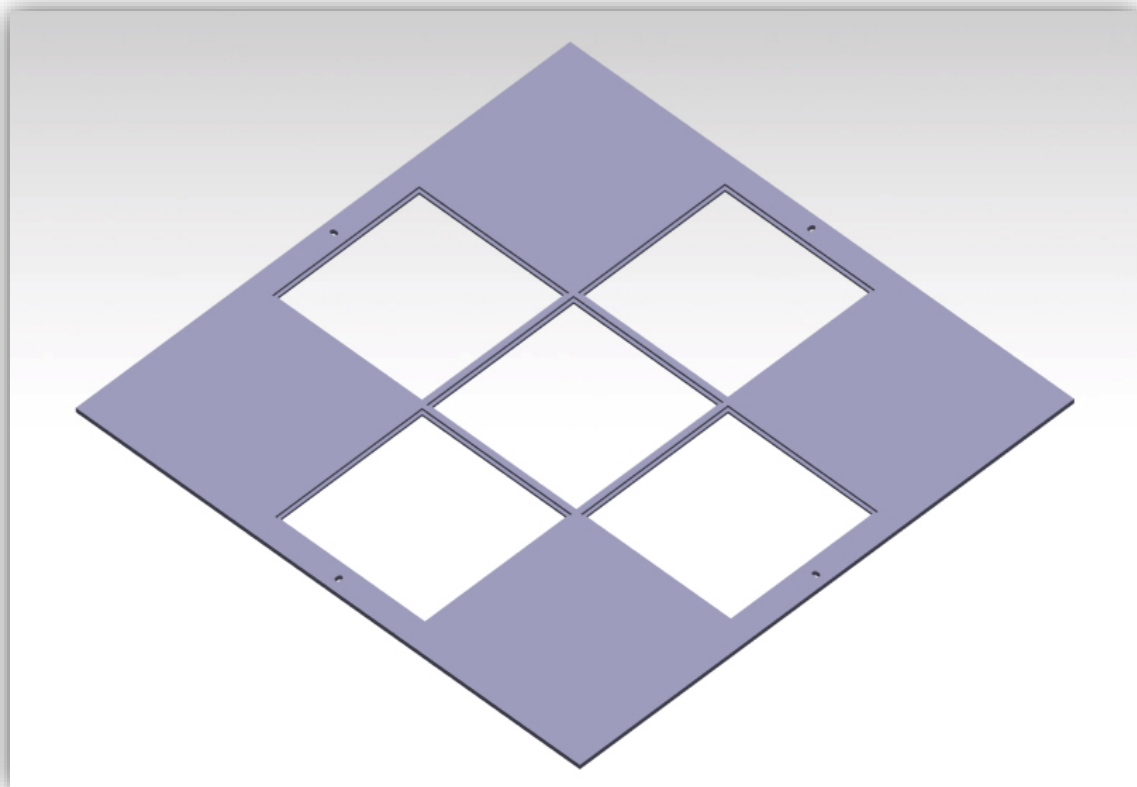


Ilustración 6.4. Placa superior.

En cuanto al material, la necesidad de abaratar este primer diseño, hizo que se eligieran materiales de baja calidad y poco resistentes a altas temperaturas para gran parte del módulo. En este caso un tipo de contrachapado de precio reducido. Por tanto, nos encontramos con la imposibilidad de realizar ensayos a sol real debido al alcance de altas temperaturas en zonas donde las lentes concentran la radiación.

6.5. Estructura

Una vez tenemos las dimensiones aproximadas de las partes fundamentales del módulo, el primer paso consistirá en darle forma y solidez, es decir, en la planificación de una carcasa o estructura externa donde puedan quedar acoplados todos los elementos en armonía y que garantice una resistencia y robustez adecuada al uso del módulo. Se deberá de elegir los materiales a usar para la construcción del mismo, así como valorar los métodos de preparación y conformado de esos materiales.

Primeramente, valoramos los materiales que están a nuestro alcance, de manera que podamos evaluar si resultan útiles para nuestro propósito.

Para prototipos rápidos y diseños de módulos para pruebas se suele dejar a un lado la estética. Además, puesto que no va a estar expuesto a condiciones reales o agentes externos (temperaturas extremas, viento, partículas, etc.) y se requiere una manipulación continua del interior para la realización de las simulaciones, el módulo no constará de una carcasa completa que recubra todo el conjunto. Por tanto, bastará con una estructura formada por los perfiles (sin superficies laterales), que sean capaz de proporcionar solidez y resistencia al módulo.

Un material comúnmente usado en campo de investigación de la energía solar fotovoltaica de concentración en la realización de pequeñas estructuras para módulos suele ser el Aluminio. Dado el tamaño de nuestro módulo, unos perfiles de aluminio de sección $20 \times 20 \text{ mm}^2$ serán más que suficiente para dotar a nuestro módulo de la resistencia requerida.

El grupo de investigación de la universidad de Jaén, CEAEMA, suele trabajar con este tipo de perfiles, por lo que nos serán de fácil acceso. El perfil, con todas sus medidas y dimensiones se muestra a continuación:

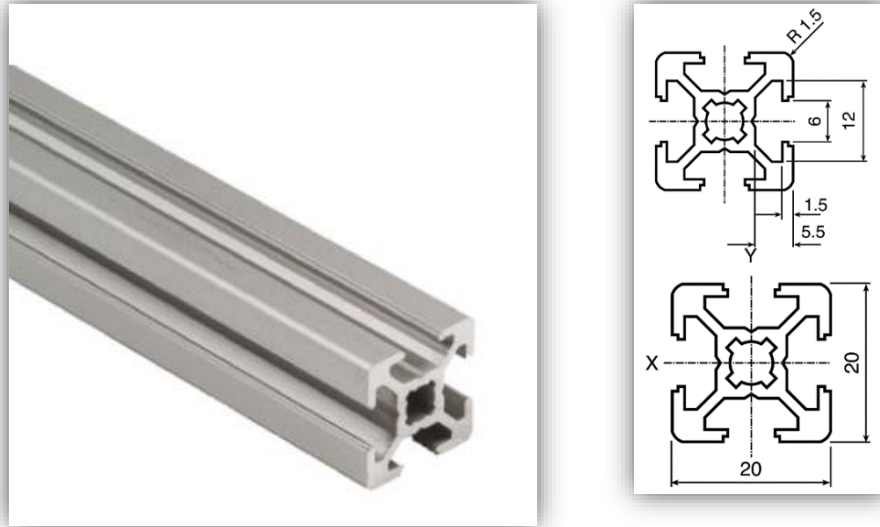


Ilustración 6.5. Perfil de aluminio 20 x 20 mm.

Como se aprecia en la ilustración 6.5, los perfiles están dotados de unos raíles en cada cara, así como un orificio interior, que permiten, mediante otros complementos puestos a disposición del usuario por el mismo fabricante (fotografías 6.2 y 6.3), el ensamblaje de los perfiles en un conjunto estructural.



Fotografía 6.3. Complementos para ensamblaje de

En la ilustración 6.6, se muestra el diseño de la estructura.

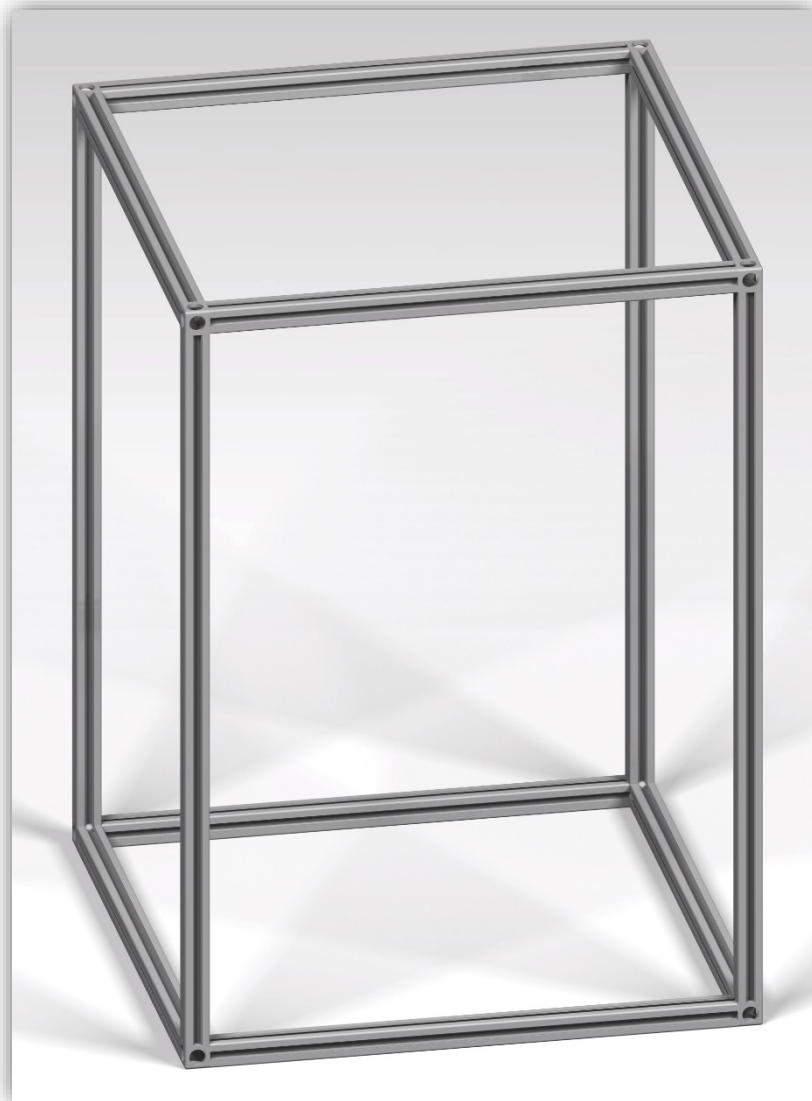


Ilustración 6.6. Diseño de la estructura del módulo.

Esta consta de:

- Perfiles horizontales: Forman las caras superior e inferior de la estructura. Sobre ellas irán colocadas las lentes y la célula solar, respectivamente.
- Perfiles verticales: Dan la altura requerida al módulo.

Teniendo en cuenta la distancia focal de las lentes, su sección y dimensiones tras el posicionamiento de las fibras, podemos realizar una estimación bastante

precisa del tamaño de la estructura y, por tanto, de la longitud de los perfiles que la van a formar. Los perfiles tendrán las siguientes dimensiones:

Perfiles horizontales:

Ya se vio anteriormente la disposición de las lentes en la placa superior. Teniendo en cuenta esta disposición y dimensiones teníamos una superficie cuadrada de 2088,49 cm² (incluyendo la zona para la fijación) que debemos de acoplar a la estructura, es decir, 457 mm de lado. Por tanto, restando a la longitud del lado las dimensiones de los dos cubos de la unión (20 mm + 20 mm) tenemos una longitud del perfil de 417 mm.

Tanto los perfiles horizontales superiores como los inferiores (8 en total), como es obvio para que la estructura se pueda cerrar, tendrán las mismas dimensiones.

Perfiles verticales:

Para estimar su longitud deberemos de tener en cuenta la distancia focal de las lentes y dimensión en eje z de las fibras. Estas dimensiones no van a ser exactas por lo que se deberá aumentar la longitud es estos perfiles unos pocos centímetros para permitir cierto margen a la hora del montaje del módulo. La altura del módulo será la suma de la distancia focal (152 mm), la dimensión en el eje z de las fibras (350 mm) y el margen antes comentado (40 mm). Para obtener la longitud de los perfiles se ha de restar a dicha medida los 40 mm de lado de los cubos que sirven de unión en las esquinas. Por tanto, la longitud total de cada uno de los cuatro perfiles verticales será de 502 mm.

6.6. Placa media

La estructura dispondrá de otra placa en la zona intermedia que coincide en la distancia focal de las lentes, aproximadamente a unos 15 cm. En esta placa se fijarán los comienzos de las fibras ópticas mediante piezas especialmente diseñadas al caso que se explicarán más adelante.

La placa poseerá unos huecos por donde pasará la fibra. También dispondrá de unos raíles cuya función se explicará posteriormente. Las esquinas estarán recortadas

con la forma de los perfiles verticales para que se adapte a la forma del interior de la estructura.



Fotografía 6.4.
Complementos para la fijación de la placa media.

Como ocurre con la placa superior, esta debe de ir anclada a la estructura, por lo que se debe de dotar nuevamente a la placa de agujeros para su fijación. En este caso la placa se debe de fijar a los perfiles verticales de la estructura.

Así, como solución se optó por realizar dos agujeros (alargados para permitir cierto margen a la hora de realizar la fijación) en las esquinas, de manera que con la pieza que se muestra en la fotografía 6.4 pueda fijarse la placa a cada uno de los cuatro perfiles verticales o columnas de la estructura.

Al igual que ocurría en la placa superior, esta placa estará fabricada en contrachapado.

El diseño final de la placa quedaría tal y como se ve en la ilustración 6.7.

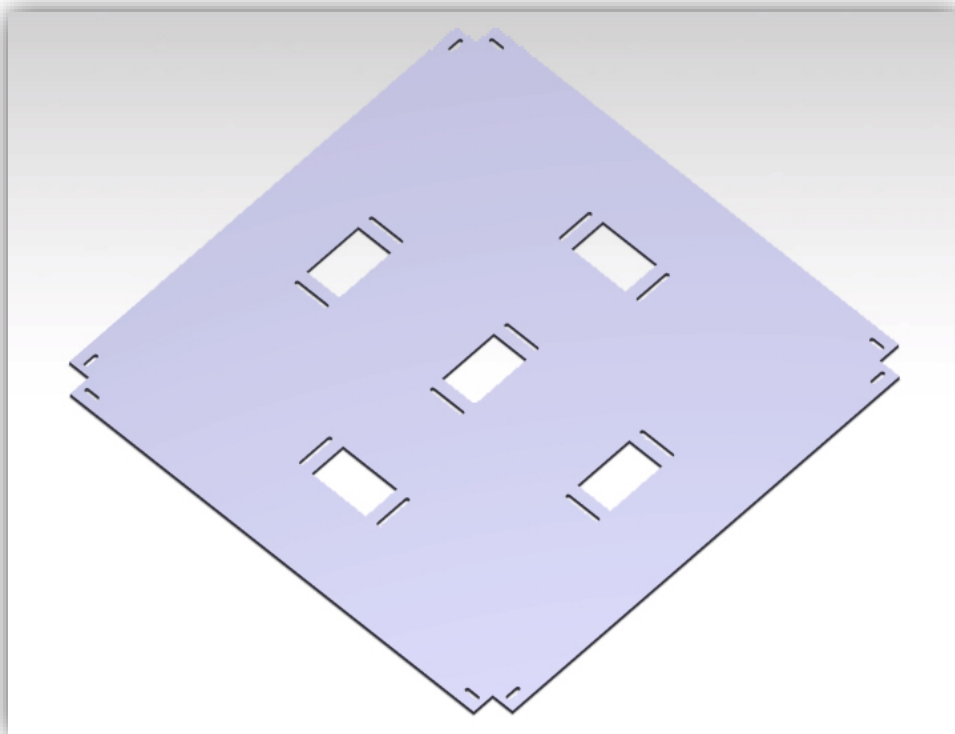


Ilustración 6.7. Placa media.

6.7. Piezas varias

En este apartado se expondrán las piezas restantes que, aunque menos voluminosas, son igual de esenciales para la construcción del módulo y su funcionamiento.

6.7.1. Piezas ajuste de fibra en el foco

Por mucha precisión que tengamos en los medios de fabricación de las piezas anteriores, nunca tendremos total precisión de manera que el foco de las lentes coincida justo en un punto precalculado. Así pues, deberemos de dotar al módulo de unos márgenes de tolerancia en la zona donde se encuentra el foco de las lentes, es decir, donde comienza la fibra. Como sabemos, la fibra debe de ser colocada justo en el centro del foco para permitir un máximo aprovechamiento de la luz.

Para ello, se han diseñado unas piezas que permitirán el ajuste tanto en el eje y como en el x. Se trata de unas piezas planas que se ajustan sobre la placa intermedia del módulo donde incide la luz proveniente de las lentes, y que una vez ajustadas en x e y se fijan con un conjunto tornillo, tuerca y arandela.

La forma de realizar el ajuste consistirá en colocar el módulo correctamente en el simulador solar con la luz de modelado (luz del simulador con una intensidad débil necesaria para la correcta calibración de los módulos a simular) de manera que la luz incida perpendicularmente a las lentes, y ajustar estas piezas (una de ellas provista del mecanismo de sujeción de la fibra) de manera que el foco incida en el punto correcto.

Las piezas a realizar se detallan a continuación:

Pieza para permitir el ajuste en el eje y

Estas piezas se colocarán directamente sobre la placa intermedia. Se ajustarán a ella a través de los raíles de esta placa antes mencionados y se fijará por medio de tornillos a través de los agujeros de esta pieza.

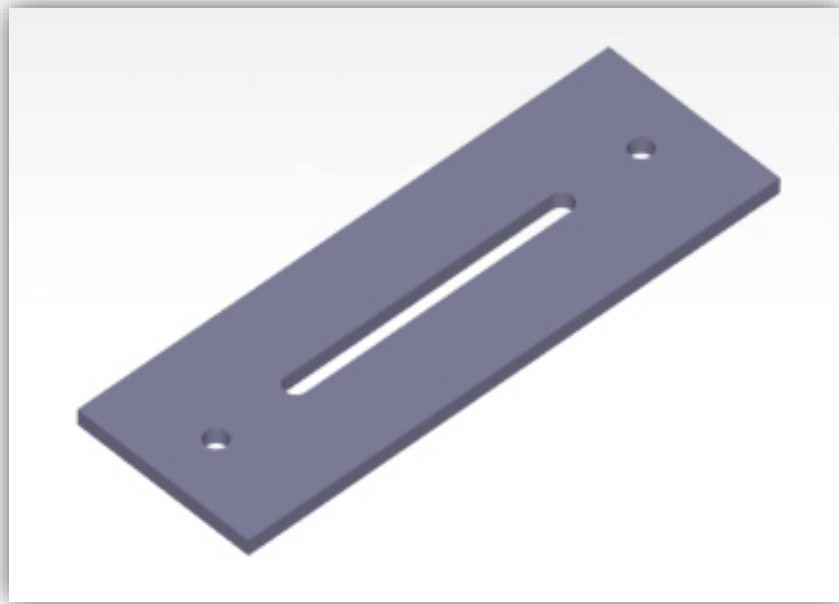


Ilustración 6.8. Pieza para permitir el ajuste en y.

Pieza para permitir el ajuste en el eje x

Irán colocadas sobre la pieza anterior, la cual se observa como dispone de otro raíl. La pieza en cuestión se ajustará en la dirección *x* sobre la anterior y se fijará mediante tornillos a través de los agujeros. A su vez, esta pieza realizará la función de sujeción del cable de fibra óptica a través del tubo saliente con un diámetro interior similar al de la fibra que permite un ajuste perfecto sin holguras.

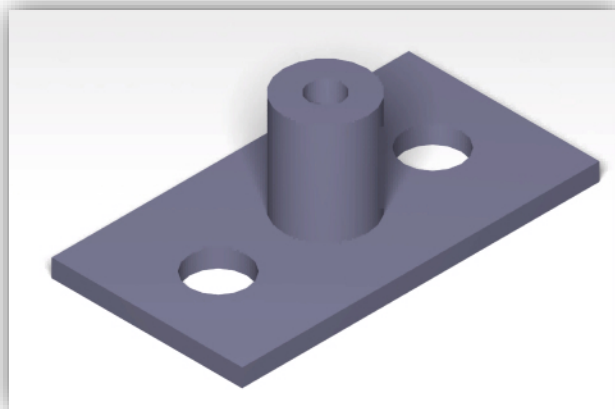


Ilustración 6.9. Pieza para permitir el ajuste en x.

6.7.2. Pieza de sujeción del final de las fibras

Una vez salen las fibras de la placa media, todas ellas deberán de concurrir perpendicularmente en la célula solar. Por tanto, se necesita de una pieza que sea capaz de dar una perfecta sujeción a los cinco finales de las fibras, agrupándolas en una superficie mínimamente menor a la de la célula ($5,5 \times 5,5 \text{ mm}^2$). A su vez, esta debe de acoplarse a la estructura en su base a escasos milímetros de la superficie de la célula por medio de dos tornillos a través de los agujeros existentes en los extremos de la pieza.

Se observa como la pieza dispone de 5 agujeros alargados por los cuales pasarán las fibras estando perfectamente ajustadas y quedando el final de ellas a ras de la superficie inferior de la pieza.

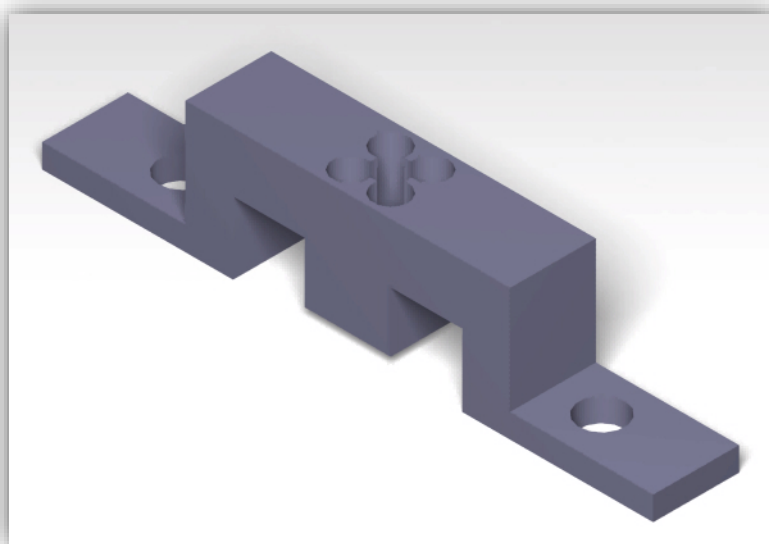


Ilustración 6.10. Pieza de sujeción del final de las fibras.

