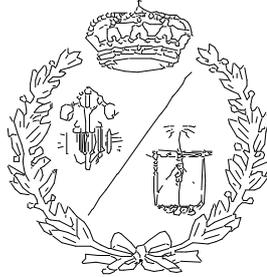


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Máster

**ESTUDIO BASICO DEL RECEPTOR DE
CAVIDAD DE UNA CENTRAL TERMOSOLAR
DE TORRE**

**(Basic study of receptor in solar tower power
plant)**

Para acceder al Título de

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERIA INDUSTRIAL**

Autor: Marta Ortiz de Zárate Bautista

Septiembre - 2016

INDICE GENERAL

MEMORIA.....	2
CALCULOS.....	45
PRESUPUESTO.....	54
ANEXO A: RESULTADOS DEL CAMPO DE HELIOSTATOS.....	63
ANEXO B: RESULTADOS DEL RECEPTOR.....	69

MEMORIA

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	6
RESUMEN DEL DOCUMENTO: DISEÑO DE UNA CENTRAL TERMOSOLAR DE TORRE DE 10 MW	6
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
1 ENERGÍA SOLAR.....	8
1.1 LA RADIACION SOLAR	8
1.2 TECNOLOGÍA ESPECIALIZADA	10
1.2.1 Tecnologías de baja temperatura	10
1.2.2 Tecnologías de media y alta temperatura	10
1.2.3 Almacenamiento.....	12
2 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	13
2.1 CONDUCCIÓN	13
2.1.1 Analogía eléctrica	14
2.1.2 Constante de conductividad térmica.....	15
2.2 CONVECCIÓN.....	16
2.2.1 Coeficiente de transferencia de calor por convección ...	16
2.3 RADIACIÓN	18
2.3.1 Ley de Stefan-Boltzman.....	18
2.3.2 Emisividad	21
2.3.3 Factor de forma	22
3 CAMPO DE HELIOSTATOS.....	24
3.1 DATOS DE PARTIDA.....	24
3.1.1 Orientación de los heliostatos	25
3.1.2 Interferencias entre heliostatos	25
3.2 EFECTO COSENO	27
3.3 REFLEXIÓN DE LOS RAYOS SOLARES.....	27
3.3.1 Método de cálculo	27
4 RECEPTOR.....	35
4.1 GENERALIDADES	35
4.2 FLUIDO CALOPORTADOR	35

4.3	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	36
4.4	MODELOS DE RECEPTOR PLANO	38
4.5	MODELO DE RECEPTOR DE CAVIDAD	39
4.6	ABSORTANCIA Y EMISIVIDAD	39
4.7	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.....	40
4.7.1	Método iterativo	40
4.7.2	Dominios computacionales	41
5	BIBLIOGRAFÍA.....	43

INTRODUCCIÓN

RESUMEN DEL DOCUMENTO: DISEÑO DE UNA CENTRAL TERMOSOLAR DE TORRE DE 10 MW

El presente proyecto es la continuación del que se realizó al finalizar la titulación de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, a continuación se presenta un resumen del mismo con el fin de recordar los datos de partida y los resultados y conclusiones obtenidas.

En primer lugar se describieron los diferentes tipos de centrales termosolares que existen para posteriormente poder seleccionar la más adecuada para este proyecto; estas se diferencian en la posición relativa de la torre donde se aloja el receptor respecto al campo de heliostatos. Finalmente, teniendo en cuenta las localizaciones que se barajaban, todas ellas en el sur de la península ibérica, se seleccionó una central de tipo campo norte, esta decisión se basa en la posición relativa de la localización de la central respecto al ecuador; el recorrido del Sol se observará inclinado hacia el sur, con lo que para optimizar el área de los espejos, estos se situarán todos al norte de la torre.