La fijación a la estructura se realizará por medio de dos tornillos a través de los agujeros existentes en los extremos de la pieza. Esta irá anclada a unos perfiles adicionales (de 417 mm de longitud) que se instalarán en la base de la estructura y sobre los que se acoplará también la pieza con la célula solar.

En la ilustración 6.11, podemos ver cómo quedaría el montaje de dicha parte del módulo.

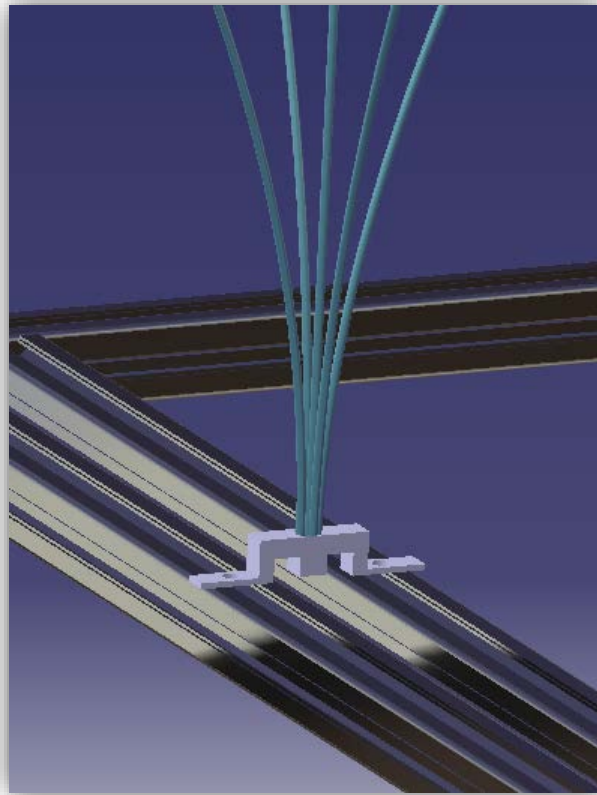


Ilustración 6.11. Encaje en el conjunto de la sujeción del final de las fibras.

6.7.3. Pieza para fijación de la célula solar

Por último, es necesario el diseño de otra pieza donde fijar la célula solar. Esta deberá de tener unas dimensiones acordes a ella y se acoplará a la estructura de manera que la célula quede perfectamente alineada con el final de las fibras y a una distancia mínima de ellas.

Como solución se optó por una pieza que se ajustara desde la parte inferior a los perfiles donde concluyen las fibras.

El diseño de esta pieza se muestra en la ilustración 6.12.

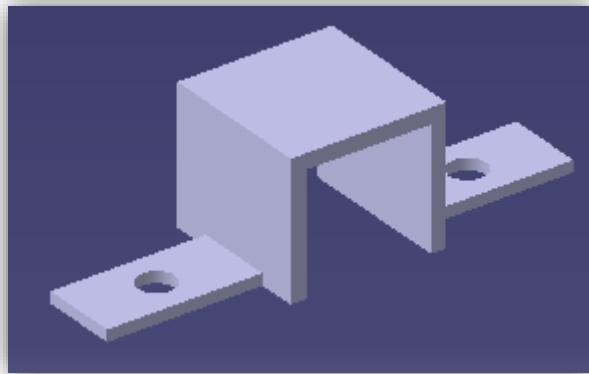


Ilustración 6.12. Pieza para la fijación de la célula solar.

Finalmente, se muestra el emplazamiento de la pieza en el módulo en la ilustración 6.13.

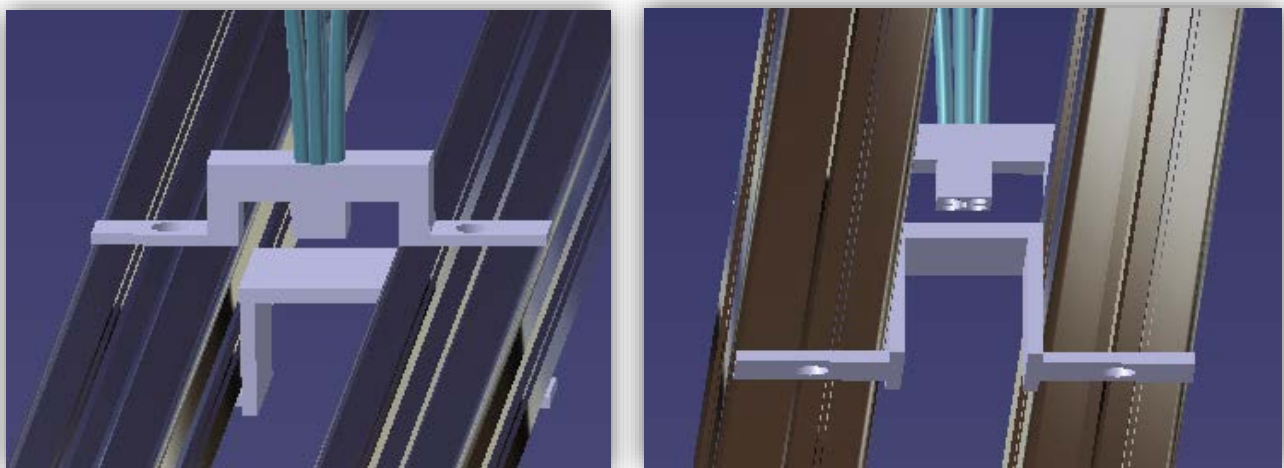


Ilustración 6.13. Encaje en el conjunto de la pieza para la fijación de la célula solar.

7. Fabricación y montaje

Ya tenemos el diseño del módulo, así que el siguiente paso es su fabricación. Ya hemos visto cada una de las piezas de las que consta el módulo, destacando sus características y sus funciones. En función de esto va a ser necesario un método u otro de fabricación. Para su elección deberemos de tener en cuenta tanto la forma del elemento o pieza, el material necesario o simplemente cuál de ellos sea más simple o económico para el propósito de nuestra pieza.

7.1. Métodos de fabricación

Entre los métodos de fabricación usados para la fabricación del módulo se encuentran los siguientes:

- Impresión 3D
- Cortadora láser
- Sierra circular de mesa automática

Además, para la fabricación del módulo es necesario llevar a cabo una serie de trabajos manuales y menos tecnológicos, pero igualmente necesarios para su finalización. Hablamos de diversas tareas realizadas a mano: montaje de estructura, corte de fibras ópticas, atornillado, etc.

7.1.1. Impresión 3D

La impresión 3D es una tecnología de fabricación por adición donde un objeto tridimensional es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material sobre una superficie. [20]

Esta tecnología, relativamente nueva, nos permite fabricar piezas personalizadas de diferentes tipos de plástico. Basta con tener unos conocimientos básicos en algún software de dibujo paramétrico para crear el modelo de la pieza en 3D.

Dentro de la impresión 3D, el modelado por deposición de fundente es la técnica más común y extendida, sobre todo a nivel doméstico. En ella, un filamento de plástico de pequeño diámetro es fundido en el interior de un extrusor y va siendo depositado en una superficie plana donde se solidifica formando las diferentes capas del objeto a crear. La sucesión de una capa sobre otra permite la formación de la pieza.

La tecnología de impresión 3D requiere primeramente el diseño 3D de la pieza a fabricar. Para ello, se hace uso de softwares de dibujo paramétrico, que permiten la creación de objetos 3D con relativa facilidad. Concretamente en nuestro trabajo haremos uso del software Catia V5.

La impresión 3D funciona con microcontroladores fácil de gestionar y programar. Para que el controlador de la impresora realice las órdenes correspondientes para la fabricación de una pieza, es necesario aportarle un archivo de tipo GCODE. Este archivo almacena la secuencia de acciones necesarias que debe de realizar la impresora durante el proceso de fabricación (movimiento de ejes, funcionamiento de extrusor, activación de ventiladores, etc.). Para la creación de este archivo existen interfaces o softwares que crean el código introduciendo el diseño de la pieza en 3D y configurando las características de impresión de manera que sean adecuadas para la fabricación de la pieza en cuestión.

Existen diversos programas capaces de realizar esta función. Uno de los más conocidos y usados es *Cura*, programa que usaremos en este trabajo.

La impresora usada para nuestros procesos de fabricación se muestra en la fotografía 7.1. Esta es del tipo FDM (impresión por deposición de material fundido).



Fotografía 7.1. Impresora 3D.

7.1.2. Corte por láser

El corte con láser es una técnica empleada para cortar piezas planas de pequeño espesor caracterizada por que su fuente de energía es un láser que concentra luz en la superficie de trabajo. Además del corte, el láser permite técnicas de marcado y grabado. Las máquinas de corte por láser admiten una gran variedad de materiales, desde contrachapados de madera hasta ciertos metales. Esto dependerá de las características del láser, principalmente de su potencia.

La máquina dispone de ejes que permiten el movimiento de la boquilla láser en todas las direcciones. En su movimiento sobre la placa, el láser va realizando su función de corte, marcado o grabado, obteniendo finalmente la pieza deseada. Además, dispone de varios ventiladores. Uno de ellos se encarga de refrigerar la zona de trabajo para evitar la aparición de focos de fuego en la pieza sobre la que se está trabajando. El otro funciona como extractor de los humos producidos durante el corte.

Una cortadora láser, trabaja a partir de un archivo de tipo DXF, que es un formato de archivo para dibujos de diseño asistido por computadora. El dibujo, indica las trayectorias a seguir por la boquilla para realizar el trabajo. Adicionalmente, se requiere una configuración de la potencia y velocidad de movimiento que vendrán impuestas en función de la naturaleza del material que se está trabajando. Para materiales altamente resistentes o de un grosor excesivo existe la posibilidad de la realización de diversas pasadas.

Para realizar los trabajos de corte necesarios para la creación del módulo, disponemos del modelo BCN3D Ignis.

La BCN3D Ignis es una máquina de corte, marcado y grabado láser que permite la fabricación de piezas a partir de planchas de distintos materiales plásticos, madera o textiles y composites, y que abarca una amplia superficie de fabricación (Eje x: 900 mm / Eje y: 600 mm / Eje z: 300 mm).



Fotografía 7.2. Cortadora láser.

Utilización y manejo

Una cortadora láser se trata de una máquina cuyo uso entraña cierta complejidad y peligrosidad por lo que será necesario seguir una exhaustiva serie de medidas a la hora de utilizarla.

Los pasos a seguir para la realización de un corte son los siguientes:

- Creación del archivo DXF: Concretamente se usará Autocad para ello. Se creará siguiendo las pautas del manual de usuario de la máquina. Es decir, para la realización de un corte, las líneas deberán de ser de color rojo y con un grosor indefinido. Se deberá de prestar atención a que no existan líneas dobles y que los dibujos sean lo más continuos posible (por ejemplo: hacer un cuadrado con la función cuadrado y no con cuatro líneas).
- Configuración del corte: Introduciremos el archivo DXF en el software compatible de la cortadora (*VisiCut*). Posteriormente seleccionaremos las características adecuadas para el trabajo a realizar:
 - o Tipo de trabajo: Corte, marcado o grabado

- o Potencia
 - o Velocidad
 - o Número de pasadas
- Preparación de la cortadora

Primeramente, encender la cortadora accionando la llave y accionar el extractor.

Posteriormente realizar la calibración en el eje z de la boquilla según el espesor del material con el que se va a trabajar. El haz de láser que permite el corte se concentra en el material por medio de una lente convergente. Por tanto, es necesaria el calibrado para que la luz láser converja en un punto mínimo sobre la superficie del material de manera que el corte sea limpio y fino. El calibrado se realizará de la siguiente manera:

- o Se colocará un dispositivo provisto de un final de carrera junto a la boquilla.
 - o Tras ello, colocaremos el material en la zona de trabajo
 - o Ejecutamos la función de calibrado: La boquilla descenderá lentamente hasta que el final de carrera se accione y posteriormente la boquilla ascenderá hasta situarse a la altura correcta.
- Envío del archivo para realizar el corte y ejecutar el proceso desde los controles de la máquina.
- Una vez terminado el corte, esperar unos segundos antes de abrir la tapa hasta que los humos y vapores producidos sean expulsados.

7.1.3. Sierra circular de mesa automática

Se trata de una máquina provista de una sierra circular que asciende por una ranura situada en la superficie o mesa de la máquina y que corta el material que está situado sobre esa ranura.

Se usará para seccionar elementos alargados como perfiles o láminas de diferentes materiales. A diferencia de la cortadora láser, permite el corte de materiales

más duros y de mayor espesor, aunque todo depende del tipo de disco usado en el corte.

Esta máquina requiere de poca configuración previa. Simplemente, se ha de especificar la velocidad de ascenso del disco. En función del material a cortar esta puede ser mayor o menor. Una velocidad demasiado alta para un material duro podría dañar el disco.

Se trata de una máquina que entraña cierta peligrosidad y, por tanto, se deben de seguir minuciosamente una serie de medidas de seguridad durante su uso.

El modelo de sierra circular usado es similar al que se muestra a continuación:



Fotografía 7.3. Sierra circular de mesa automática. Fuente [21]



Fotografía 7.4. Sierra circular de mesa automática. Fuente [21]

7.2. Proceso de fabricación y montaje

A continuación, se detallará el método y proceso de fabricación para cada parte de las que consta el módulo:

7.2.1. Estructura

Ya se indicó en el apartado anterior el tipo de material que se usaría para la estructura. Ahora, es necesario cortarlo en un tamaño adecuado para la construcción del módulo.

Al tratarse de perfiles de aluminio, el método más adecuado y preciso para su corte por su dureza y forma es la sierra circular de mesa automática.

En el apartado 6.5 vimos que se necesitaban 4 perfiles de 502 mm y 10 perfiles de 417 mm.

El proceso para su corte fue el siguiente:

- Medir y marcar en el perfil el lugar del corte en función de la longitud requerida.

- Colocar el perfil sobre la superficie de la máquina haciendo coincidir la marca anterior con la zona de corte por donde sale el disco y, seguidamente, accionar las pinzas hidráulicas de sujeción.
- Cerrar la tapadera de seguridad y accionar la sierra circular, comenzando así su movimiento giratorio. Tras ello, pulsar los dos botones de los que dispone la máquina para comenzar el ascenso de la sierra.
- Mantener pulsados los botones hasta que se haya seccionado completamente el perfil.
- Tras cada corte lubricar la sierra para evitar daños en la sierra debido a altos rozamientos.

Una vez obtenidos los perfiles, tanto verticales como horizontales, se puede construir la estructura. Ahora, se procederá por medio de técnicas principalmente manuales. Se ensamblarán los perfiles atornillándolos mediante uniones especialmente diseñadas para ellos.



Ilustración 7.5. Componentes para ensamblaje.

Finalmente, obtenemos la estructura que se muestra en las ilustraciones 7.1 y 7.2.

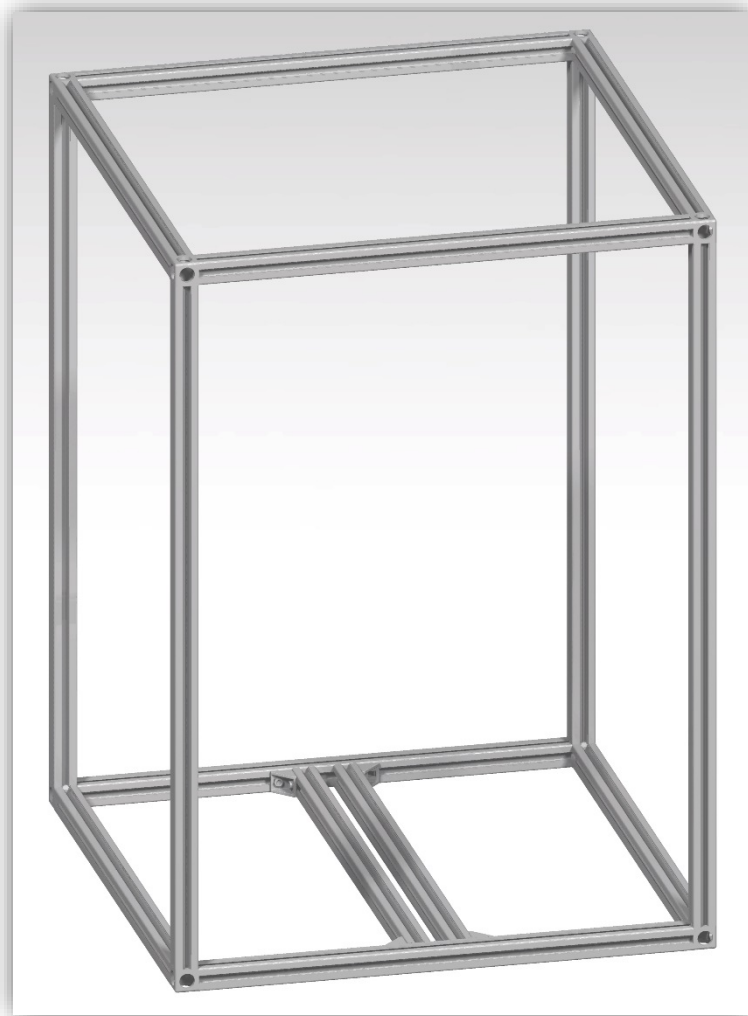


Ilustración 7.1. Estructura.

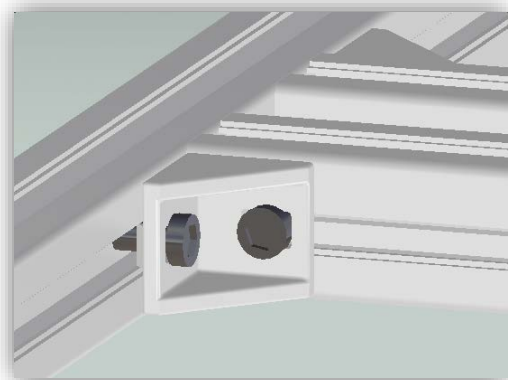


Ilustración 7.2. Uniones dela estructura.

7.2.2. Placa superior y media

La parte superior del módulo irá dotado de unas placas sobre las que irán situadas las lentes de Fresnel. Estas deberán de estar diseñadas y construidas a medida para su acoplamiento.

Ya se comentó anteriormente que el módulo constaría de 4 lentes cuadradas de $135 \times 135 \text{ mm}^2$ y una de $130 \times 130 \text{ mm}^2$, colocadas en forma de cruz. Por tanto, la placa superior constará de 5 huecos cuadrados de la misma sección de las lentes, pero incluyendo un pequeño rebaje de una sección mínimamente inferior de manera que exista un apoyo para las lentes.

Para la realización de esta placa, haremos uso de elementos accesibles y económicos. Concretamente, se empleará unas placas de contrachapado de madera de unos 2-3 mm de espesor.

Para conformarlo, la opción más rápida y precisa será la cortadora láser.

Procedemos ahora con el proceso seguido para la realización de la pieza.

El primer paso será dibujar el perfil del corte en un software adecuado. Usaremos Autocad. En el manual de uso de la cortadora láser se indica el formato y características del dibujo para que pueda ser leído de forma correcta por la cortadora.

Por tanto, en Autocad realizaremos un dibujo con los cortes a seguir con líneas de espesor indefinido y de color rojo, como indican las instrucciones. Finalmente, se guardará en un formato legible por la máquina, en este caso, DXF.

Como ya se comentó anteriormente, en la superficie de arriba del módulo, que estamos realizando por medio de la cortadora láser, irán incrustadas las lentes. Para tal fin, se conformarán dos placas cuyos tamaños de los huecos cuadrados interiores sean diferentes. Así, una vez las tengamos fabricadas podremos unir las con un adhesivo quedando un rebaje donde apoyar las lentes y que, por tanto, queden fijas.

Como toda máquina cuyo uso entraña ciertos riesgos, será imprescindible conocer y llevar a cabo todas las medidas de seguridad de la misma para evitar riesgos innecesarios.

Una vez disponemos de todos los materiales necesarios y del archivo del dibujo del corte, podemos proceder a realizar el corte.

A la hora de realizarlo deberemos de tener en cuenta dos aspectos:

- Material de la lámina que queremos cortar
- Espesor de la lámina

A partir de ahí, se seleccionará la configuración adecuada para el tipo de trabajo que se quiere hacer (corte, marcado, grabado) y características del material citadas anteriormente.

Dentro de la configuración del corte a realizar se deberán de ajustar los siguientes parámetros:

- Velocidad de corte
- Potencia de corte
- Número de pasadas

Decir que previamente, hay que realizar un calibrado del láser en función del espesor de la lámina, de manera que el láser se coloque a una distancia adecuada en el eje z para la realización del corte.

Para la calibración bastará con colocar el material en la zona de trabajo y acoplar una pieza, dotada con un final de carrera, a la boquilla láser. Mediante los comandos en la pantalla de la máquina daremos la orden de realizar el calibrado. En ese momento, la boquilla láser, junto con la pieza antes nombrada, empezarán a descender hasta que el final de carrera se active al topar con la placa de material. Posteriormente, la boquilla ascenderá unos milímetros hasta colocarse a la altura adecuada para realizar un corte limpio.