En el anterior proyecto, titulado "Diseño de una central termosolar de torre de 10 MW", se desarrolló un software con la ayuda del programa de cálculo MatLab, con el fin de calcular el tamaño del campo de heliostatos y la altura de la torre y analizar el comportamiento del conjunto. Todas las características de diseño podían ser especificadas por el usuario; a partir de ellas el programa calculaba el comportamiento del sistema para todos los momentos del año, a partir de estos resultados era posible elegir aquel con un rendimiento óptimo respecto a la inversión necesaria y adaptado a la potencia final deseada para la central.

Seguidamente, estimando de forma razonada los rendimientos de cada una de las partes de la central, conociendo la potencia nominal deseada y las limitaciones del campo, se puede hallar el valor de potencia que es necesario concentrar en el receptor situado en lo alto de la torre.

En dicho proyecto se analizó la eficacia del campo de heliostatos en sus diferentes zonas, y su evolución en el tiempo. El tamaño de campo seleccionado cuenta finalmente con 72 anillos en los que se distribuyen 4596 heliostatos, por otro lado la altura de torre se fijó en 125 m.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el presente documento el análisis en detalle de la central termosolar continua un paso más, se analizará el comportamiento del receptor teniendo en cuenta la distribución de la radiación solar recibida, así como su configuración geométrica, para ello se estudia en el punto de diseño, que será el momento de máximo aporte de potencia solar, a las 12 del mediodía en el día 173 del año, el día del solsticio de verano.

Se va a desarrollar un software informático con la ayuda del programa de cálculo MatLab para determinar la distribución de la radiación a partir del punto donde quedo el problema en el trabajo previo. Además una vez obtenido ese aporte de potencia en el receptor se plantea un análisis mediante elementos finitos de dos configuraciones de receptor, denominadas receptor plano y receptor de cavidad. Los resultados que se obtengan permitirán sacar conclusiones sobre cuál de estas configuraciones resulta más eficaz para incluir en la central de campo norte que se ha diseñado hasta el momento.

1 ENERGÍA SOLAR

El aumento del consumo de energía eléctrica y la dependencia de los combustibles fósiles hace necesaria la búsqueda de alternativas, por ejemplo en la forma de energías renovables, que hagan posible la sostenibilidad del modelo de sociedad actual. Además, este tipo de energías resultan accesibles desde cualquier punto del planeta si se dispone de la tecnología adecuada, lo que favorece una distribución más equitativa.

Una de estas fuentes de energía alternativa es el Sol, situado a una distancia de 150 millones de kilómetros de la Tierra tiene un radio 109 veces mayor que el de esta y está formado por gas a muy alta temperatura. Las reacciones atómicas de fusión nuclear que se producen en su núcleo de forma continuada, convirtiendo átomos de hidrogeno en helio, liberan una gran cantidad de energía que es irradiada en forma de lo que se conoce como rayos solares. Se estima que cada segundo, unos 700 millones de toneladas de hidrogeno reaccionan en el interior del Sol, de los cuales 4,3 millones se transformaran en energía, la cual su vez será emitida en todas direcciones.

Se calcula que la Tierra recibe una cantidad de potencia solar equivalente a $1,7 \cdot 10^{14}$ kW. Además, según las previsiones realizadas hasta el momento, en los próximos 6000 millones de años se estima que el Sol habrá consumido un 10% del hidrogeno que contiene, con lo que puede considerarse una fuente de energía prácticamente ilimitada, gratuita y respetuosa con el medio ambiente.

1.1 LA RADIACION SOLAR

En el apartado anterior se ha planteado un primer valor para la radiación solar recibida por la Tierra, sin embargo esta energía ha de atravesar aún varias capas de atmósfera, donde de nuevo se perderá una parte de ella. Además cabe destacar que no se distribuye de manera uniforme, con lo

que será necesario determinar de forma específica el valor de energía que es posible captar en punto donde se desea situar la central.