Dentro del software específico de la cortadora, denominado *VisiCut*, seleccionaremos las características adecuadas para el corte. Muchas veces no se conoce la naturaleza exacta del material, así que los perfiles preconfigurados en el programa no podrían ser adecuados para un perfecto corte. Por tanto, la configuración de parámetros para el corte se basará en un método de prueba y error, en base a una experiencia previa y siempre teniendo en cuenta las potencias usadas y el material en cuestión para evitar la aparición de fuego. En base a los consejos de un experto, se seleccionaron las siguientes características para la realización del corte:

- Tipo: Corte
- Velocidad: 10
- Potencia de corte: 80
- Número de pasadas: 2

Muchas veces se suele aumentar el número de pasadas con el objetivo de evitar que el material no quede cortado totalmente. No obstante, durante el proceso de vigilancia es posible reducir la potencia en las pasadas adicionales si se ve que el corte se ha realizado ya, con el fin de evitar que los bordes de la pieza queden quemados e imperfectos.



Fotografía 7.6. Boquilla láser. Fuente [22]

7.2.3. Lentes

Una vez tenemos fabricada la placa superior y anclada a la parte superior de la estructura, es posible la colocación de las lentes Fresnel. Estas irán simplemente colocadas en su hueco correspondiente, adaptado a ellas, y fijadas con un pegamento aplicado en los bordes.

El hueco central de la placa superior fue construido para una lente de 135 x 135 mm². Sin embargo, la lente que se usará será de menor tamaño debido a que no disponemos de suficientes lentes del tamaño superior. Por tanto, para poder adaptarla se hace necesario la fabricación de un marco sobre el cual se acople la lente y que al mismo tiempo este se encaje en la placa superior.

El diseño del marco se muestra en la ilustración 7.3.

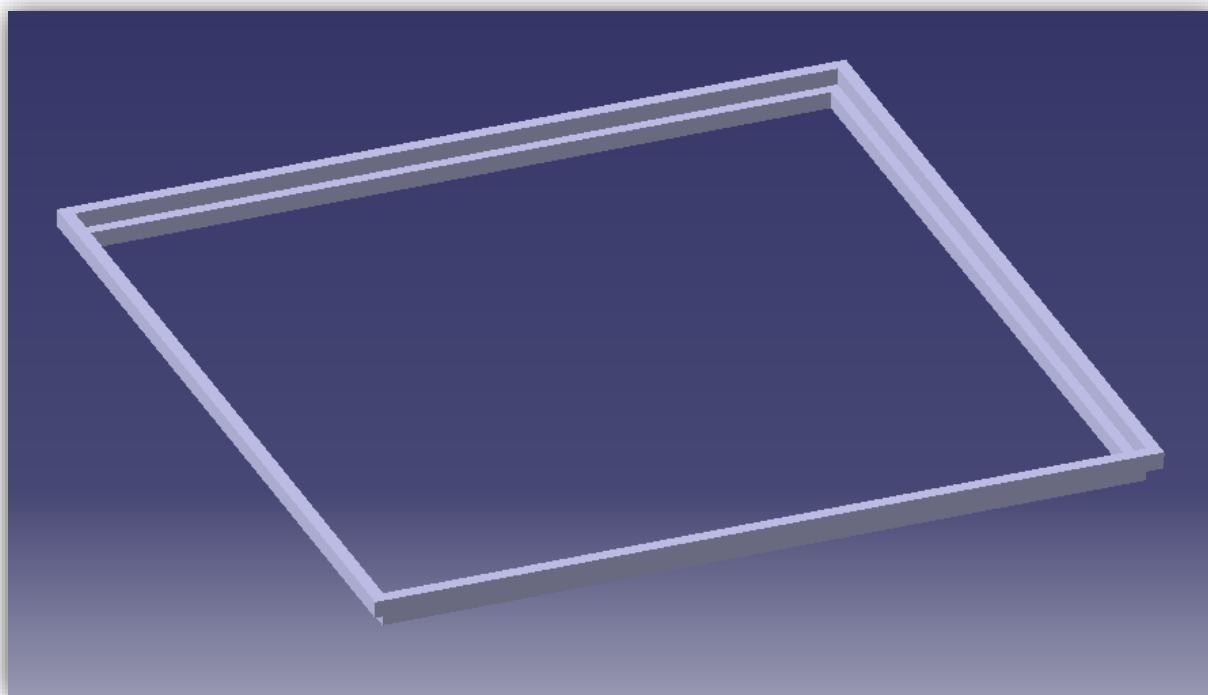


Ilustración 7.3. Marco para lente.

Por las características que debe de presentar la pieza y sus dimensiones, el proceso de fabricación ideal para la misma será la impresión 3D. Su fabricación irá detallada en el apartado siguiente, donde se incide en la fabricación de las piezas de plástico del módulo

7.2.4. Piezas de plástico

Una vez tenemos la estructura y las placas, nos disponemos a la realización de las piezas que sujeten y direccionen la fibra adecuadamente.

Ahora se trata de piezas muy específicas y hechas a medida del módulo para que se puedan adaptar a él y a todas sus partes. Su fabricación, por tanto, requiere de una tecnología que permita la creación de piezas con algo más de complejidad. Esta vez, utilizaremos la tecnología de impresión 3D.

Estas piezas requieren de una solidez considerable, pero tampoco necesitan tener excelentes cualidades en cuanto a resistencia y dureza. Basta con que cumplan adecuadamente su cometido sin romperse ni modificar su forma. Dentro de la impresión 3D tenemos a nuestro alcance numerosos materiales plásticos, cada uno con unas características muy variadas de dureza, flexibilidad, temperatura de fluencia, etc. Para nuestro cometido, el PLA (ácido poliláctico o poliácido láctico) será más que suficiente. Se trata de uno de los materiales más usados en impresión 3D. Posee una resistencia aceptable y, además, es de los más económicos, lo que lo hace muy atractivo para prototipos iniciales de productos. Ya comentamos anteriormente que el módulo no va a ser expuesto a condiciones reales, por lo que se pueden aceptar plásticos cuyo punto de fluencia sea bajo (como es el caso del PLA), ya que en el simulador solar no se alcanzan ni mucho menos temperaturas cercanas al punto de fluencia del material.

Así pues, los siguientes diseños realizados en apartados anteriores, serán fabricados mediante impresión 3D:

- Pieza para permitir el ajuste en eje x de la fibra.
- Pieza de sujeción del final de las fibras.
- Pieza para fijación de célula solar.
- Marco para acople de lente Fresnel más pequeña.

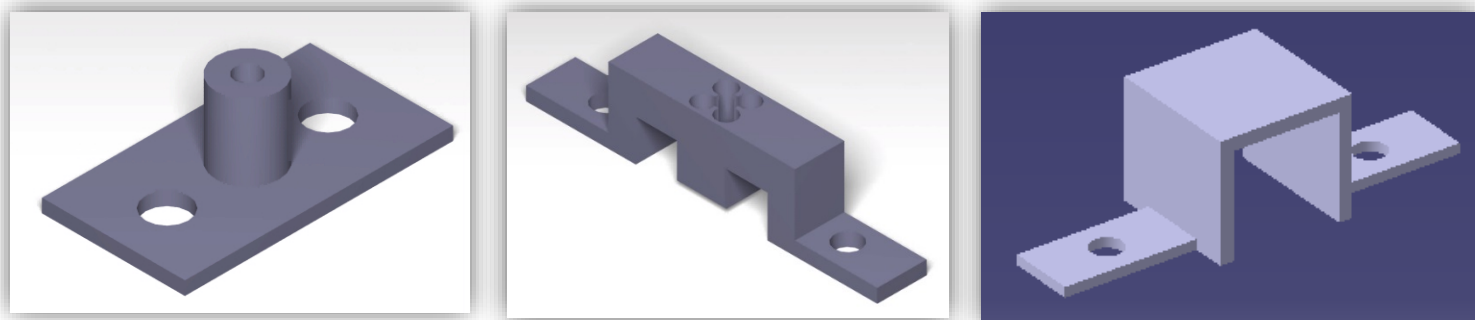


Ilustración 7.4. Piezas de plástico a fabricar en impresión 3D.

Proceso de impresión

Una vez tenemos el archivo 3D del diseño de la pieza, podemos proceder a su impresión. Para ello debemos de seguir los siguientes pasos:

- Guardar el archivo en un formato legible (STL) por el software de preprocesado de la impresora 3D (*Cura*)
- Abrir el archivo en *Cura* y realizar la configuración correspondiente.

A la hora de realizar la configuración, existen una gran cantidad de parámetros a modificar: Velocidad de impresión, altura de capa, densidad de relleno, etc.

Las piezas a fabricar no deben de entrañar demasiada dificultad debido a su simplicidad, por lo que no será necesario realizar muchos cambios respecto de los valores que vienen en los perfiles preconfigurados.

Al tratarse de piezas bastante pequeñas y que requieren de bastante precisión, se configurarán de la siguiente manera:

- o Se deberá de usar velocidades de impresión bajas, así como una altura de capa pequeña. Esto nos permitirá obtener piezas con unas tolerancias más pequeñas respecto al diseño original. El perfil fino o extrafino son adecuados para tal propósito.
- o Al tratarse de piezas pequeñas y con pequeños espesores, se elige una densidad del 100%, que permitirá tener unas piezas más robustas y

resistentes al ser macizas, no conllevando un gasto de plástico ni un tiempo excesivo en su fabricación.

- o Otro aspecto de la configuración a tener en cuenta es la posición en la que se va a imprimir la pieza. La impresión 3D va formando las piezas por superposición de capas en una superficie plana. Por tanto, si existe un voladizo en la pieza a fabricar, automáticamente se creará un soporte con el avance de las capas (red de baja densidad) que permita la sujeción de la parte en voladizo de la pieza en capas superiores. Este soporte se elimina fácilmente al finalizar la impresión, aunque puede dejar pequeñas imperfecciones en las superficies de la pieza que estaban pegadas al mismo. Por tanto, habrá que elegir una posición de la pieza en su impresión que evite la creación de soportes, y de haberlos, que estos sean mínimos o se creen en zonas menos problemáticas para la función que va a realizar la pieza.

- Iniciar la impresión

Se aplicará un producto adhesivo sobre la cama o superficie de trabajo de la impresora (normalmente se usa laca convencional) para que la pieza quede bien adherida y no se produzcan efectos indeseados como el *warping* (las esquinas del elemento se levantan en su base, creando una base desigual) o simplemente separación de la pieza de la base durante la impresión. Estos efectos, dejarían inservible la pieza.

Posteriormente, se ejecutará la impresión. El extrusor comenzará a calentarse, y una vez alcance la temperatura adecuada para el material usado, comenzará la impresión.

- Por último, una vez haya finalizado la impresión, se procederá a la separación de la pieza de la cama mediante una espátula y la eliminación de los soportes en caso de que existan.

7.2.5. Piezas de madera

Debido a la sencillez del diseño de las piezas para permitir el ajuste en el eje y de las fibras, se decidió que el proceso idóneo para su realización sería el corte láser. Por tanto, estas se fabricarán con el mismo contrachapado que se usó para las placas superior e intermedia.

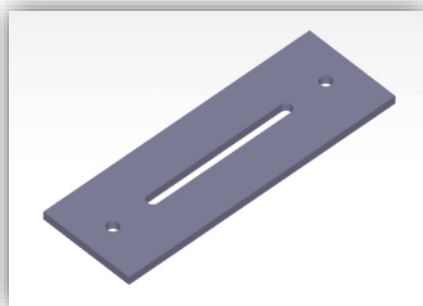


Ilustración 7.5. Pieza para permitir el ajuste en y de la fibra.

Por tanto, el proceso seguido será idéntico al expuesto anteriormente para esas partes.

7.2.6. Fibras ópticas

Estas se colocarán manualmente en la zona habilitada para ellas en el módulo, fijándose a las piezas de plástico para su acople antes descritas.

La fibra viene en rollos de gran longitud, por tanto, será necesario antes de nada cortarlas con el tamaño adecuado para nuestro propósito. Para tal fin, se seguirá los siguientes pasos:

- Medir en la fibra el tamaño deseado y marcar la zona de corte.
- Con una cuchilla diseñada para tal fin, seccionar la fibra por la parte deseada.
- Por último, limar las superficies para obtener una superficie perfectamente lisa y pulida.

Este proceso se realizará limando las superficies de ambos lados con limas de diferentes tamaños de grano, yendo desde la mayor a la más fina. Se ha de tener especial cuidado de realizar un limado perfectamente transversal a la fibra, de manera que no se provoquen pérdidas a la entrada de luz, ya que la superficie de entrada de la misma debe de estar perfectamente paralela a la de las lentes.

7.2.7. Célula solar

Finalmente, se ha de proceder con la colocación de la célula solar. Ésta, se fijará mediante una cinta adhesiva de doble cara a la pieza habilitada para ello. Finalmente, el conjunto deberá de acoplarse lo más próxima a los finales de la fibra, ya que una distancia excesiva provocaría grandes pérdidas puesto que los rayos de la fibra salen con bastante angulación.

Además, existen otro tipo de pérdidas en caso de pasar directamente del medio “sílica fundida” al “aire” (El que se encuentra entre la sílica y la célula solar). Esto se debe a que cambios en el índice de refracción muy bruscos provocan que una gran parte de los rayos se reflejen. Para que se entienda de manera sencilla, se produce el mismo efecto que ocurre cuando una persona se ve reflejada en el agua. Es ese caso, la gran diferencia de índices de refracción entre el agua y el aire, hace que la luz que incide sobre el agua no penetre en ese medio, reflejándose gran parte de la misma, provocando así ese efecto espejo.

Así pues, el paso de la sílica fundida de nuestra fibra al aire produciría unas pérdidas desmedidas, hasta el punto de apenas obtener potencia en la célula. Para paliar ese efecto, será necesario añadir otro medio entre la fibra y la célula solar que haga que no se produzca un salto en el índice de refracción tan grande. Por tanto, este medio deberá de poseer un índice similar al de la sílica. El medio usado será un adhesivo óptico que es capaz de pegar ambas partes, las fibras y la célula solar.

Procedimiento

Necesitamos añadir esta silicona entre la célula y las fibras de manera que esta silicona sea el único medio entre ambas (sin quedar burbujas ni huecos de aire entre medias). Además, esta deberá de fijar ambas cuando haya solidificado.

Para ello se seguirán los siguientes pasos:

- o Primeramente, colocaremos la célula sobre la pieza usada como soporte antes presentada. Se fijará por medio de un adhesivo de doble cara.
- o Posteriormente, verteremos una gota de la silicona sobre la célula solar.

- o Seguidamente, manteniendo la célula en posición horizontal, para evitar desplazamientos de la silicona, la colocaremos debajo del final de las fibras y presionaremos levemente. Tras esto, fijaremos la célula junto con su soporte a la estructura por medio de uniones tuerca-tornillo para evitar que se mueva durante el proceso de solidificación de la silicona.
- o Para que la silicona solidifique quedando unidas ambas piezas, será necesario la exposición a luz ultravioleta o a altas temperaturas (Aproximadamente 80°C).

Este proceso resulta algo dificultoso de llevar a cabo en nuestro módulo. Normalmente, se suelen pegar SOE de tipo refractivo a una célula independiente, para posteriormente situar ambos en su posición de trabajo. De esta manera es fácil el manejo y manipulación durante el trabajo de pegado. Sin embargo, en nuestro caso, las fibras ya están fijas en el módulo y lo que tenemos que hacer es colocar la célula por debajo de las fibras una vez se haya vertido la gota de pegamento o silicona sobre ella. Así, para este caso, la lámpara de luz ultravioleta se colocará perfectamente alineada sobre tres de las lentes, de manera que la luz pase a través de ellas y se concentre en las fibras llegando finalmente a la célula donde se encuentra el pegamento. Obviamente, se deberá de variar la posición de la lente durante el proceso de solidificación, para que la luz actúe en todas las partes.

- o Por último, tras esperar el tiempo pertinente expuesto a estas condiciones, las piezas quedarán perfectamente fijadas. Normalmente, el periodo de curación es menor a una hora. Debido a que tenemos cinco lentes, y solo podemos pillar una línea de tres simultáneamente con la lámpara, se irá variando la posición de la lámpara cada 20 min para trabajar las otras dos lentes. Estos cambios de posición serán más frecuentes al comienzo, cada 20 min aproximadamente, para conseguir una mejor curación de todas las partes. Debido a que el proceso es diferente al habitual y no tenemos experiencias previas, el tiempo de curación en este caso será mayor, llegando a alcanzar las 5 horas aproximadamente, con el fin de prevenir una solidificación incompleta.



Fotografía 7.7. Proceso de adhesión de la célula.

7.2.8. Otros

Tras realizar el montaje completo del módulo fotovoltaico son necesarias ciertas mejoras en algunas partes.

La placa donde se acoplan las lentes Fresnel resultó ser poco robusta, por lo que se combaba con facilidad.

Además, debido a la excesiva rigidez de las fibras, al encajarlas en sus posiciones con su trayectoria curva, éstas ejercen altas fuerzas sobre la placa que provocan un momento de rotación en la placa intermedia. Esto hace que esta placa

también se comben junto con los mecanismos de sujeción de la fibra de manera que el foco no incide correctamente sobre la fibra.

Por tanto, se requiere el uso de ciertos refuerzos que hagan estas placas más rígidas y resistentes y en el segundo caso, que repartan las fuerzas que provoca la flexión de la fibra de manera más equitativa en diferentes puntos de la placa.

Estos refuerzos fueron diseñados tal que se pudieran resolver los problemas descritos. Aprovechando los métodos de fabricación disponibles (impresión 3D y corte por láser) se fabricaron estas piezas. Finalmente, por medio de adhesivos fueron incorporadas a las partes de la estructura necesaria para dar la rigidez necesaria.

8. Optimización: Inclusión de SOE

Como ya se comentó anteriormente, los sistemas de energía solar fotovoltaica de concentración constan de unos elementos ópticos denominados concentradores secundarios o SOE (Secondary Optical Element). Su función principal es la de aumentar la aceptación angular de estos sistemas, así como asegurar una distribución uniforme de la energía incidente en la célula que evite la generación de puntos calientes sobre la misma. [23]

Los elementos ópticos de concentración secundaria pueden ser de dos tipos en función del fenómeno que experimenten los rayos de luz: refractivos o reflexivos. Como su propio nombre indica, estos se basan en la refracción o reflexión, respectivamente, es decir, los rayos incidentes en el elemento óptico son reflejados o refractados hacia la zona objetivo.

Pues bien, para poder mejorar la eficiencia de nuestro módulo será imprescindible el uso de concentradores secundarios para cada una de las lentes.

Ya se explicó anteriormente el fenómeno de las aberraciones cromáticas que hacía que la lente Fresnel enfoque la luz a una distancia focal diferente en función de la longitud de onda. Esto provoca que el foco o spot no sea un punto diminuto, sino que se tratará de un círculo de un cierto diámetro. Al estar limitada la entrada de luz en la fibra a su sección, 2 mm de diámetro, el no uso de un SOE produce unas pérdidas bastante considerables debido a la luz que no entra en la fibra.

Por tanto, un SOE con un diseño adecuado permitirá principalmente aumentar la superficie de captación de la luz, además de realizar las dos funciones comentadas anteriormente (mayor aceptación angular y uniformidad de la luz), obteniendo así unas eficiencias aceptables para nuestro módulo de alta concentración.

8.1. SOE reflexivo

Ya hemos comentado que existen dos tipos de SOE diferentes. En este apartado se diseñará un SOE de tipo reflexivo, debido a su mayor simplicidad, apoyándonos en las leyes físicas que rigen el fenómeno de la reflexión y ayudándonos a su vez de diferentes herramientas informáticas que nos simplifiquen la tarea (Matlab para diseño preliminar y el software de simulación óptica TracePro para optimizar el diseño).

8.1.1. Criterios de diseño

Un concentrador secundario de tipo reflexivo consiste en una especie de cono hueco invertido cuyas paredes interiores son de un material reflexivo (por ejemplo, un espejo). Estas paredes están orientadas de tal manera que las sucesivas reflexiones de los rayos de luz provenientes de un concentrador principal o primario (Lente Fresnel), redirijan los rayos hacia la cara inferior del elemento óptico donde se encuentra la superficie objetivo.

El diseño de un concentrador secundario reflexivo, aunque pueda parecer a priori poco complejo puesto que el fenómeno de la reflexión así lo es, resulta finalmente una tarea dificultosa. La cantidad de parámetros presentes, implican complejos cálculos trigonométricos e iterativos para la obtención del diseño óptimo.

Así pues, a la hora de su diseño hay que tener en cuenta principalmente las siguientes premisas:

- Al tratarse de un medio reflexivo, cada rayo de luz que incide sobre el elemento óptico sale rebotado con el mismo ángulo con el que incidió.
- Cada reflexión de los rayos provoca pérdidas de energía que serán mayores cuanto peor sea la calidad de la superficie reflexiva. Por tanto, estas se deben de minimizar.

- Superficie de captación: Viene determinada por el diámetro superior del SOE. A priori, este debería de ser lo suficientemente grande para que abarque la mayor parte de luz proveniente de la lente. Sin embargo, como se demostrará posteriormente, existen límites en la relación diámetro superior / Diámetro inferior, para los que el rendimiento se reduce. Si aumentamos este diámetro, existen dos alternativas, aumentar la altura del SOE o la inclinación de sus paredes. Ambos casos provocan pérdidas debido principalmente a dos motivos:
 - o La imposibilidad de reflejar los rayos más oblicuos hacia la parte inferior del SOE en unas paredes demasiado inclinadas.
 - o Aumento excesivo en el número de rebotes en un SOE demasiado alto.