Como punto de partida se puede tomar la constante solar, que con un valor de 1367 W/m^2 es el aporte energético que de forma continuada recibe el planeta, a partir de él se irá calculando la energía que va perdiéndose en cada proceso del recorrido hasta llegar a la superficie de los heliostatos de la central.

En primer lugar, en las capas altas de la atmosfera, debido a los procesos químicos que se producen al interactuar con los gases, únicamente dos tercios de la energía recibida en un principio continuarán el recorrido. Seguidamente es necesario tener en cuenta otros factores, como pueden ser la posición respecto al ecuador, el día del año, la hora o el clima.

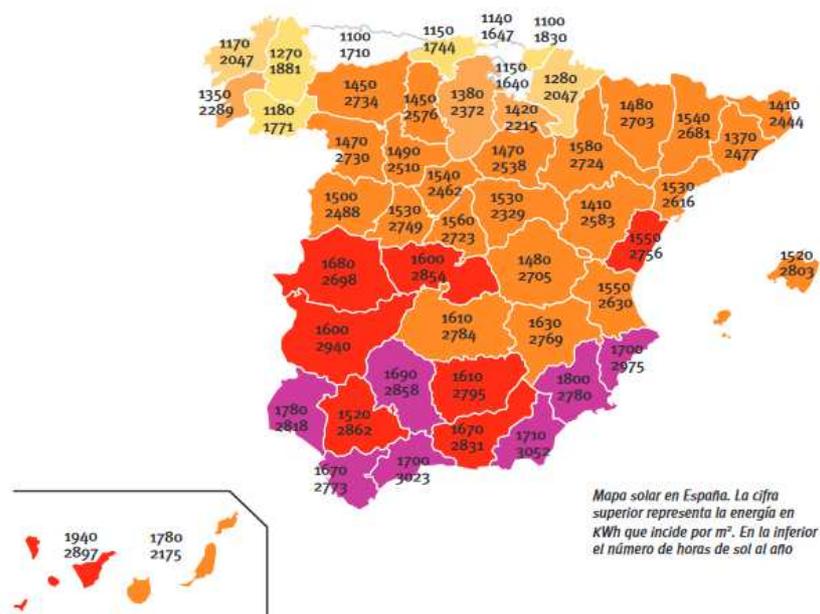


Figura 1: Mapa solar en España. (Fuente IDAE; El Sol, fuente inagotable de energía)

La situación geográfica de nuestro país resulta muy privilegiada en este sentido, contando con un gran número de días sin nubes al año, por lo que recibe una cantidad de radiación considerable, con una media de 1500

kWh incidiendo sobre cada metro cuadrado de terreno. Como se puede observar en la figura siguiente, tanto el aporte de energía como las horas de Sol al año son muy superiores en las provincias del sur de la península.

1.2 TECNOLOGÍA ESPECIALIZADA

La energía solar térmica o energía termosolar se basa en aumentar la temperatura de un fluido mediante la radiación solar. Existen numerosas variantes sobre cómo aprovechar esta energía, que pueden clasificarse principalmente por la temperatura alcanzada por el fluido caloportador y el tipo de sistema receptor utilizado.

1.2.1 Tecnologías de baja temperatura

Este tipo de tecnología se utiliza a nivel doméstico, por lo que suele encontrarse en las azoteas de edificios de viviendas o comerciales. En este sistema el fluido calentado suele ser agua que además no sobrepasa los 100°C y los elementos receptores son captadores planos fijos. Algunos ejemplos de aplicación de esta tecnología pueden ser la producción de agua caliente sanitaria, calefacción o climatización de piscinas.

Dado que cualquier elemento expuesto a la radiación solar experimenta un aumento de temperatura, en este tipo de tecnología no es necesario siquiera concentrar los rayos solares para conseguir la transferencia térmica deseada. Los captadores serán de un color oscuro, para maximizar su absorción de radiación, además serán sellados mediante un cristal que reproducirá a pequeña escala el efecto invernadero que se produce entre la superficie terrestre y la atmosfera, con lo que se conseguirá que la energía captada no escape de nuevo al exterior.