Por tanto, se necesita llegar a un equilibrio en el diámetro superior para que el rendimiento sea el máximo posible.

Es decir, el elemento en cuestión se deberá de diseñar de manera que se aumente la superficie de captación y cumpla su función de redirigir los rayos hacia la parte inferior del mismo, minimizando a su vez el número de reflexiones

Además, debemos de tener en cuenta los siguientes parámetros y dimensiones de nuestro sistema a la hora de caracterizarlo para su resolución:

- Características de la lente: Las dimensiones de la lente junto con la distancia focal nos permitirán conocer la inclinación de los rayos que llegan al SOE.
- Diámetro inferior del secundario: Viene impuesto por la sección de la fibra. Por tanto, deberá de ser igual o mínimamente inferior al de la fibra (2 mm de diámetro), de manera que todos los rayos confluyan en la sección de la fibra.

Por tanto, teniendo en cuenta todo esto, deberemos de calcular las dimensiones óptimas del concentrador secundario, es decir: altura, diámetro superior e inclinación de las paredes.

Se utilizarán dos criterios diferentes para diseñar el SOE, cada uno de los cuáles dará lugar a unos diseños con una forma determinada. Concretamente, los criterios se centran en la inclinación de las paredes. Estos criterios son:

- Paredes de inclinación constante: El SOE tendrá forma de cono invertido hueco, donde las paredes son planas y, por tanto, poseen un ángulo de inclinación constante.
- Paredes de inclinación variable: Las paredes serán curvas, variando su ángulo de inclinación de manera uniforme desde la parte superior hasta la inferior.

Para cada una de estos criterios, se obtendrán diseños preliminares donde varía el diámetro superior (Fijando este, quedarán impuestos el resto de parámetros del elemento). Posteriormente, se simularán en un software óptico (Tracepro) que arrojará los resultados necesarios para alcanzar un diseño perfectamente optimizado.

8.2. Diseño preliminar: Matlab

Los complejos cálculos necesarios para el diseño de un SOE conllevan testar numerosas alternativas variando las dimensiones del elemento óptico a diseñar. Por tanto, resulta indispensable ayudarnos de herramientas informáticas como se comentó anteriormente. En concreto, haremos uso de un software matemático común en la ingeniería, Matlab, que simplificará esta pesada y ardua tarea. Se realizarán programas personalizados que calculen las dimensiones de diseños preliminares de SOE basándose en los criterios utilizados.

Como punto de partida, independientemente del criterio usado para el diseño del SOE, tenemos que, tras analizar las características de todos los elementos, se llega a la conclusión que el foco se deberá de situar siempre en la parte superior del secundario. Esto se debe a que por las características impuestas del mismo (diámetro inferior, que debe de ser igual al diámetro de la fibra), el ángulo de sus paredes que permita que los rayos no salgan rebotados hacia fuera, siempre va a ser mayor que el de los rayos con menos ángulo provenientes de la lente. Esto imposibilita que el foco pueda situarse en una altura menor del secundario, ya que estaríamos limitando la entrada de un gran número de rayos que toparán con las paredes externas.

En la ilustración 8.1, podemos apreciar claramente lo que acabamos de explicar. En el caso 1, se observa que los rayos para ese determinado diámetro entran. Sin embargo, situar el foco más abajo (caso 2) supone una pérdida de energía, ya que parte de los rayos que antes eran captados por el SOE, ahora chocan con las paredes laterales.

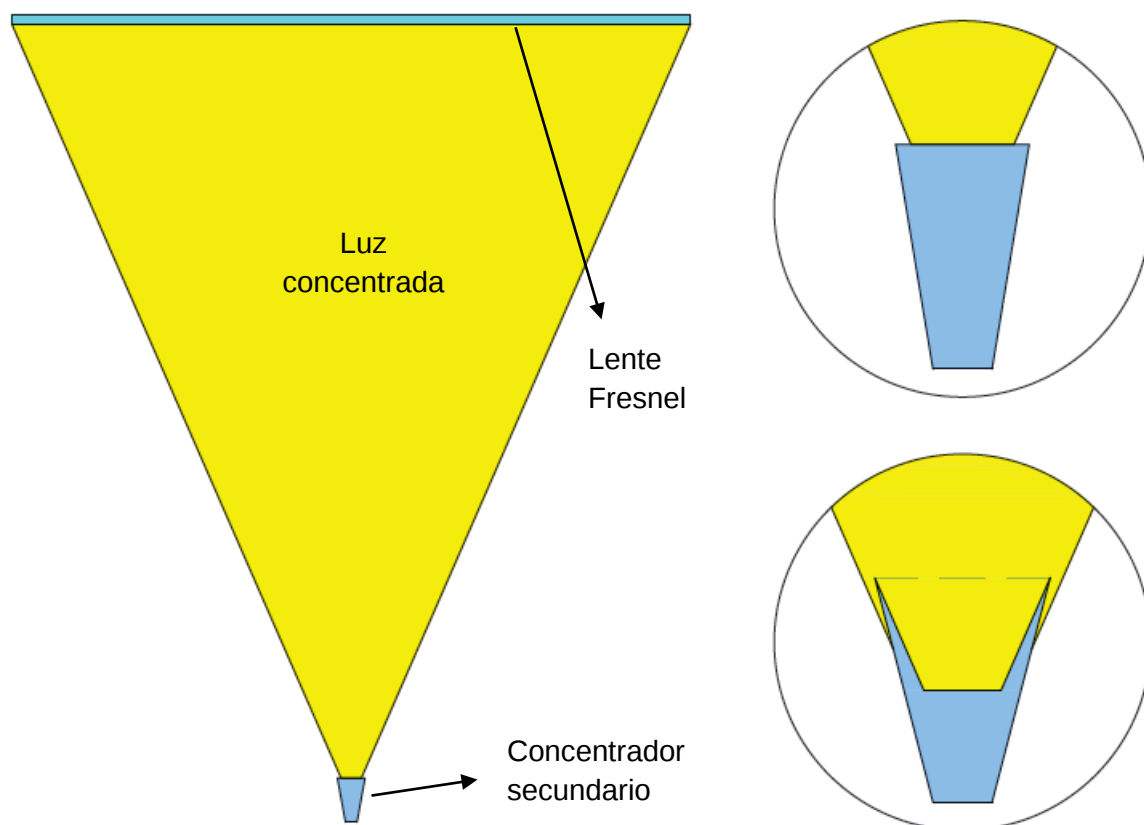


Ilustración 8.1. Esquema del comportamiento de la luz en función de la distancia a la que se sitúa el SOE.

A continuación, se procederá con el diseño preliminar siguiendo los dos criterios señalados anteriormente.

8.2.1. SOE forma cónica:

Se trata de un diseño donde las paredes interiores tendrán una inclinación constante, es decir, donde no varía el ángulo de las mismas.

Como primer paso en el diseño, se impondrá un diámetro superior del secundario.

A partir de ahí, por medio de cálculos trigonométricos calcularemos la altura óptima para que los rayos de luz más oblicuos que llegan al SOE penetren hasta el

final del secundario, alcanzando la célula, siendo a su vez el número de rebotes en las paredes del secundario el mínimo posible. Estos rayos serán, obviamente, los que parten desde un extremo de la lente y, por motivo de las aberraciones cromáticas, se concentran en una distancia focal menor, llegando finalmente al extremo contrario de la superficie del SOE (Ver ilustración 8.2).

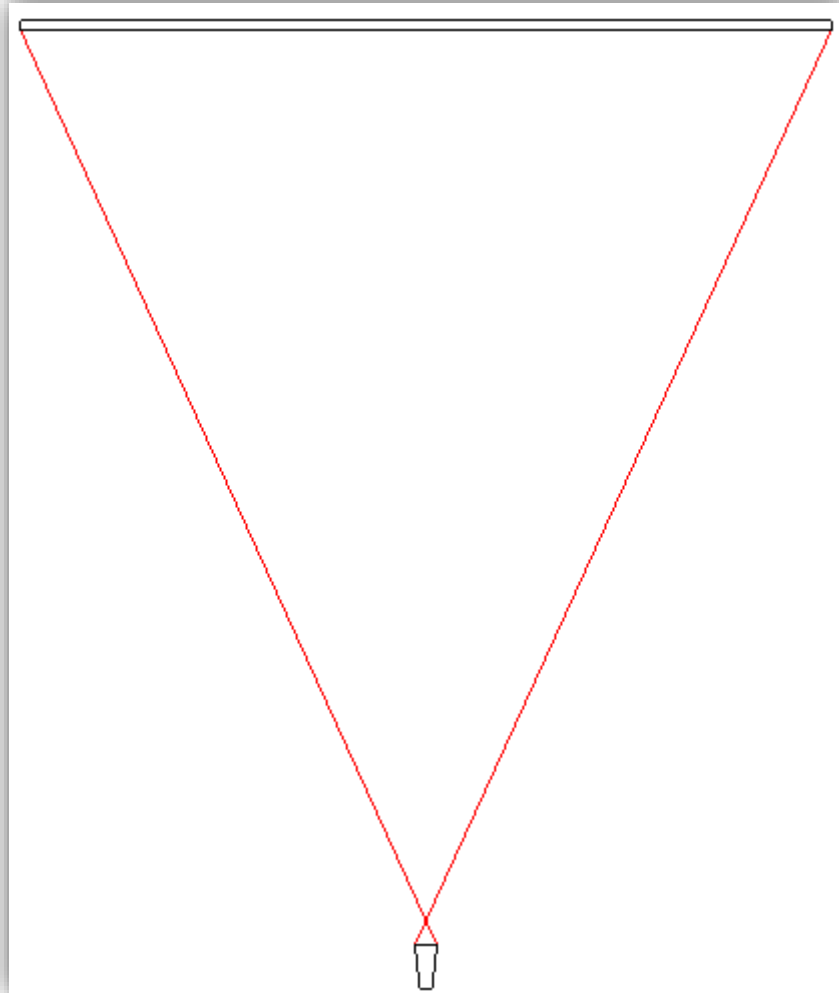


Ilustración 8.2. Representación de los rayos más oblicuos.

Este cálculo resulta algo tedioso debido a las complejas fórmulas resultantes de aplicar trigonometría y también por las numerosas iteraciones que se deben de realizar para encontrar las dimensiones óptimas.

Por tanto, se hace necesario la creación de un programa en Matlab que nos agilice la tarea.

Primeramente, nos dispondremos a presentar las fórmulas necesarias para los cálculos. Tras diferentes análisis del proceso de reflexión que se produce en un concentrador óptico secundario, se presentan como parámetros principales del fenómeno los siguientes:

- o Ángulo α_1 : Ángulo que forma el plano de la lente con los rayos más oblicuo que alcanzan el SOE (rayos representados en la anterior imagen en rojo).

$$\alpha_1 = \arctg \left(\frac{\text{Distancia focal}}{\frac{D_{lente}}{2} + \frac{D_{sup,SOE}}{2}} \right)$$

- o Ángulo α_2 : Ángulo que forma el plano superior del SOE con las paredes del mismo.

$$\alpha_2 = \arctg \left(\frac{\text{Altura del secundario}}{\frac{D_{sup,SOE}}{2} - \frac{D_{inf,SOE}}{2}} \right)$$

- o Ángulo β_i : Ángulo que forma el rayo de luz con la pared de las paredes del secundario.

$$\beta_i = 180 \cdot i - \alpha_1 - \alpha_2 \cdot j \quad \text{con} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad j = 1, 3, 5, \dots, n$$

La anterior fórmula sería iterativa donde i representa el número de rebotes, es decir, β_1 correspondería al ángulo en el primer choque, β_2 al segundo, y así sucesivamente.

- o Distancia h_i : Distancia desde la parte inferior del secundario hasta la altura del choque correspondiente.
- o Distancia c_i : Distancia horizontal desde el punto de la pared del secundario donde se produce la reflexión correspondiente hasta el centro del SOE.

Para los dos parámetros anteriores se calcularán primeramente los correspondientes a la primera reflexión y luego a partir de los mismos seremos capaces de calcular las h_i y c_i de las siguientes reflexiones. Las fórmulas para su cálculo son las siguientes:

Fórmulas primera reflexión:

$$h_1 = \frac{\text{Distancia focal} + \text{altura del secundario} - \tan \alpha_1 \cdot \frac{D_{lente} + D_{inf,SOE}}{2}}{1 + \frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2}}$$

$$c_1 = \frac{\text{Distancia focal} + \text{altura del secundario} - h_1}{\tan \alpha_1} - \frac{D_{lente}}{2}$$

Fórmulas reflexiones siguientes:

$$c_i = \frac{\frac{h_{i-1}}{\tan(\alpha_2 - \beta_{i-1})} \cdot \left(1 - \frac{D_{inf,SOE}}{D_{inf,SOE} - 2 \cdot c_{i-1}}\right) - c_{i-1}}{1 + \frac{h_{i-1}}{\left(c_{i-1} - \frac{D_{inf,SOE}}{2}\right) \cdot \tan(\alpha_2 - \beta_{i-1})}}$$

$$h_i = h_{i-1} \cdot \frac{\frac{D_{inf,SOE}}{2} - c_i}{\frac{D_{inf,SOE}}{2} - c_{i-1}}$$

El parámetro “h” sirve para identificar cuando los rayos más desfavorables, es decir, los más inclinados que efectúan mayor número de reflexiones, alcanzan la célula solar. Esto se identifica cuando se hace negativa. El parámetro “c” simplemente es útil para el cálculo de “h”.

A partir de las anteriores fórmulas ya somos capaces de realizar la programación correspondiente para la obtención del diseño óptimo del SOE.

El objetivo del programa es encontrar la altura mínima del elemento secundario, para un diámetro inferior y superior dados, para la cual los rayos más desfavorables que vienen más oblicuos no salgan reflejados hacia el exterior con los sucesivos choques y penetren hasta el plano inferior. Por tanto, el programa mediante un proceso iterativo irá aumentando el valor de la altura desde cero y realizando los cálculos oportunos hasta encontrar esta altura mínima. Esta altura, coincidirá con la

altura óptima en cuanto a eficiencia, ya que una altura superior hará que los rayos de luz necesiten más reflexiones para llegar al plano inferior.

Además, el programa realizará diferentes ciclos modificando el diámetro superior. Como se puede apreciar en los resultados que se mostrarán a continuación, un diámetro superior más amplio, provocará un aumento de la altura del secundario y por ende una disminución de su eficiencia al existir mayor número de reflexiones. Sin embargo, va a permitir, como ya se comentó anteriormente, una mayor superficie de captación y mayor aceptación angular. Por tanto, es necesario alcanzar un equilibrio en este parámetro. Es sabido que las relaciones óptimas entre diámetro superior e inferior para SOE reflexivos suelen ser algo menores a 2, de manera que nos centraremos en ratios entre 1,75 y 2.

En la tabla 8.1 se muestran los resultados obtenidos tras la ejecución del programa, desde una ratio de 1,75 hasta 2.

Diámetro superior del secundario (mm)	Ratio (D_{sup} / D_{inf})	Altura del SOE (mm)	Número de reflexiones del rayo de luz más desfavorable
3,5	1,75	8,93	3
3,55	1,775	8,62	3
3,6	1,8	8,25	3
3,65	1,825	7,79	3
3,7	1,85	7,36	3
3,75	1,875	11,47	4
3,8	1,9	10,99	4
3,85	1,925	10,36	4
3,9	1,95	14,27	5
3.95	1,975	13,65	5
4	2	12,78	5

Tabla 8.1. Resultados obtenidos tras la ejecución del programa.

A partir de los resultados, debemos valorar la relación Diámetro superior del secundario – Número de choques. Por un lado, aumentando el diámetro tendremos mayor aceptación angular y una mayor superficie de captación. Sin embargo, al aumentar este diámetro, estamos comprometiendo la eficiencia del secundario, ya que

aumentaría el número de reflexiones, las cuales provocan pérdidas de potencia. En la ilustración 8.3 se puede comprobar el fenómeno reflexivo de los rayos más oblicuos para diferentes configuraciones. Así, comprobamos gráficamente el número de reflexiones que se producen para los diferentes diseños.

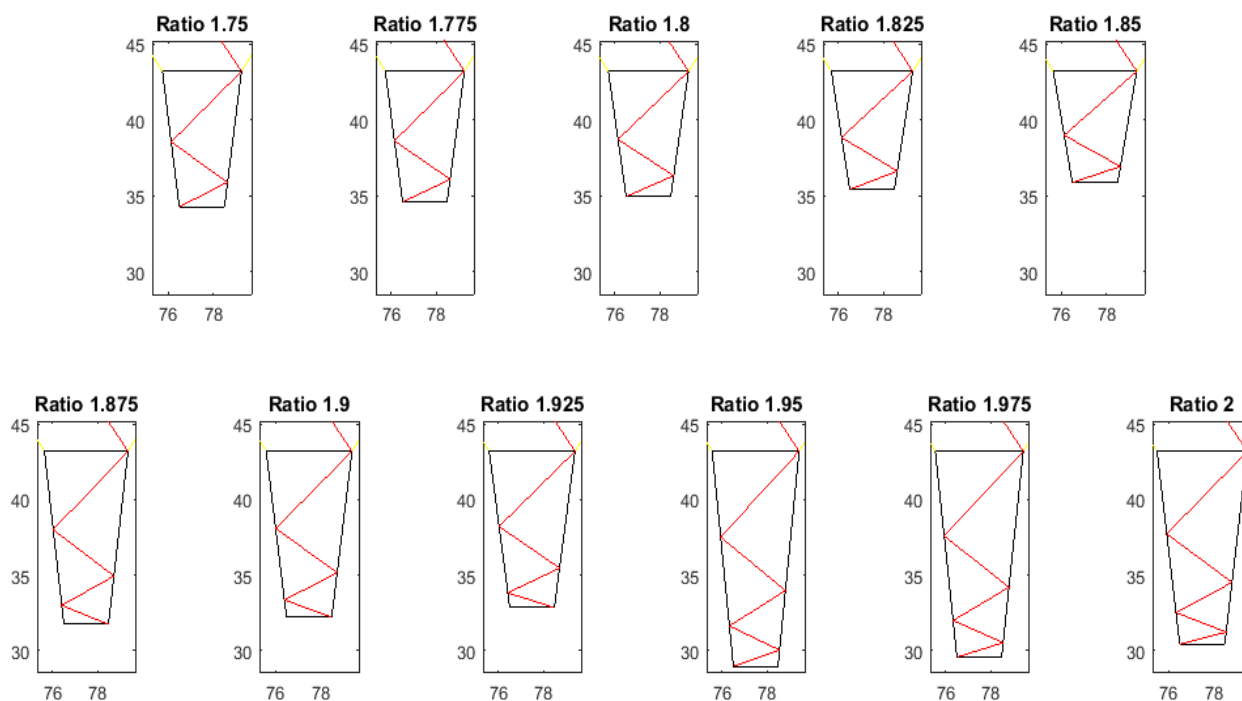


Ilustración 8.3. Comportamiento del rayo más oblicuo para diferentes configuraciones.

Atendiendo a los datos extraídos del programa de Matlab, se puede estimar fácilmente cuáles pueden ser las dimensiones óptimas del SOE. Se deberán de comparar los diseños que, teniendo el mismo número de choques, poseen un mayor diámetro superior. Es decir, a priori debería de estar entre el de ratio 1,85 (3 rebotes) y 1,925 (4 rebotes). Diámetros mayores, aumentarían en exceso el número de rebotes sin aumentar considerablemente la superficie de captación. Lo mismo ocurre con diámetros menores, en los que se reduce en exceso la superficie de captación, no captando la suficiente energía.

Posteriormente, se simularán las geometrías de los diseños antes detallados bajo las condiciones reales de trabajo, para finalmente comparar sus eficiencias (dadas como el porcentaje de potencia que incide sobre la superficie objetivo sobre el total de potencia emitida) y lograr el diseño óptimo. No obstante, esto se comprobará en el siguiente apartado (diseño óptimo) mediante el software de simulación “TracePro”.

8.2.2. SOE curvo

En este caso, procederemos de diferente manera a la hora de realizar el diseño.

Comenzaremos fijando el diámetro superior del secundario al igual que en el caso anterior.

Ahora, apoyándose en la trigonometría calcularemos la altura respecto al plano inferior del SOE a la que tiene lugar la reflexión y el ángulo de la pared, que hacen que el rayo más oblicuo que entra al borde del SOE (mismo rayo de la ilustración x para el SOE cónico) salga rebotado directamente a la parte más lejana de la superficie circular inferior formando un ángulo determinado con la vertical.

A partir de ahí, asignaremos una determinada longitud a esa pared de manera que, concatenando tramos de la misma longitud a continuación unos de otros variando su ángulo ciertos grados en sentido horario, el final del último tramo coincida justamente con el extremo inferior de su lado.

El ángulo que forma el rayo incidente en la superficie inferior del SOE con la vertical es el parámetro fundamental a variar para la realización del diseño. Esto tiene su explicación en que el material sobre el que inciden los rayos de luz, sílica fundida, posee una cierta apertura numérica, que se traduce en un ángulo de aceptación angular. El ángulo de aceptación es el máximo ángulo que permite que el rayo de luz incidente sea atrapado por las paredes de la fibra y no escape. Por tanto, un ángulo excesivamente oblicuo, se escaparía hacia el exterior y no llegaría a la superficie objetivo.

Conocemos los datos de apertura numérica de la fibra óptica, detallados en la hoja de características. Esta es de 0.37 para longitudes de fibra no superiores a 2 metros, lo que equivale a un ángulo de aceptación de 43° . Sin embargo, la imposibilidad de conocer el ángulo con el que llegan todos los rayos a la fibra óptica y hacer un análisis que permita un diseño donde la mayor parte de los rayos sean aceptados por la fibra, nos impide la obtención de un diseño óptimo para cada ratio con simples cálculos. Por tanto, será necesario realizar varios diseños para cada ratio, para posteriormente simularlos en TracePro con el fin de conocer cuál es el de mayor rendimiento.

La explicación del criterio resulta algo difícil de entender, por lo que se entiende mejor de manera gráfica. A continuación, se muestran la ilustración 8.4 que ayudará a entenderlo más fácilmente:

- Primeramente, se representa gráficamente el fenómeno.
- Como se puede observar, se ha trazado el rayo más oblicuo que entra en el SOE. Este corresponde con el que va de un extremo de la lente al extremo más alejado del secundario.
- Si nos fijamos ahora en el SOE, vemos que el rayo del que estamos hablando rebota en la parte superior del mismo y va a parar justamente a la parte inferior, pero en el lado opuesto.
- Por tanto, en los cálculos matemáticos realizados se calcula la altura e inclinación de la pared superior del SOE, para que el rayo vaya a parar con una sola reflexión al punto señalado anteriormente.
- Con esto se consigue reducir el número de reflexiones, aunque tenemos la problemática de que los rayos que inciden en las paredes cercanas a la zona inferior, salen rebotados con un ángulo demasiado oblicuo que puede ser excesivo para la aceptación angular de la fibra.

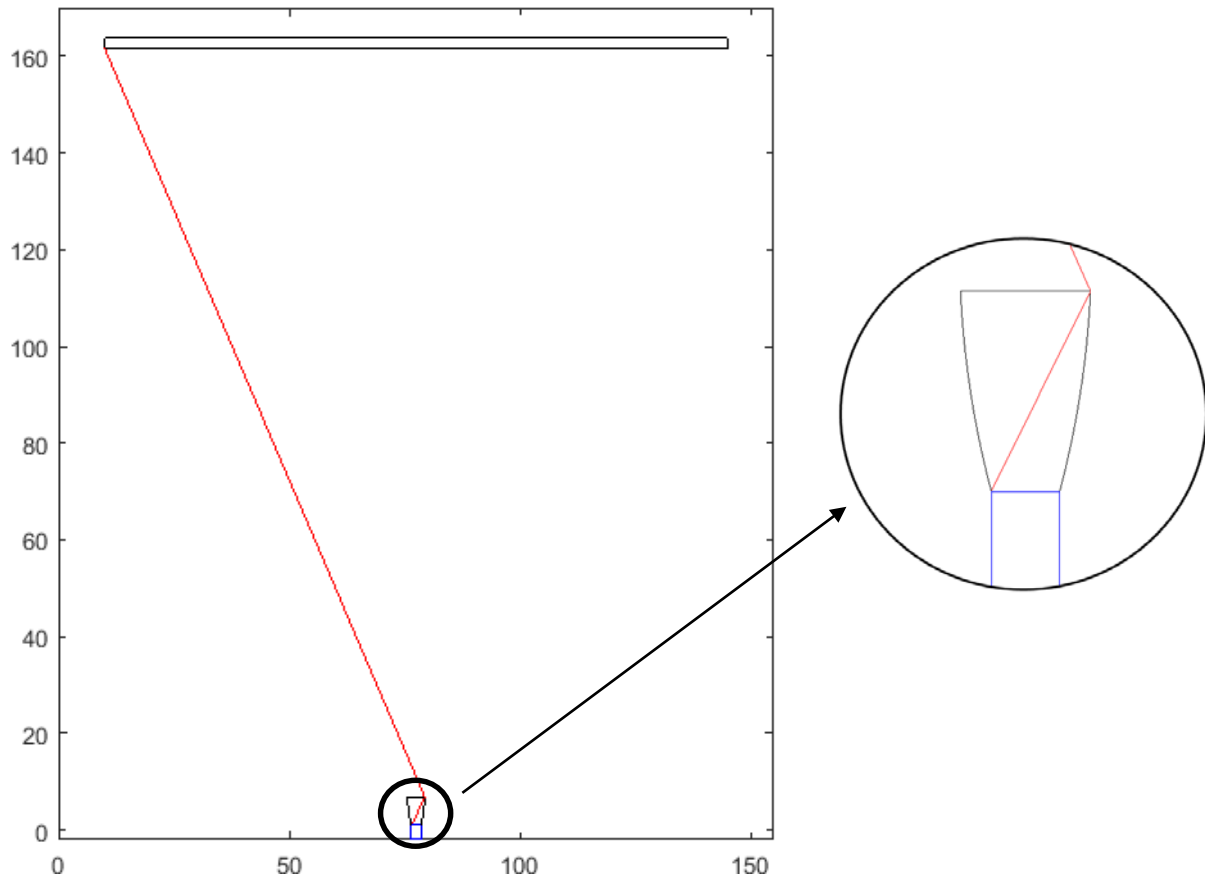


Ilustración 8.4. Explicación del criterio seguido.

Es decir, finalmente quedará un SOE cuyas paredes presentan un ángulo variable que va reduciendo su inclinación a medida que nos encontramos más cerca de la parte inferior.

Como resulta obvio, todos estos cálculos se realizarán con la ayuda nuevamente de Matlab.

Primeramente, nos dispondremos a presentar las fórmulas y parámetros necesarios para la realización de los cálculos.

- Ángulo α_1 : Ángulo que forma el plano de la lente con su rayo más oblicuo que entra en el SOE.

$$\alpha_1 = \arctg \left(\frac{\text{Distancia focal}}{\frac{D_{lente}}{2} + \frac{D_{sup,SOE}}{2}} \right)$$

- **Ángulo incidencia:** Ángulo que forma el rayo más oblicuo que entra al SOE al incidir sobre el plano inferior del mismo con la vertical. Es el parámetro fundamental a variar para la realización del diseño e irá directamente relacionado con el ángulo inicial de la pared lateral del SOE. Por tanto, será un parámetro de entrada para la obtención de los diferentes diseños.
- **Ángulo de la pared superior:** Ángulo de la pared lateral del SOE. Como hemos dicho, esta irá reduciendo su inclinación conforme nos acercamos a la base del mismo.

$$\text{Ángulo de la pared superior} = \frac{90 - \alpha_1 - \text{Ángulo de incidencia}}{2}$$

- **c:** Distancia horizontal entre el punto donde tiene lugar la reflexión del rayo más oblicuo que entra al SOE y el centro del SOE.

$$c = \frac{D_2}{2}$$

- **h:** Altura del SOE. Coincide con la altura de la reflexión del rayo más oblicuo que entra al SOE respecto del plano inferior del mismo.

$$h = \frac{c + \frac{D_{inf,SOE}}{2}}{\sin(\text{Ángulo de incidencia})}$$

- Finalmente, tenemos otros dos parámetros que presentar: variación del ángulo de la pared y longitud de la pared. Como hemos comentado, la pared estará formada por diferentes tramos de igual longitud que varían su ángulo de manera constante. Por tanto, estos parámetros se deberán de ajustar de manera que, fijando el número de tramos en 20, el final del último tramo coincida justamente con el punto inferior donde debe de terminar la pared lateral (Ilustración 8.5).

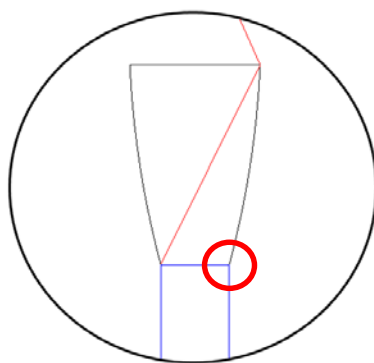


Ilustración 8.5. Punto en el SOE al que hacíamos referencia.

Esto se realizará manualmente y apoyándose de dibujos representativos del diseño realizados por medio de gráficas en Matlab.

8.3. Optimización del diseño: Simulaciones ópticas en TracePro

TracePro es un software de ingeniería óptica para el diseño y análisis de sistemas ópticos y de iluminación.

Las simulaciones ópticas que se han realizado en TracePro están basadas en el trazado de rayos. En función de la fuente de energía seleccionada (en nuestro caso el sol), asigna para las diferentes longitudes de onda un determinado número de rayos, cada uno de los cuales posee la misma energía. El comportamiento de dichos rayos, dependerá como es obvio de la longitud de onda que tienen asociada. El rendimiento total del sistema es valorado en función del número de rayos que lleguen a nuestra superficie objetivo respecto al total de rayos trazados.

8.3.1. SOE cónico

Como ya sabemos, nuestro módulo se compone de 5 lentes Fresnel que concentran la luz en sus respectivas fibras, las cuales confluyen finalmente en una misma célula solar. Es decir, podemos entender el módulo como un conjunto de 5 subconjuntos lente – SOE – fibra. Pues bien, a la hora de realizar la simulación, por cuestiones de simplificación, solo se tendrá en cuenta un solo subconjunto. Al hablar en términos de rendimiento, los resultados son perfectamente válidos para el conjunto completo.

La simulación consistirá en obtener el rendimiento al final del conjunto lente – SOE – fibra óptica – célula solar y su comparación respecto a este mismo conjunto,

pero sin el uso del SOE. Así pues, se usará una lente de 135x135 mm, el SOE y una fibra óptica recta de 2 milímetros de diámetro y 4 cm de longitud. Al final de la misma, se colocará otra geometría que hará de célula solar y que nos permitirá analizar los rendimientos del conjunto en términos de radiación recibida (no se analizará la eficiencia eléctrica de la célula).

Todo el procedimiento que conlleva la simulación óptica, desde la creación de geometrías hasta la obtención de los resultados se especifica a continuación:

Creación y adición de elementos

Primeramente, se añaden y crean las geometrías necesarias en la simulación y que representan la disposición real. Las geometrías a añadir son: Lente Fresnel, SOE, fibra óptica y célula solar.

- Lente Fresnel: Se creará directamente en el software TracePro. Para crearla existe una herramienta que forma la geometría introduciendo los valores característicos de la lente (distancia focal, diámetro, espesor y ancho de anillo). Esta geometría es siempre circular, por lo que para obtener la lente cuadrada que necesitamos, será necesario realizar una serie de operaciones. Con la herramienta de crear geometría disponible en el software, debemos de crear otra geometría cuadrada de igual dimensiones a la lente real (135x135 mm²), con igual origen a la lente Fresnel creada, pero con un espesor mayor. Finalmente, usando la operación booleana “intersecar” entre ambas geometrías, se obtiene la lente definitiva (Ilustración 8.6).

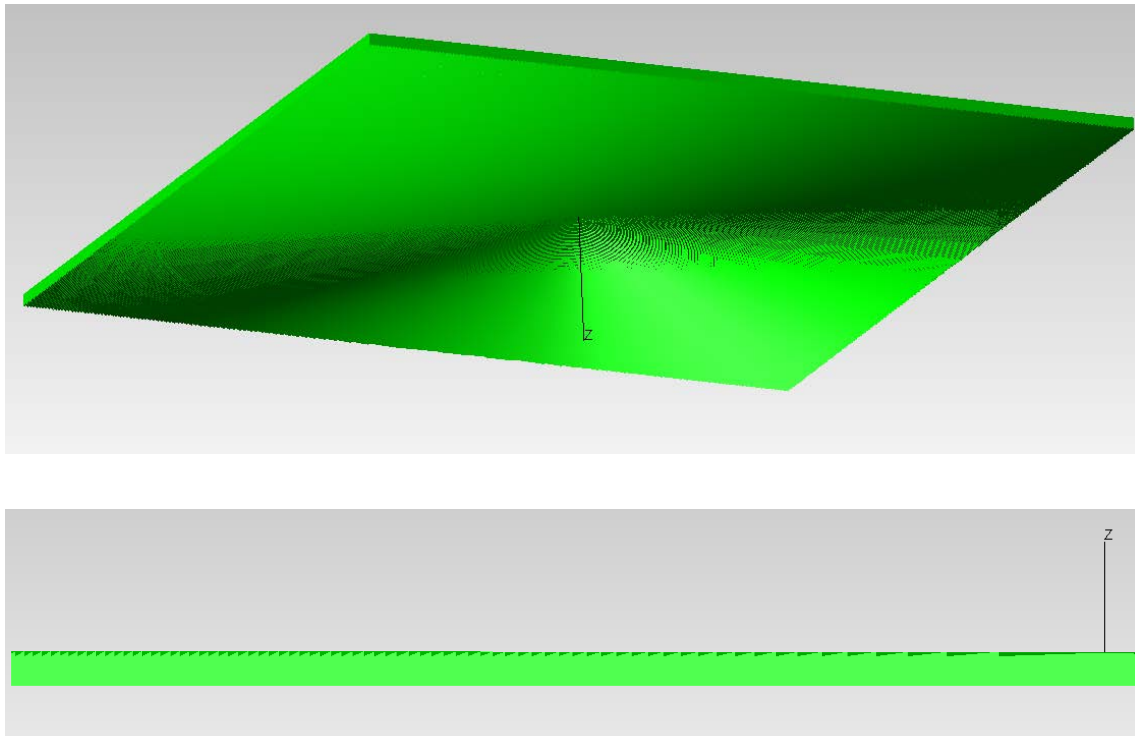


Ilustración 8.6. Lente Fresnel creada en TracePro.

- SOE: Debido a su forma algo más compleja se realizará previamente en un software de dibujo paramétrico (Catia V5) para posteriormente importarla desde TracePro. Los diseños, obtenidos por medio de Matlab, se implementarán en Catia V5 con formato STEP. Posteriormente, por medio de SolidWorks, cambiaremos a formato SAT, puesto que es el formato que nos va a permitir exportar la geometría al software de simulación óptica "TracePro".
- Fibra óptica: Se creará directamente en el software mediante la herramienta añadir cilindro, especificando sus dimensiones (longitud y diámetro).
- Célula solar: Esta se representará como un cilindro de pequeño espesor justo al final de la fibra cuyo diámetro será igual al de la misma. No es exactamente la geometría de la célula solar en sí, simplemente es una geometría cuyo plano superior, donde incide la luz proveniente de la fibra, nos permite contabilizar la cantidad de energía captada.

Adicionalmente, también se creará otra geometría cuadrada de pequeño espesor con las mismas dimensiones que la lente Fresnel. Esta geometría nos servirá para

añadir una fuente de superficie en una de sus caras (la que está enfrente a la lente Fresnel) que simulará la energía emitida por el sol.

Todas estas geometrías, tanto creadas en el propio software como importadas, se emplazarán en su posición correcta indicando las coordenadas.

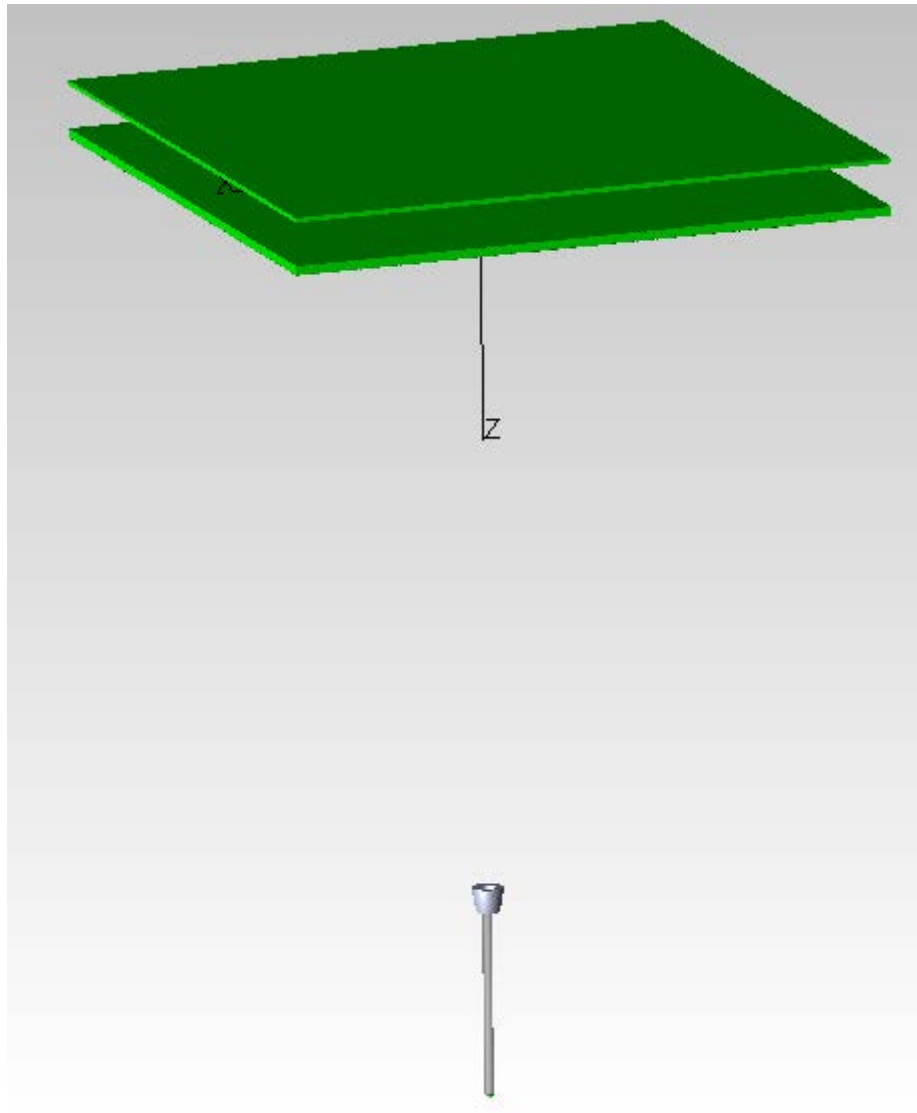
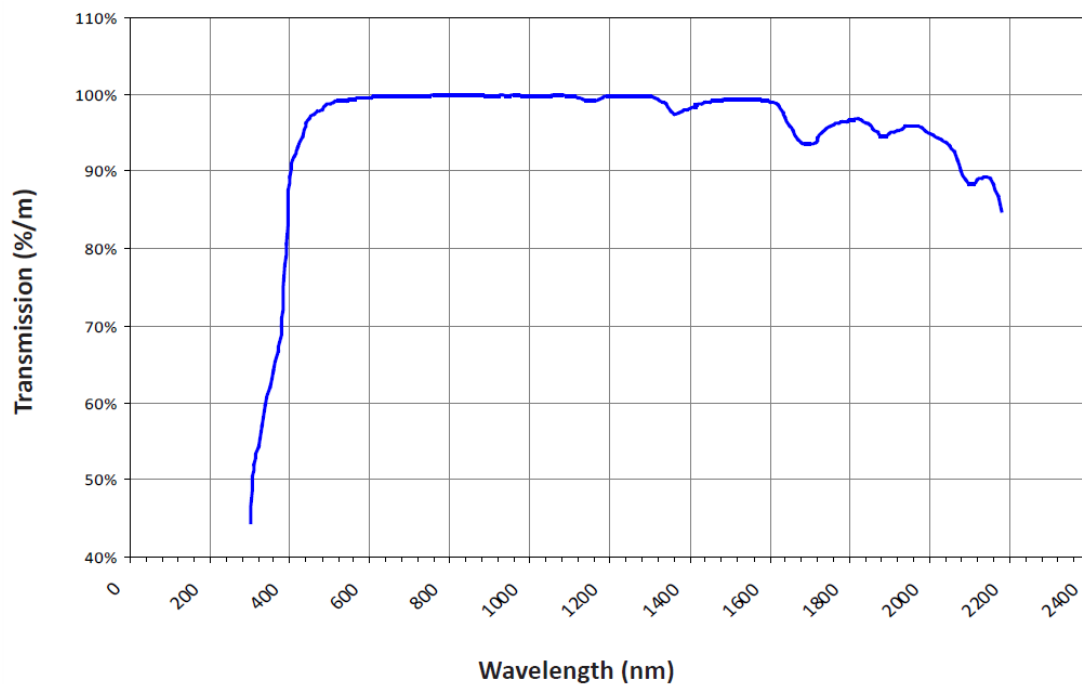


Ilustración 8.7. Conjunto de todos los elementos creados en TracePro.

Asignación de propiedades

Una vez añadidos todos los elementos o geometrías, es necesario asignarles sus propiedades correspondientes:

- o Lente Fresnel: Se asignará el material *PMMA*. Se requiere que el material del catálogo contenga todas las propiedades añadidas para la obtención de unos resultados precisos. Muchas veces las propiedades no vienen especificadas para ciertos rangos de onda o incluso otras como la absorción no vienen establecidas. Por tanto, en ocasiones se precisa añadir un catálogo que incorpore todas las propiedades correctamente. Este es el caso del *PMMA*, cuyas propiedades en el catálogo están incompletas. Así, fue necesario añadir a la biblioteca un nuevo *PMMA* preconfigurado por el usuario para la obtención de unos resultados precisos tras la simulación.
- o SOE: Como se trata de un elemento de tipo reflexivo, no importará el material que se le asigne. Solo bastará con asignar a sus paredes interiores la opción espejo como propiedad de superficie. Esta simula la superficie de un espejo común, el cual posee ciertas pérdidas de energía.
- o Fibra óptica: Estableceremos como material "*Fused Silica*". Al igual que ocurría con el *PMMA*, la sílica no contiene las propiedades de absorción en el catálogo inicial, por lo que, a priori, habría que añadir tal propiedad. Sin embargo, tras consultar la hoja de propiedades de la sílica con la que está compuesta la fibra óptica, vemos que existen casi un 100 % de transmisividad para el rango de longitud de onda en el que trabaja una célula solar, entre 300 y 1800 nm [11] (Ver gráfica 8.1). Por tanto, despreciaremos la absorción por no influir considerablemente en los resultados.