1.2.2 Tecnologías de media y alta temperatura

En el caso de que se desee trabajar con vapor o cerca del punto de ebullición del fluido, los colectores mencionados previamente no ofrecen un buen funcionamiento, con lo que se recurre a otro tipo de tecnologías, enfocadas a temperaturas mayores, que también permiten alcanzar mayores valores de potencia. Con este fin, será necesario concentrar la

radiación solar en una zona o punto por donde se hará circular el fluido, por ejemplo mediante elementos parabólicos.

Para este tipo de instalaciones es recomendable utilizar un fluido auxiliar que permita trabajar a mayores temperaturas, intercambiando posteriormente el calor recogido con agua, para conseguir vapor que moverá la turbina, convirtiendo finalmente la energía del fluido en energía mecánica. Este fluido caloportador puede ser aceite o soluciones salinas, en función de las características y necesidades de la instalación.

En este segundo caso es necesario redirigir la radiación solar captada para poder recogerla correctamente, con lo que los captadores han de tener un sistema de seguimiento del Sol. Los sistemas más utilizados son aquellos en el eje Norte-Sur o Este-Oeste, aunque también existen otros en todas direcciones, que por exceso de complejidad son menos utilizados.

Las instalaciones de media temperatura pueden ser utilizadas para la producción de vapor en la industria o la generación de energía eléctrica en pequeñas centrales, también existen otros ejemplos como la refrigeración mediante energía solar, o la desalinización. Por otro lado, las tecnologías de alta temperatura se enfocan a la producción de electricidad a gran escala, por lo que también se conocen como termoeléctricas.

Las tres configuraciones más comunes para instalaciones de alta temperatura son, discos parabólicos, los cuales redirigen la energía en un punto, cilindros parabólicos, que concentran la energía en una recta por la que se hace pasar el tubo por el que circula el fluido y por último, el sistema utilizado en el presente trabajo, central con receptor central. En este caso se utilizan heliostatos planos que redirigen la radiación a un plano receptor situado en lo alto de una torre.

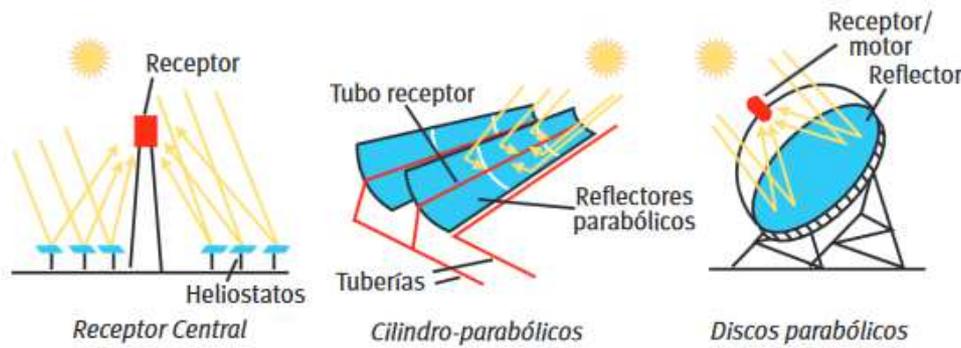


Figura 2: Esquema de los diferentes concentradores de radiación solar

Mediante esta concentración de radiación se pueden alcanzar valores de más de 2000°C , con lo cual será necesario poner especial cuidado en los materiales que la componen. La tecnología que ha logrado un mayor desarrollo es la de receptor central en lo alto de una torre y los sistemas cilíndrico-parabólicos.