Gráfica 8.1. Transmisividad de la fibra.

- o Célula solar: Se aplicará al plano superior de la misma, donde incide la luz, la propiedad de “Perfect absorber”. Esta propiedad hace que la superficie funcione como un perfecto absorbente de la luz y, por tanto, nos va a permitir analizar la cantidad de radiación que alcanza esta zona.

Configuración de la fuente

La configuración de la fuente supone la parte más determinante y compleja de la simulación. En ella se va a fijar la energía emitida por la fuente, en nuestro caso, dada por el espectro solar, y parámetros determinantes a la hora del trazado de rayos.

Existen tres métodos diferentes para añadir la fuente de radiación:

- o Fuente de superficie
- o Fuente de rejilla
- o Fuente de archivo

En nuestro caso se usará una fuente de superficie.

Habiendo creado previamente la geometría necesaria, seleccionamos el plano que queremos habilitar como fuente para aplicarle propiedades.

Una vez en propiedades, realizaremos la siguiente configuración en fuente de superficie:

- o Número de rayos: Lo fijaremos en un número adecuado, teniendo en cuenta el rango de longitud de onda que vamos a simular y sus valores discretos. 50.000 rayos será suficiente para obtener unos resultados precisos, de manera que se pueden asignar rayos suficientes a cada valor discreto de longitud de onda.
- o Tipo de emisión: Se incluirá mediante un archivo añadido a la biblioteca con las características del espectro solar.
- o Longitudes de onda: Se establecerá una lista con las longitudes de onda a simular. Esta será de carácter discreto y automáticamente el programa asignará para cada valor un número de rayos determinado en función de la energía correspondiente a esa longitud de onda en el espectro solar. Se fijarán las longitudes de onda discretas desde 300 hasta 1800 nm en saltos de 10 nm.

Trazado de rayos

Tras haber realizado todos estos pasos previos, es hora de lanzar la simulación y proceder al trazado de rayos. El software trazará el número de rayos antes indicado teniendo en cuenta que longitud de onda tiene asignada.

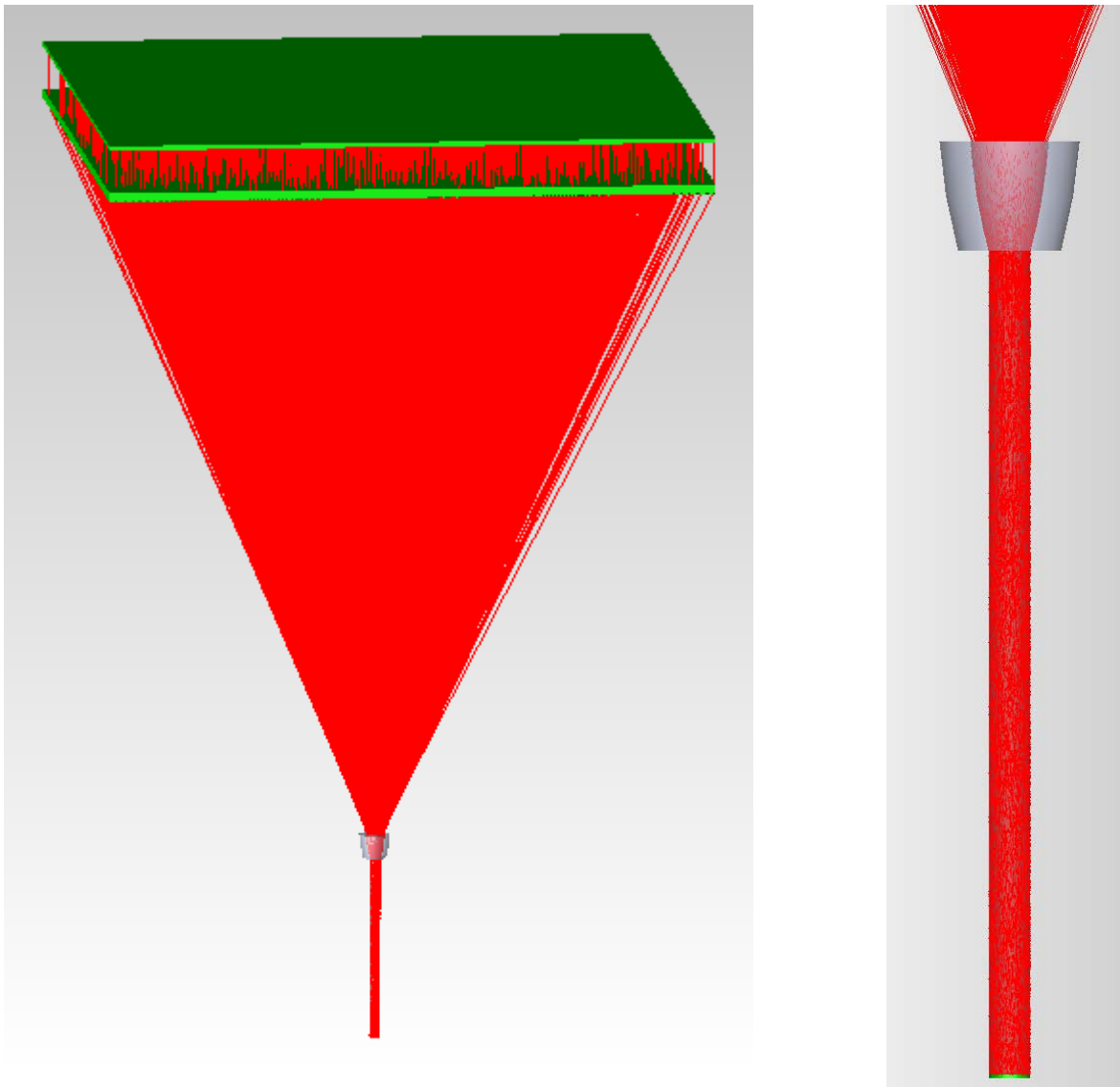
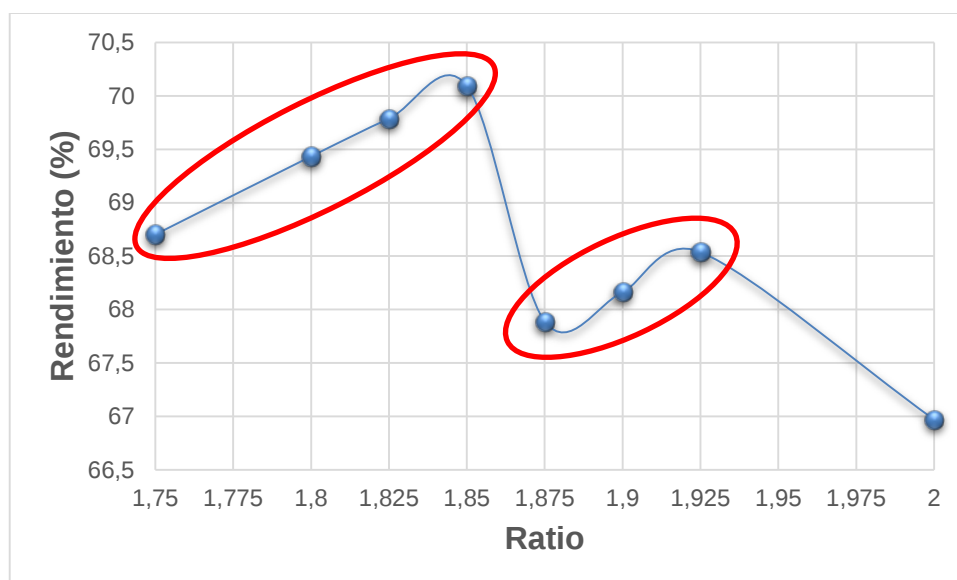


Ilustración 8.8. Representación de rayos en TracePro.

El principal dato a tener en cuenta tras la simulación es el porcentaje de potencia incidente sobre la superficie objetivo respecto del total emitido. A continuación, se muestran estos datos tabulados y posteriormente graficados para los diferentes diseños simulados.

SOE conico		
Diámetro superior (mm)	Ratio	Rendimiento (%)
4	2	66,969
3,85	1,925	68,537
3,8	1,9	68,162
3,75	1,875	67,888
3,7	1,85	70,093
3,65	1,825	69,786
3,6	1,8	69,433
3,5	1,75	68,702

Tabla 8.1. Rendimientos de la simulación con la inclusión de los diferentes SOE diseñados.



Gráfica 8.2. Rendimientos de la simulación con la inclusión de los diferentes SOE diseñados.

Se observa como los resultados de rendimientos van por escalones, cada uno de los cuales corresponden al grupo de diseños que poseen el mismo número de choques del rayo más desfavorable según el diseño preliminar. A igual número de choques, siempre será mejor el diseño cuya superficie de captación sea mayor.

Como conclusión, tenemos que, siguiendo el criterio de un diseño cónico obtenemos un rendimiento máximo aproximado del 70 % para unas dimensiones del SOE de 7,36 mm de altura y 3,7 mm de diámetro superior.

8.3.2. SOE curvo

Al igual que ocurrió con los diseños anteriores, se simulará el subconjunto lente Fresnel – SOE – fibra óptica – célula solar. La disposición y características de los elementos serán las mismas. Finalmente, obtendremos los resultados en forma de rendimiento total, considerado como la potencia que alcanza la superficie objetivo entre la potencia total emitida por la fuente.

Se crearán los diseños preliminares pertinentes según el criterio antes mencionado para diferentes ratios (desde 1,85 a 2,05), obteniendo a su vez para cada ratio un diseño diferente por cada ángulo de incidencia (parámetro explicado anteriormente), variando este entre 25° y 40°.

Realizaremos el mismo procedimiento que anteriormente, adición de elementos, asignación de propiedades y configuración de la fuente. Finalmente, volveremos a lanzar las simulaciones, ejecutando el trazado de rayos.

A continuación, se muestran los datos de las simulaciones realizadas. Como anteriormente, se mostrarán los resultados como rendimiento total de potencia alcanzada en la superficie objetivo respecto la potencia emitida. Estos están clasificados según su ratio correspondiente.

SOE curvo / Ratio 1,85	
Ángulo de incidencia	Rendimiento (%)
25	71,42
30	71,802
35	71,954
40	71,837

SOE curvo / Ratio 1,9	
Ángulo de incidencia	Rendimiento (%)
25	71,541
30	71,883
33	71,968
35	71,93
40	71,694

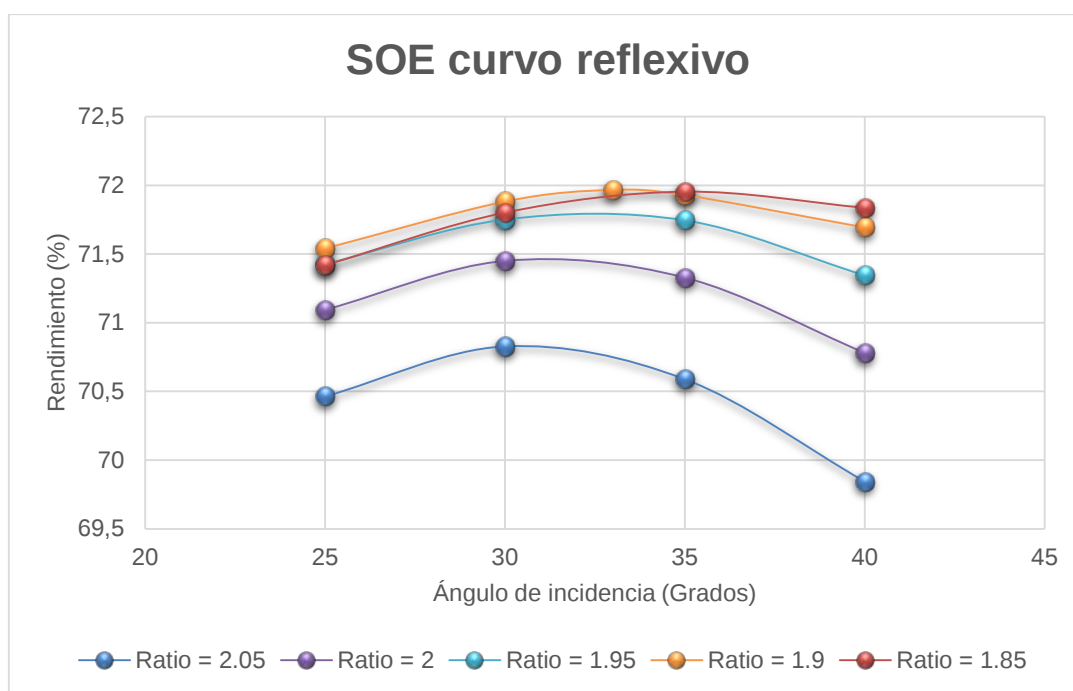
SOE curvo / Ratio 1,95		SOE curvo / Ratio 2	
Ángulo de incidencia	Rendimiento (%)	Ángulo de incidencia	Rendimiento (%)
25	71,425	25	71,094
30	71,751	30	71,45
35	71,745	35	71,328
40	71,344	40	70,781

SOE curvo / Ratio 2,05	
Ángulo de incidencia	Rendimiento (%)
25	70,464
30	70,828
35	70,589
40	69,844

Tabla 8.2. Rendimientos de la simulación con la inclusión de los diferentes SOE diseñados.

Como se puede apreciar, los mayores rendimientos se obtienen cuando el ángulo de incidencia se fija entre 30 y 35 grados, siendo más cercano a 30 para las ratios mayores y a 35 para las menores.

A continuación, en la gráfica 8.3, se representan las curvas de las tablas anteriores para así apreciar de manera gráfica que ratio presenta mayores rendimientos y en que ángulo de incidencia puede presentar el máximo.



Gráfica 8.3. Rendimientos de la simulación con la inclusión de los diferentes SOE diseñados clasificados por ratios.

Se observa que el máximo rendimiento se encuentra en la curva de diseños de ratio 1,9 con un ángulo de incidencia entre 30 y 35 pero más próximo a este último.

Finalmente, obtenemos el diseño para ratio 1,9 y ángulo de incidencia de 33 grados y lo simulamos. El rendimiento máximo resultante es de 71,968 % (Diseño ya incluido en las tablas y gráficas anteriores).

En la ilustración 8.9, se representa la irradiancia sobre la célula obtenida tras la simulación con el SOE más óptimo. En ella, se podría analizar la uniformidad de la luz, pero eso no es caso de estudio en el presente trabajo.

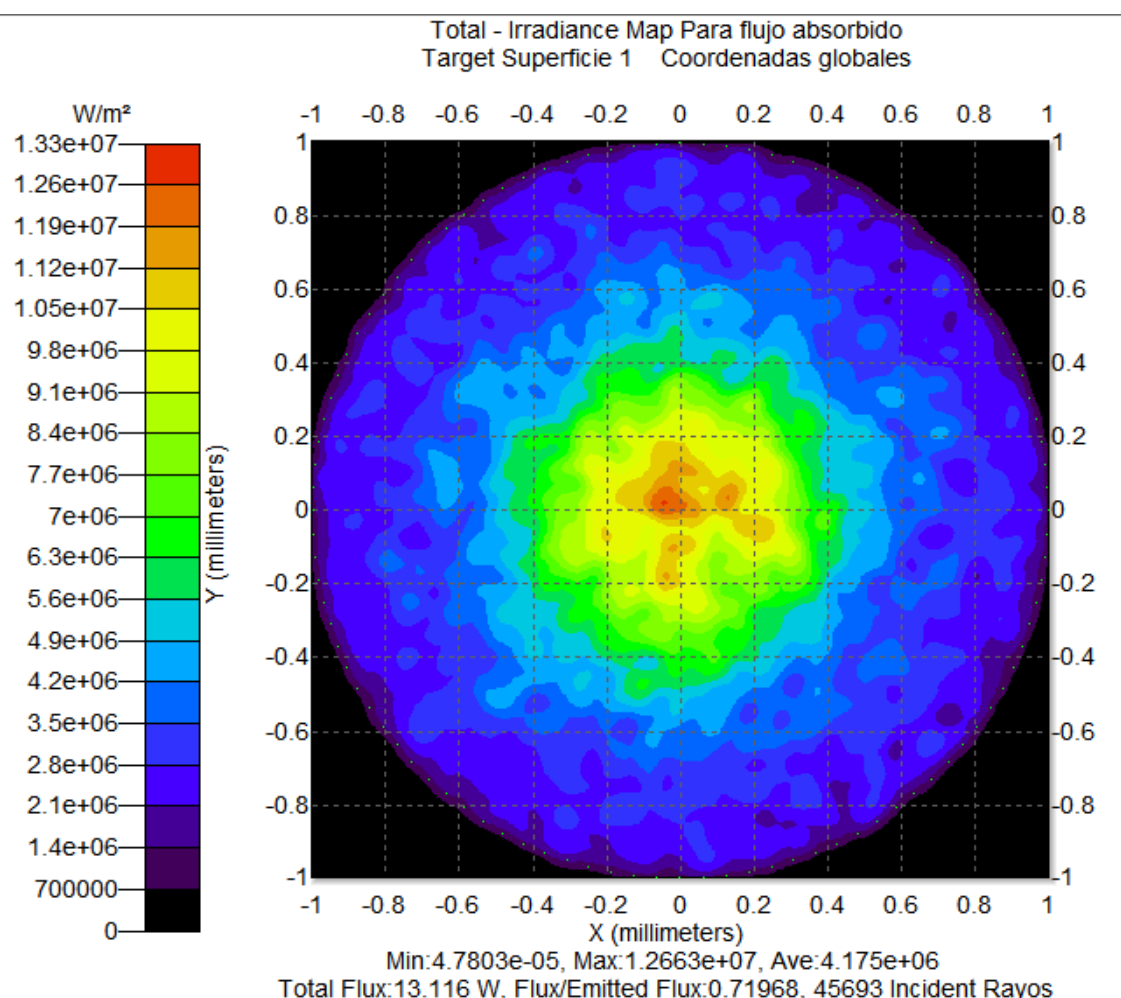


Ilustración 8.9. Irradiancia sobre la célula correspondiente a una de las fibras.

8.4. Comparación

Una vez tenemos los rendimientos totales de las simulaciones con la inclusión de los dos diseños óptimos de SOE planteados, vamos a proceder con la comparación respecto al mismo modelo, pero sin el uso de SOE.

Primeramente, analizaremos el rendimiento del módulo sin el uso del elemento secundario. En la misma simulación creada anteriormente, eliminaremos el SOE y situaremos directamente la fibra en la distancia focal. Tras el trazado de rayos, obtenemos un rendimiento sobre la superficie objetivo de 58 %. En las ilustraciones 8.10 y 8.11 vemos como gran parte de los rayos no inciden sobre la fibra, escapándose por los alrededores. De ahí, que obtengamos un rendimiento tan reducido.

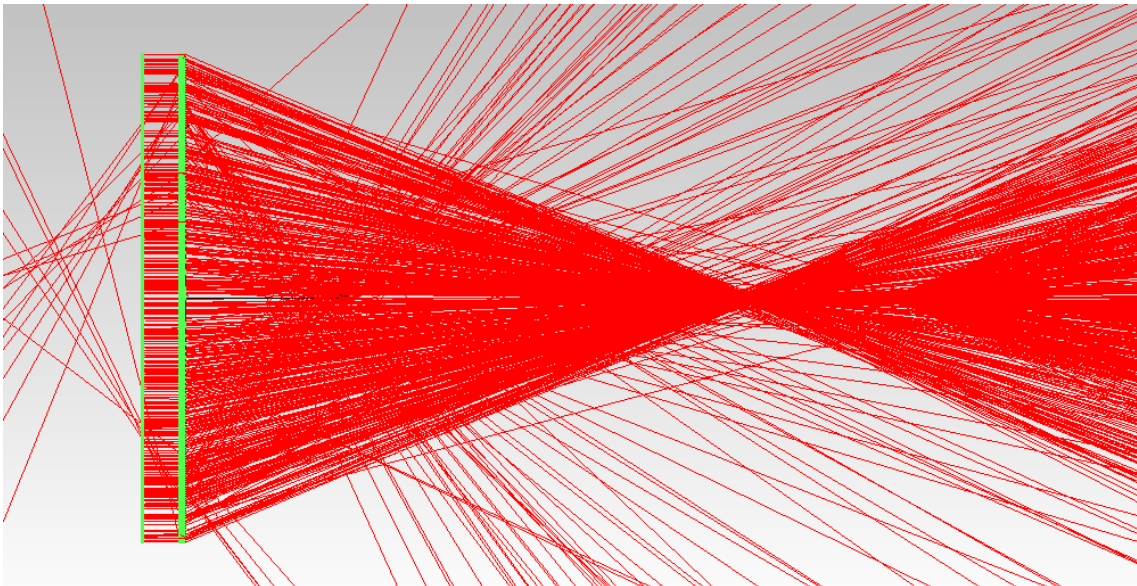


Ilustración 8.10. Representación de los rayos del caso sin SOE.

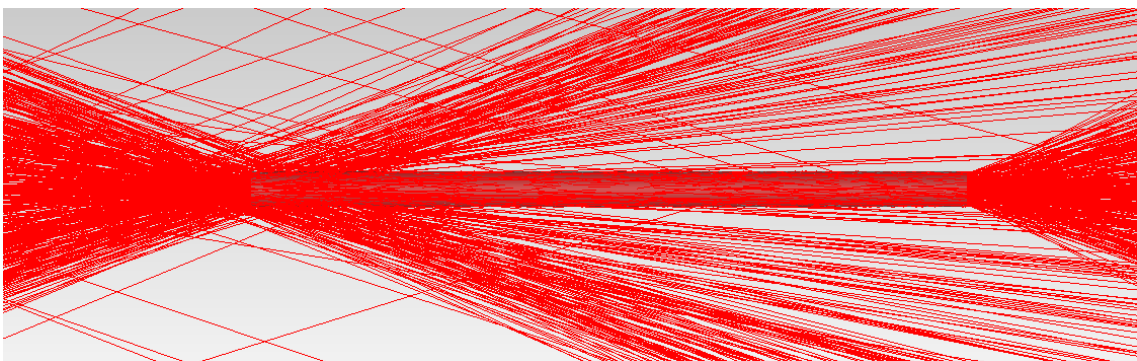


Ilustración 8.11. Representación de los rayos del caso sin SOE.

Los resultados en cuanto a rendimiento de las simulaciones anteriores que incluían los SOE fueron de 70,093 % y 71,968 %. Por tanto, estamos aprovechando en el mejor de los casos un 14 % más de la potencia emitida, porcentaje nada despreciable y que consigue una mejoría notable de la eficiencia del sistema.

Se ha de decir que estos rendimientos no son reales para todas las partes del módulo. Solo serían válidos para la lente central cuya fibra es recta. En los demás subconjuntos del módulo, las fibras presentan una curvatura, lo que provoca pérdidas adicionales en este elemento, bajando los rendimientos a un 1 % aproximadamente.

Además, podemos ver que el segundo criterio usado a la hora de realizar el diseño resulta más eficaz, obteniendo cerca de un 2 % más de energía respecto al primero.

Los SOE diseñados son de tipo reflexivo. Una posible mejora en estos rendimientos se podría conseguir mediante un SOE refractivo, donde el cambio de medio provoca una ligera reducción en el ángulo de incidencia de los rayos, pudiendo así aumentar la inclinación de las paredes y por ende la superficie de captación. No obstante, estos elementos presentan unas pérdidas debidas a la absorción de energía que tiene lugar en el medio reflexivo, que será mayor cuanto mayor sea la longitud del medio, por lo que el aumento de rendimiento no sería demasiado notable.

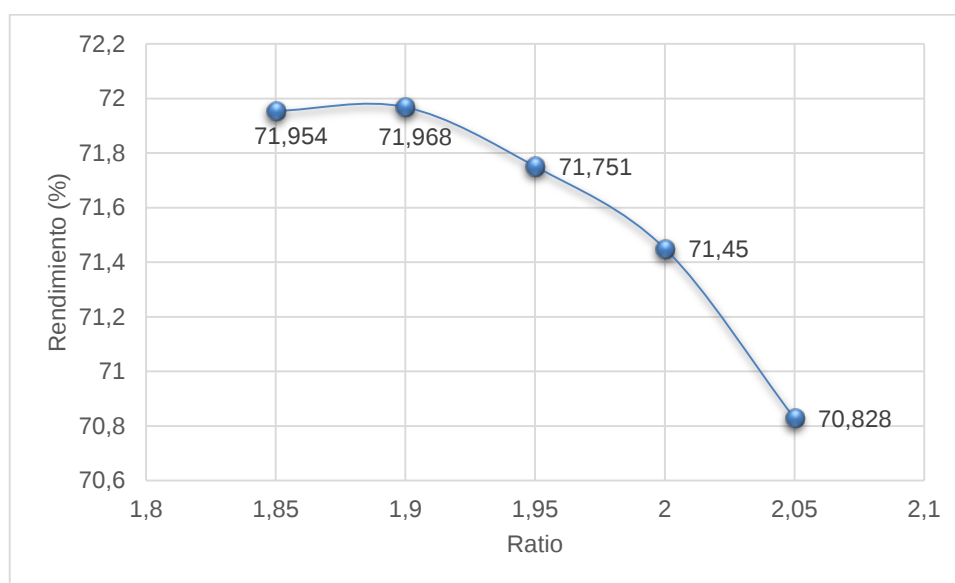
Se ha de señalar, que los SOE tienen un rendimiento mayor respecto a la energía que les llega a su zona superior, es decir, respecto a la energía que están captando. En los diseños planteados utilizando el segundo criterio, que son los más eficientes como hemos podido comprobar con los resultados obtenidos, estos rendimientos van desde el 91,1 % al 87,6% para unas ratios de 1,85 y 2,05, respectivamente. Vemos como con una ratio más reducida existe un mayor rendimiento del dispositivo. Sin embargo, es necesario llegar a un equilibrio entre este rendimiento y la energía captada, que es mayor con ratios mayores.

Estos rendimientos vienen representados en la tabla 8.3.

Ratio	Diámetro superior (mm)	Rendimiento a la entrada del SOE (%)	Rendimiento a la salida (%)	Rendimiento máximo respecto entrada luz (%)
1,85	3,7	79,026	71,954	91,051
1,9	3,8	79,534	71,968	90,487
1,95	3,9	80,004	71,751	89,684
2	4	80,455	71,45	88,807
2,05	4,1	80,864	70,828	87,589

Tabla 8.3. Rendimientos globales de la simulación y de los SOE clasificados por ratios.

En la gráfica 8.4 se realiza una representación del rendimiento máximo obtenido en la simulación para el mejor diseño de cada ratio.



Gráfica 8.4. Rendimientos de la simulación con la inclusión de los diferentes SOE diseñados clasificados por ratios.

Por tanto, el total de pérdidas presentadas en el conjunto se debe principalmente a los siguientes factores:

- Absorción de energía que tiene lugar en la lente.
- Energía que no es captada por el SOE por ser la superficie de entrada demasiado reducida.
- Energía perdida en las reflexiones.
- Rayos que no son aceptados por la fibra debido a su baja aceptación angular.

9. Ensayo experimental. Simulador solar

Mediante el simulador solar pretendemos obtener la curva característica de un módulo o célula solar.

El simulador solar consiste en una habitación dispuesta de varios elementos capaces de simular las condiciones externas de radiación a las que están expuestos los módulos fotovoltaicos.

Una lámpara de gran potencia lanzará sucesivos haces de luz que alcanzan irradiancias similares a las de la luz solar (en torno a 1000 W/m^2) durante un corto periodo de tiempo. Con el fin de conseguir el espectro de referencia (el espectro solar) disponemos de una serie de filtros que, colocados a continuación de la lámpara, son capaces de modificar el espectro de la lámpara.

Un haz de luz colimada es aquel en el que los rayos son paralelos entre sí. La luz del Sol, debido a la gran distancia a la que se encuentra el mismo, se considera que está colimada. Para conseguir este efecto, es necesario dotar a la instalación de un espejo cóncavo con forma parabólica. La luz proyectada por la lámpara, cuyos rayos no están colimados, al reflejarse sobre este espejo, adquirirán esa propiedad, llegando a una parrilla, situada en el lado opuesto, totalmente colimados.

Esta parrilla, permite la colocación de los módulos o dispositivos a medir mediante una serie de elementos que permiten su fijación. La parrilla está dotada de movimientos azimutal y cenital, para su alineamiento con la luz incidente. Por medio de manivelas es posible ejecutar estos movimientos manualmente.

Además, el simulador dispone de una lámpara de baja intensidad (luz de modelado), necesaria para calibrar los módulos o dispositivos a simular y alinearlos con la luz incidente colimada.

Finalmente, todo esto requiere de un ordenador provisto de un software capaz de comunicarse con el resto de elementos del simulador. Mediante el software configuraremos todos los aspectos y parámetros del simulador antes de proceder con los procesos de medida, y recibiremos los resultados obtenidos, principalmente en forma de curva característica de la célula o módulo fotovoltaico (Curva I-V).

9.1. Procedimiento de medida

Una vez está perfectamente construido el módulo, procederemos a realizar las mediciones pertinentes en el simulador solar. Esta tarea, requiere seguir cuidadosamente una serie de pasos.

- o Colocación del módulo en la parrilla
- o Alineamiento del módulo
- o Calibración del foco con las fibras
- o Realización de medidas

A continuación, se detallan cada uno de los pasos.

9.1.1. Colocación del módulo en la parrilla

El primer paso consiste en situar el módulo en la parrilla del simulador. Este irá apoyado sobre unos perfiles horizontales que se habilitarán en la parrilla vertical. La longitud de los mismos será tal que el largo del módulo no la exceda en demasía para evitar vuelcos. Irán separadas la distancia adecuada para que el módulo pueda ir apoyado sobre ellos, es decir, una distancia ligeramente inferior al ancho del módulo. Tras situarlo en la parrilla, se fijará por medio de sargentos para evitar desplazamientos o caídas.

9.1.2. Alineamiento del módulo

Anteriormente dijimos que los rayos llegan a la parrilla colimados desde el espejo que se encuentra enfrente. Pues ahora es necesario alinear perfectamente el módulo que se encuentra en la parrilla para que obtengamos el máximo rendimiento del mismo. Con esto queremos decir que los rayos lleguen totalmente perpendiculares al módulo. Para el alineamiento se deben de seguir los siguientes pasos:

- o Encender la lámpara auxiliar.
- o En la parrilla, usar las manivelas posteriores para efectuar los movimientos azimutal o cenital y orientar el módulo correctamente. Para conseguir un alineamiento correcto, se debe de prestar atención a los

spots de las lentes del módulo. Estos spots deben de ser totalmente simétricos. Una manera de verlo fácilmente es haciendo uso de un folio de papel blanco. Con él, podemos observar el dibujo del spot más claramente. Acercando el papel hacia la lente, pero manteniéndolo siempre paralelo a ella, se observa como el spot se va haciendo cada vez más grande y adquiere forma cuadrada. Pues bien, si el alineamiento es correcto, este cuadrado debería de ser perfecto. En caso contrario, los vértices de este cuadrado se mostrarán desplazados.

9.1.3. Calibración del foco con las fibras

Como bien sabemos, el módulo dispone de unas piezas en la placa intermedia (donde se sitúan los comienzos de las fibras), que permiten ajustar la posición de la fibra al spot que debe de incidir sobre ellas.

Pues tras estar el módulo colocado sobre la parrilla y una vez alineado, deberemos de ajustar la pieza donde encajan las fibras con el spot de cada una de las lentes. Los conjuntos tornillo – tuerca que llevan provistos estas piezas, nos permitirán que queden fijas en su posición tras realizar el ajuste.

Este proceso se realizó antes de la colocación de las fibras, puesto que estas dan una rigidez al módulo una vez colocadas que dificultan la tarea del ajuste.

En las fotografías 9.1, 9.2 y 9.3, se puede observar la posición final del módulo en la parrilla. Este se encuentra iluminado con la luz de modelado con el objetivo de realizar la alineación y calibrado del mismo.



Fotografía 9.1. Prototipo fabricado del módulo de fibra óptica correctamente alineado en la parrilla del simulador solar.



Fotografía 9.2. Detalle de la luz entrante en las fibras.



Fotografía 9.3. Detalle del final de las fibras.

9.1.4. Realización de medidas

Ya hemos realizado todos los pasos previos. Ahora toca proceder con la realización de medidas.

Primeramente, conectaremos los cables de medición en los bornes de la célula del módulo, teniendo en cuenta la polaridad. Estos se encargarán de captar y medir la energía proveniente del módulo.

En el software que dispone el ordenador del simulador solar realizaremos las configuraciones oportunas. Entre ellas destacan las siguientes:

- Aporte del archivo BIAS: Es el archivo de texto que contiene los voltajes para los que vamos a obtener su intensidad correspondiente en la curva I-V.
- Se indican las irradiancias para las que queremos obtener la curva I-V.
- Se ha de indicar la superficie útil del módulo (la de superficie total de todas las lentes), de manera que se puedan dar datos de eficiencia.

Tras finalizar el test, se crearán los archivos con los datos de las curvas I-V, destacando los datos de intensidad de cortocircuito, voltaje en circuito abierto, factor de forma, potencia máxima y eficiencia, para una irradiancia previamente indicada, en este caso 1000 W/m^2 .

9.2. Resultados. Curva I-V

El módulo ha sido fabricado con técnicas bastante manuales y poco automatizadas. Por tanto, el grado de precisión durante su fabricación no será óptimo. Si por algo se deben de caracterizar los módulos fotovoltaicos de concentración es por su precisión, puesto que pequeñas tolerancias pueden hacer reducir sus rendimientos en gran medida. Además, parte de los materiales usados en la fabricación no son los más adecuados. Todo esto hace que no podamos esperar resultados destacables, aunque sí que se podrán extraer conclusiones a cerca del experimento.

Lo que se pretende tras simular un cierto módulo fotovoltaico es caracterizarlo y obtener sus propiedades y características, es decir, obtener su curva I-V.

El simulador solar solo nos permite obtener datos de curvas I-V variando las condiciones de irradiancia. Para variar otras condiciones, es necesario hacerlo de manera externa por medio de otros procedimientos.

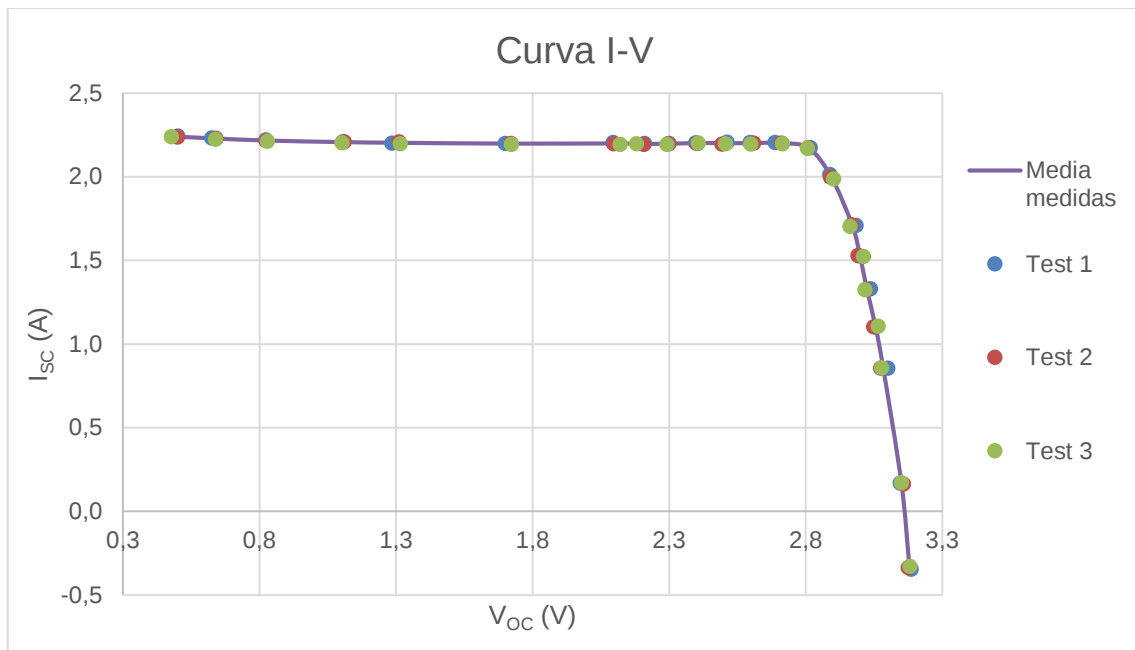
Las simulaciones a realizar van a ser controladas, debido a que estamos realizando un ensayo desde el punto de vista de un prototipo inicial. Por tanto, ni la variación de irradiancias ni de la temperatura nos proporciona datos destacables para nuestro estudio. Además, la influencia sobre el rendimiento de altas temperaturas es menor en la tecnología de concentración fotovoltaica.

Por tanto, fijaremos como referencia una irradiancia de 1000 W/m^2 , equivalente a 1 sol, para la realización del estudio y la obtención de los resultados. Así, la curva característica del mismo será la que corresponda a las condiciones de 1 sol y temperatura ambiente (aproximadamente 25°C).

Sin más, procedemos a mostrar y analizar los resultados obtenidos.

Curva I-V

La curva y datos de la misma se representan en la gráfica 9.1 y la tabla 9.1. Durante el proceso de medida se realizaron 3 test, para comprobar la repetitividad de resultados. En el gráfico, se muestra mediante una línea la curva alcanzada tras realizar la media de los valores obtenidos en los tres ensayos. Los puntos corresponden al valor de cada uno de los ensayos individuales, los cuales se identifican por colores.



Gráfica 9.1. Curva I-V experimental del módulo.

Test 1 (1000 W/m ²)		Test 2 (1000 W/m ²)		Test 3 (1000 W/m ²)		Curva media (1000 W/m ²)	
V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)
0,501	2,243	0,499	2,237	0,477	2,239	0,492	2,240
0,625	2,232	0,640	2,230	0,639	2,224	0,634	2,229
0,822	2,220	0,823	2,216	0,828	2,212	0,825	2,216
1,105	2,209	1,110	2,208	1,101	2,203	1,105	2,207
1,284	2,202	1,310	2,209	1,315	2,197	1,303	2,203
1,699	2,199	1,720	2,200	1,722	2,194	1,714	2,198
2,094	2,205	2,096	2,198	2,120	2,193	2,103	2,199
2,209	2,200	2,207	2,193	2,180	2,197	2,199	2,197
2,299	2,199	2,297	2,198	2,291	2,193	2,296	2,197
2,396	2,203	2,402	2,200	2,406	2,201	2,401	2,201
2,511	2,206	2,493	2,196	2,505	2,198	2,503	2,200
2,596	2,205	2,609	2,202	2,598	2,195	2,601	2,201
2,687	2,205	2,711	2,201	2,714	2,198	2,704	2,201
2,816	2,174	2,807	2,172	2,806	2,171	2,810	2,172
2,888	2,013	2,890	1,999	2,902	1,986	2,893	1,999
2,984	1,710	2,967	1,714	2,961	1,704	2,971	1,709
2,995	1,528	2,991	1,530	3,011	1,524	2,999	1,527
3,036	1,330	3,019	1,327	3,017	1,325	3,024	1,327
3,056	1,102	3,048	1,103	3,064	1,106	3,056	1,104
3,100	0,856	3,074	0,856	3,078	0,858	3,084	0,857
3,145	0,170	3,157	0,164	3,150	0,172	3,151	0,168
3,185	-0,346	3,175	-0,336	3,181	-0,329	3,180	-0,337

Tabla 9.1. Datos de la curva I-V experimental del módulo.

Se aprecia una repetitividad aceptable, lo que quiere decir que los resultados son válidos y perfectamente representativos del comportamiento del módulo fotovoltaico.

Pasamos ahora a analizar los datos más representativos obtenidos de la curva característica.

Resumen resultados

En la tabla 9.2, se presenta el resumen de los resultados numéricos obtenidos tras el ensayo para una irradiancia de 1000 W/m² y temperatura ambiente. Los datos corresponden a los tres ensayos realizados de manera consecutiva. En la última columna se muestran los valores medios correspondientes a estos ensayos o test.

	TEST 1	TEST 2	TEST 3	MEDIA
B [W/M2]	1000	1000	1000	1000
V_{OC} [V]	3,158	3,163	3,161	3,161
I_{SC} [A]	2,278	2,269	2,276	2,274
PMP [W]	6,122	6,096	6,092	6,103
V_{PMP} [V]	2,816	2,807	2,806	2,810
I_{PMP} [A]	2,174	2,172	2,171	2,172
FF	0,851	0,849	0,847	0,849
EFF	6,82	6,79	6,78	6,80
SMR	1,01	0,999	1	1,003

Tabla 9.2. Resumen de datos correspondientes a la curva I-V experimental del módulo.

9.2.1. I_{sc} y V_{oc}

Como se observa en la tabla 9.2, el valor medio de la I_{sc} obtenido es 2,274 A, valor muy similar al de referencia de la célula solar para una concentración de 500 soles (2,31 A). Por tanto, nos podemos hacer a una idea de la cantidad de pérdidas existentes, ya que tenemos una concentración geométrica mucho mayor (aproximadamente 6 veces mayor). Próximamente analizaremos los rendimientos y eficiencias.

La tensión en circuito abierto nos da menos información acerca de las propiedades del módulo, ya que depende principalmente de las características de la célula y su comportamiento ante la temperatura. El valor medio de la V_{oc} es de 3,161, similar al detallado en la hoja de características de la célula usada.

9.2.2. Factor de forma o de relleno (FF)

Como se puede apreciar en la gráfica 9.1 a simple vista, el factor de forma de la curva característica de nuestro módulo fotovoltaico parece bastante bueno, obteniéndose un más que aceptable 85 %. A pesar de la no utilización de un SOE a la salida de las fibras que permita una mayor uniformidad de la luz sobre la célula, el factor de forma es notable. Esto puede explicarse por dos razones principales que se detallan a continuación:

- El hecho de que la luz llegue a la célula desde 5 puntos diferentes, permite que esta esté más repartida sobre la superficie de la misma y, por tanto, se presente más uniformidad.
- Las numerosas pérdidas que existen a lo largo de los diferentes elementos del módulo provoca que los puntos de luz correspondientes a cada fibra no sean demasiado intensos, siendo precisamente uno de los factores que provocan el empeoramiento del factor de forma la existencia de grandes variaciones de energía entre diferentes partes de la célula.
- El uso de fibras ópticas homogeneiza la luz que es proyectada al final de ellas, obteniendo mayor uniformidad.

En resumen, estaríamos mejorando el factor de forma respecto a módulos que presentan una intensidad de cortocircuito similar, puesto que la luz llega más repartida y homogeneizada, aunque si obtuviéramos mejores rendimientos debido a menores pérdidas, este se reduciría en cierta medida.

9.2.3. Potencia

Tras haber analizado el factor de forma, llegamos al parámetro fundamental que es la potencia máxima del módulo. Este parámetro depende totalmente de los anteriores. Por tanto, obtendremos mayor potencia máxima cuanto mejor sea el factor de forma y mayores sean la I_{sc} y la V_{oc} .

Así, tenemos una potencia máxima de 6,103 W, punto que corresponde en la curva a una I_{PMP} y V_{PMP} de 2,172 A y 2,810 V, respectivamente.

9.2.4. Rendimientos y eficiencias

Por último, procederemos a analizar los diferentes rendimientos del módulo.

En la hoja de características de la célula solar que incorpora el módulo tenemos el siguiente dato relevante a la hora de analizar rendimientos en cuanto a energía incidente sobre la célula:

- I_{sc} para 500 soles de concentración: 2,31 A

Al depender la I_{sc} principalmente de la energía incidente sobre la célula, con este dato y la I_{sc} obtenida, es posible calcular la concentración eficaz con una simple regla de 3:

$$2.31 \text{ A} \rightarrow 500 \text{ soles}$$

$$2.274 \text{ A} \rightarrow x$$

$$x = C_{eff} = \frac{2.274 \cdot 500}{2.31} = 492 \text{ soles}$$

Ahora, calculamos la concentración geométrica del módulo, necesario para el posterior cálculo del rendimiento óptico. Esta se calcula de la siguiente manera teniendo en cuenta la superficie de las lentes y la de la célula solar:

$$C_{Geométrica} = \frac{A_{lentes}}{A_{célula}} = \frac{4 \cdot 135^2 + 130^2}{5.5^2} = 2969 \text{ soles}$$

Por último, procedemos a calcular el rendimiento óptico como la relación entre la concentración eficaz y la geométrica:

$$\eta_{\text{óptico}}(\%) = \frac{C_{eff}}{C_g} \cdot 100 = \frac{492}{2969} \cdot 100 = 16,6 \%$$

Adicionalmente, es posible el cálculo del rendimiento de nuestra célula por medio de la siguiente fórmula que engloba todos los rendimientos del módulo.

$$\eta_{\text{módulo}} = \eta_{\text{célula}} \cdot \eta_{\text{óptico}} \cdot \eta_{\text{cables}}$$

Con el rendimiento del módulo obtenido tras la simulación, el óptico calculado anteriormente y suponiendo que las pérdidas en los cables son nulas, obtenemos:

$$\eta_{\text{célula}} = \frac{\eta_{\text{módulo}}}{\eta_{\text{óptico}}} = \frac{6,8}{16,6} = 41 \%$$

Este valor es similar al detallado en la hoja de características, lo que quiere decir que la célula presenta un buen funcionamiento. Si tuviéramos en cuenta las pequeñas

pérdidas producidas en los cables, esta se ajustaría de forma considerable a la de referencia.

10. Conclusiones

Los datos anteriores nos han permitido caracterizar el módulo y conocer cómo se comporta y funciona en condiciones de trabajo. Conocemos todas sus propiedades principales, destacando entre ellas la potencia máxima obtenida y los rendimientos.

Tras analizar todos los resultados obtenidos llegamos a las siguientes conclusiones:

- La disposición con la que la luz llega a la célula, repartida en varios puntos, hace que, sin la utilización de un SOE, obtengamos un factor de forma mejor que otros sistemas de una lente que presentan intensidades de cortocircuito similares. Esto se debe a que existe mayor uniformidad de la luz incidente sobre la célula solar. De igual manera, la potencia máxima también será superior, ya que tenemos similares valores de I_{sc} y V_{oc} y un FF mejor.
- Las eficiencias obtenidas son nefastas. Esto se puede deber a multitud de factores. Parte de ellos, son inevitables e inherentes a la idea inicial. Sin embargo, otros se deben a inadecuados procesos de construcción y montaje y a la desacertada elección de materiales.

Vemos entonces, que los resultados están muy condicionados por las pérdidas existentes. Esto nos hace plantearnos principalmente este aspecto y realizar un análisis sobre él (cuantificarlas, localizarlas, medidas para evitarlas, etc.)

A continuación, procedemos con el análisis detallado de las pérdidas.

10.1. Pérdidas

Ya vimos anteriormente por medio de las simulaciones en TracePro, la cantidad de pérdidas que podríamos llegar a tener. Parte de ellas, eran inevitables, como las debidas a los elementos ópticos. Otras se debían a la no inclusión de SOE en la estructura. Sin embargo, tras el ensayo real del módulo en el simulador, los resultados

arrojan unas pérdidas aún mayores, lo que nos da a entender que existen diversos factores relacionados con la fabricación y montaje del módulo o bien con el proceso de medición (alineamiento y calibración) que han podido tener influencia en el rendimiento.

A continuación, pasamos a valorar y analizar todas estas pérdidas que han tenido lugar. Valoraremos el porcentaje total de pérdidas teóricas que se producen en el módulo a partir de los datos arrojados por las simulaciones, para posteriormente analizar las debidas a los procesos de fabricación, montaje, calibrado, etc.

10.1.1. Pérdidas en la lente Fresnel

La lente está fabricada en un material plástico (metacrilato) que posee una cierta absorción. Esta provoca unas pérdidas datadas aproximadamente en un 10 %. Tras analizar ese tipo de pérdidas desde TracePro, confirmamos ese porcentaje aproximado de pérdidas, obteniendo unas pérdidas de un 12 %

10.1.2. Pérdidas a la entrada de la fibra

En las simulaciones vimos cómo tan solo un 60,2 % aproximadamente de radiación emitida alcanzaba la superficie de entrada de 2 mm de diámetro de la fibra óptica, por ser esta superficie demasiado reducida (Este porcentaje podría mejorar hasta un 72 % con la inclusión de un SOE de tipo reflexivo y más aún con uno de tipo refractivo, puesto que estaríamos aumentando la superficie de captación). Así pues, el porcentaje de potencia perdida en esta zona es de:

$$Pérdidas (\%) = 100 - \frac{60,2}{88} \cdot 100 = 31,6 \%$$

10.1.3. Pérdidas a lo largo de la fibra

A lo largo de la fibra, se producen también pérdidas. Principalmente, se deben a la reducida apertura numérica que posee el material, que hace que parte de la radiación ni siquiera entra en la fibra. Así pues, obtenemos que la radiación al final de la misma se reduce hasta un 58 % del total emitido.

El modelo tomado como referencia en las simulaciones era un modelo simplificado, donde la fibra era de una longitud bastante inferior y recta. Tras realizar

una fibra de dimensiones y forma similar a la real, vimos que las pérdidas existentes aumentan mínimamente debido a la curvatura de las mismas, alcanzando la célula aproximadamente un 57 % de la potencia emitida. Por tanto, el porcentaje de pérdidas producido en la fibra respecto a la potencia incidente sobre ella es de:

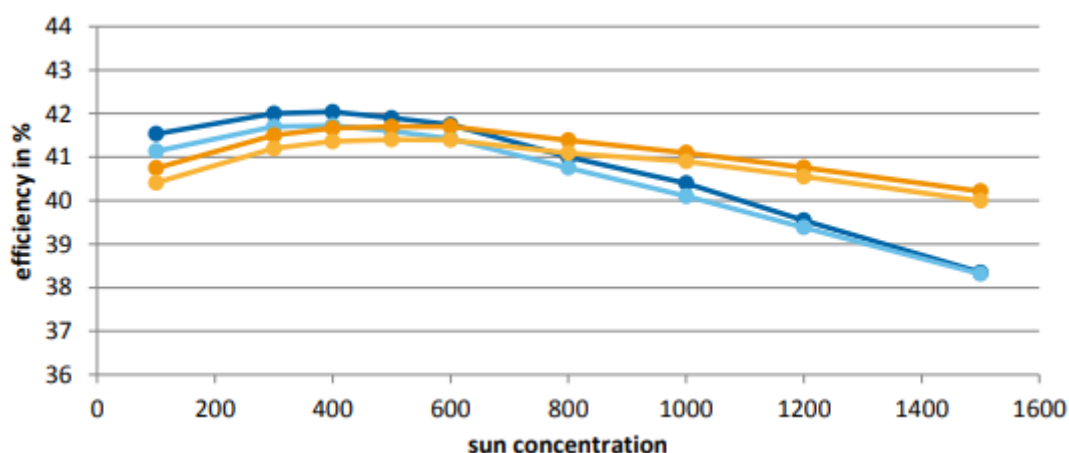
$$P\acute{e}rdidas (\%) = 100 - \frac{57}{60,2} \cdot 100 = 5,3 \%$$

10.1.4. Pérdidas en la célula solar

Las células fotovoltaicas poseen un cierto rendimiento respecto de la luz que les llega. El rendimiento que posee la célula usada viene detallado en la tabla 10.1 y la gráfica 10.1. Así, la célula usada (triple unión GaInP/GaInAs/Ge con sustrato de Ge) tiene un rendimiento aproximado de un 41,6 % para la concentración alcanzada de 491 soles y una temperatura de 25 °C, similar a la del laboratorio donde se realizaron los ensayos.

Sun Concentration	I _{sc} [A]	V _{oc} [V]	I _{MPP} [A]	V _{MPP} [V]	P _{MPP} [W _{MPP}]	FF [%]	η [%]
● Version MC/Glass Grid optimized for medium concentration + Antireflective Coating adapted to glass							
X 250	1,15	3,07	1,13	2,81	3,18	90,1%	41,7
X 500	2,31	3,10	2,27	2,80	6,35	88,7%	41,6
X 1000	4,61	3,13	4,52	2,71	12,24	84,8%	40,1

Tabla 10.1. Características de célula solar usada en el módulo. Fuente [7]



Gráfica 10.1. Rendimientos de la célula solar en función de la concentración alcanzada. Fuente [7]

Así, la energía desaprovechada en la célula es de:

$$P\acute{e}rdidas (\%) = 100 - 41,6 = 58,4 \%$$

Por tanto, para terminar, tenemos que la eficiencia teórica aproximada del módulo será de:

$$\varepsilon = 57 \cdot 0,416 = 23,7 \%$$

En la tabla 10.2 se muestra un resumen de las pérdidas teóricas producidas en cada elemento del módulo.

	Energía perdida (%)	Energía restante sobre el total emitido (%)
Lente	12	88
Entrada de la fibra	31,6	60,2
Fibra óptica	5,3	57
Célula solar	58,4	23,7

Tabla 10.2. Porcentajes de energía perdida en cada elemento.

Comparando la eficiencia teórica con la real obtenida tras las simulaciones (6,8 %), nos hacemos una idea de la cantidad de pérdidas adicionales que se están produciendo.

Anteriormente analizamos el rendimiento óptico. Este era de un 16,5 %. Comparando este dato con el rendimiento óptico teórico obtenido en las simulaciones, 57 % (sin contabilizar las posibles pérdidas producidas en el adhesivo óptico), se calculan unas pérdidas adicionales de un 40,5 % respecto de la potencia emitida. Estas pérdidas vendrían provocadas por errores de fabricación, montaje y alineamiento. A continuación, se detallan los posibles motivos que pueden provocar este elevado porcentaje de pérdidas adicional:

- Mal ajuste en la entrada de las fibras: El comienzo de las fibras va fijado a la placa por medio de unas piezas capaces de ajustarse en las direcciones “x”, “y” y “z”. Este ajuste fue realizado manualmente y a simple vista con la ayuda de la luz de modelado, por lo que es probable que su posición no sea la óptima en ninguna de las tres direcciones. Un ajuste perfecto supondría situar el comienzo de las fibras a la distancia focal óptima y el foco concéntrico a la sección de la fibra. Además, la excesiva rigidez de la fibra provoca grandes tensiones. Estas hacen que el elemento donde van fijadas presente un momento que les haga

rotar ligeramente, rotación que, aunque se ha paliado en cierta medida mediante diversos elementos que proporcionan solidez, provoca un desajuste respecto del foco.

- Corte y limado de fibras ópticas: Un corte y sobretodo un correcto limado de las secciones de entrada y de salida de las fibras, de manera que se obtenga una sección totalmente transversal y de rugosidad reducida, sería fundamental para evitar pérdidas. Esto permitiría tener un mayor control sobre el haz de luz, evitando que esta se difunda. Al realizar esta operación mediante métodos manuales (una cuchilla para el corte y lijas de diferentes tamaños de grano para el limado) no se puede garantizar que los resultados finales sean óptimos.
- Daño en las fibras: La excesiva rigidez de las fibras ópticas provoca que durante su manipulación se produzcan pequeñas roturas transversales. Para direccionarlas hacia la célula solar es necesario flexionar las fibras (las correspondientes a las lentes de los lados). Esta flexión en un material tan rígido provocó las roturas, por las cuales existen fugas de luz.
- Superficies correspondientes a las lentes y al comienzo de las fibras irregulares y no planas: Los materiales usados no son suficientemente consistentes ni robustos. Se usaron placas de una especie de contrachapado de baja calidad, por lo que las superficies donde van instaladas las placas y las fibras podrían no ser totalmente planas. Esto impediría alinear correctamente las 5 lentes simultáneamente con la luz incidente, además de no poder disponer las secciones de las fibras totalmente paralelas a las lentes.
- Mal alineamiento del módulo con los rayos en el simulador solar. El módulo presenta una pésima aceptación angular debido a la no inclusión de SOE. Por tanto, un pequeño grado de desalineamiento provoca que el foco no incida en el centro de las fibras y se aumente las pérdidas en la captación de la luz.
- Mal posicionamiento de la célula solar: La existencia de muy poco margen en el ajuste de las fibras con la célula, ya que la sección transversal de las cinco fibras es mínimamente menor a la sección de la célula solar, hace que cobra mucha importancia su colocación. Además, a la salida de las fibras, los rayos se expanden con un cierto ángulo como se puede ver en la ilustración 10.1. Por

tanto, la célula deberá de estar colocada lo más próxima a las fibras (cuidando que no se produzcan daños por rozamiento) y perfectamente alineada con ellas para evitar pérdidas de luz por los lados. Este grado extremo de precisión en su colocación hace que sea imposible de alcanzar con un proceso manual, como el realizado en este caso.

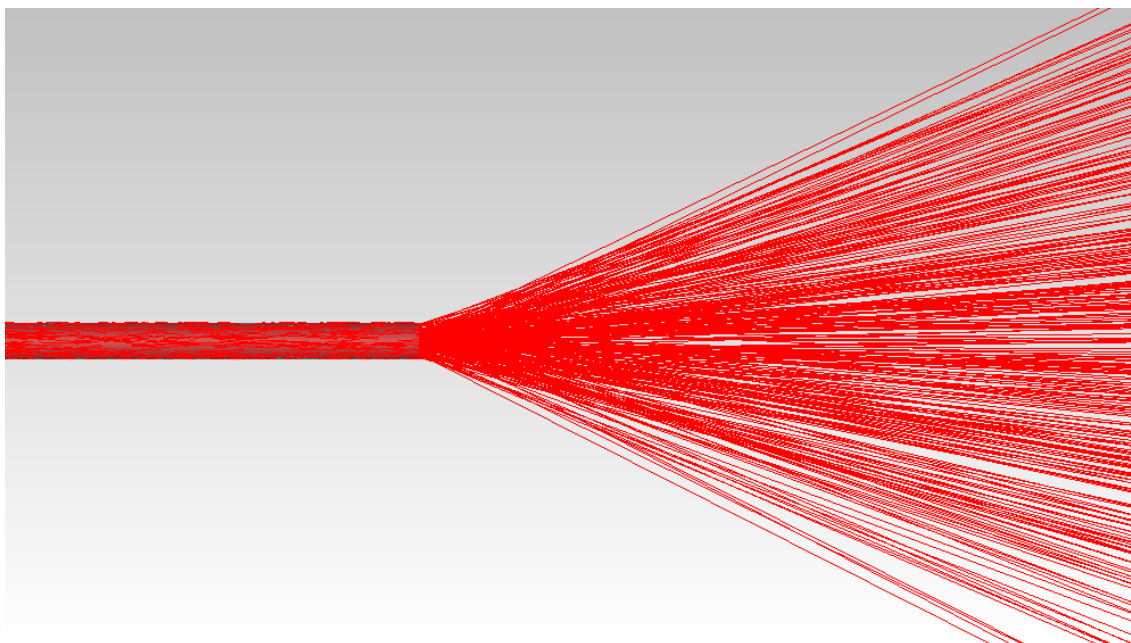


Ilustración 10.1. Trazado de rayos a la salida de la fibra óptica.

- Mala colocación o curación del adhesivo óptico: Una cantidad inadecuada de pegamento, ya sea por exceso o por defecto, o un curado parcial podrían causar pérdidas de luz entre la salida de las fibras y la célula solar. En este caso no se puede valorar como de bien se produjo el curado y adhesión del pegamento, ya que una vez pegado no tenemos acceso a esa parte.

11. Línea de actuación futura

Como se ha podido ver a lo largo del trabajo, es viable la construcción y diseño de un módulo fotovoltaico usando fibra óptica. Aunque los rendimientos obtenidos no son nada destacables, las conclusiones nos dicen que existe bastante margen de mejora. Unos métodos de fabricación más precisos y automatizados junto con la utilización de materiales adecuados de mayor calidad y adaptados al fin harían aumentar en gran parte estos rendimientos. Otro factor fundamental sería la

incorporación de SOE a la entrada de las fibras. Supondría una mejora notable al aumentar la superficie de captación, además de adquirir cierta aceptación angular.

Todo esto, podría permitir llegar a eficiencias más que aceptables obteniendo concentraciones reales sobresalientes. Según las estimaciones obtenidas tras la realización de las simulaciones en TracePro, la eficacia del módulo podría rondar el 27 %, consiguiendo un rendimiento óptico superior al 70 %, lo que equivaldría a una concentración efectiva de 2.100 soles aproximadamente.

Por tanto, como líneas de actuación futuras se propone:

- Esencial el uso de materiales de calidad adecuados al fin que va a tener el módulo y a la función que deben de desempeñar.
- Métodos de fabricación lo suficientemente precisos.
- Para poder reducir la altura del módulo, aspecto a destacar en el campo de concentración fotovoltaica, se debe valorar el uso de una fibra óptica de diferentes características que, manteniendo su eficiencia, sea más flexible y menos frágil que la actualmente usada.
- La inclusión y diseño óptimo de un elemento óptico secundario (SOE) para cada comienzo de las fibras. Uno de tipo refractivo de un material con buenas propiedades ópticas sería el ideal, ya que permitiría aumentar la eficacia del módulo en mayor grado, aumentando la superficie de captación de luz en cada fibra, aspecto que está muy limitado en el módulo construido.

Referencias

- [1] http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_01.htm
- [2] <http://blog.technosun.com/preguntas-frecuentes/que-es-el-factor-de-forma-o-fill-factor/>
- [3] <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>
- [4] <http://www.sitiosolar.com/la-energia-solar-fotovoltaica-de-alta-concentracion-hcpv/>
- [5] <https://montequing.wordpress.com/2013/12/06/la-energia-solar-tambien-necesita-apellidos/>
- [6] <https://www.bsqsolar.com/products/>
- [7] https://www.construmatica.com/construpedia/Radiaci%C3%B3n_Solar
- [8] Pérez-Higueras, P., Muñoz, E., Almonacid, G. y Vidal, P.G. (2011). High Concentrator PhotoVoltaics efficiencies: Present status and forecast. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(4), 1810-1815.
- [9] https://es.wikipedia.org/wiki/Lente_de_Fresnel
- [10] <http://solaraddedvalue.com/es/tecnologias/concentracion-fotovoltaica-o-cpv/>
- [11] Juan P. Ferrer-Rodríguez, Hasan Baig, Eduardo F. Fernández, Florencia Almonacid, Tapas Mallick, Pedro Pérez-Higueras. (2017). Optical modeling of four Fresnel-based high-CPV units. Solar Energy, 155, 805-815.
- [12] <http://solarlits.com/jd/1-2>
- [13] CM Rasero. (2011). Energía solar fotovoltaica. Escuela de organización industrial – Master profesional en Ingeniería y Gestión Medioambiental. – Fuente: <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/19180/energia-solar-fotovoltaica>

[14] K. Shanks, N. Sarmah, J. P. Ferrer-Rodriguez, S. Senthilarasu, K. S. Reddy, E. F. Fernández, T. Mallick, "Theoretical investigation considering manufacturing errors of a high concentrating photovoltaic of cassegrain design and its experimental validation", Solar Energy (2016), 131, pp. 235-245.

[15] https://es.wikipedia.org/wiki/Aberración_cromática

[16] https://www.tendencias21.net/La-UPM-desarrolla-una-lente-para-aumentar-la-eficiencia-de-la-fotovoltaica_a41431.html

[17] https://www.tendencias21.net/La-UPM-desarrolla-una-lente-para-aumentar-la-eficiencia-de-la-fotovoltaica_a41431.html

[18] https://es.wikipedia.org/wiki/Apertura_num%C3%A9rica

[19] http://www.azurspace.com/images/products/DB_3988-00-00_3C42_AzurDesign_EFA_55x55_2014-03-27.pdf

[20] https://es.wikipedia.org/wiki/Impresi%C3%B3n_3D#Modelado_por_deposici%C3%B3n_de_fundente

[21] <http://es.ozgencmachine.com/omrm-125-cortadora-autom%C3%A1tica-de-perfiles-de-aluminio-para-ventanas-monocabezal->

[22] <https://www.bcn3dtechnologies.com/wp-content/uploads/2016/11/Ignis-portada.jpg>

[23] <http://solaraddedvalue.com/es/tecnologias/concentracion-fotovoltaica-o-cpv/>