1.2.3 Almacenamiento

En cualquiera de los procedimientos mencionados, resulta interesante la posibilidad de acumular calor, ya que la mayor limitación de la energía solar es que solo puede ser captada durante las horas de luz. Teniendo en cuenta estas características, el periodo de almacenamiento ideal sería aquel que permitiese una utilización ininterrumpida de esta fuente de energía y de la central diseñada para su aprovechamiento. Esto no elimina completamente la necesidad de un sistema auxiliar de aporte energético ya que siempre pueden darse periodos demasiado largos sin un aporte de radiación suficiente. En caso de desear cubrir la totalidad de la demanda con energía solar, serían necesarias instalaciones de almacenamiento muy costosas que harían económicamente inviable esta energía renovable.

2 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

En este apartado van a analizarse las formas en las que la energía térmica se transfiere de un medio a otro o viaja por el interior de uno. Este flujo de energía se denomina calor.

El calor es una forma en la que dos cuerpos o distintas zonas de un mismo cuerpo intercambian energía; esto ocurrirá siempre que se encuentren a distinta temperatura. La transferencia de calor se producirá de forma natural del medio de mayor temperatura hasta el medio de menor temperatura, aumentando con ello la de este último y disminuyendo la del primero hasta igualarlas.

La transferencia de calor puede tener lugar mediante tres mecanismos: conducción, convección y radiación. Tal que pueden darse uno o más simultáneamente, dependiendo de cuales sean los medios y/o cuerpos presentes.

2.1 CONDUCCIÓN

Este método de transferencia de calor tiene lugar entre dos cuerpos sólidos opacos en contacto o dos partes de uno mismo.

Según la Ley de la conducción del calor de Fourier, el calor transferido por unidad de tiempos:

$$H = \frac{dQ}{dt} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.1-1)$$

Siendo $k \left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$ la conductividad térmica del material, que representa la capacidad con la que el medio conduce el calor, $A [m^2]$ el área de transferencia de calor, es decir, la superficie de contacto entre los sólidos, y $\frac{dT}{dx}$ el gradiente de temperatura. El signo negativo es necesario ya que el calor se transmite según el gradiente de temperatura decreciente.

Si la conducción tiene lugar entre dos medios, el área de transmisión entre ellos no tiene por qué coincidir con el área de contacto aparente. Esto se debe a que los cuerpos no ajustarán nunca de forma perfecta, con

lo que se introduce entre ellos una fina capa de fluido, estando los cuerpos en contacto únicamente en los picos de sus rugosidades. Consecuentemente el área de transmisión de calor por conducción será mucho menor que el aparente, mientras que también existirá un flujo de calor por convección a través del fluido y otro por radiación entre ambas superficies sólidas. Esta resistencia al paso del calor se puede modelar de forma sencilla estableciendo una analogía con la electricidad que se explica ampliamente en el apartado 2.1.1. En el caso en el que las dos superficies estén en contacto térmico perfecto, la diferencia de temperaturas y por tanto el flujo de calor serán nulos.

Cuando los materiales que se estudian son muy porosos, como fibras o aglomerados, el problema de la resistencia térmica resulta muy complicado, ya que el fluido que rellena los poros intercambia calor por convección con el medio, a lo que se suma además que entre las superficies de los poros se establecerá un flujo de calor radiactivo; por estas razones que resulta más práctico considerar un valor de conductividad térmica k que englobe los tres métodos de transferencia de calor.

2.1.1 Analogía eléctrica

El fenómeno de la conducción puede ser fácilmente analizado y explicado mediante esta analogía con la corriente eléctrica. Ambos fenómenos se basan en un flujo de energía a través de un material, debido a una diferencia en el valor de una segunda magnitud. Es decir, la intensidad sería el parámetro homólogo al calor mientras que la diferencia de potencial eléctrico lo sería a la diferencia de temperatura. Además también se puede comparar la propiedad de los materiales que condicionan estos procesos, la conductividad térmica y la conductividad eléctrica; así como también ambos flujos de energía son directamente proporcionales al área por el que pueden circular, e inversamente proporcionales a la distancia que han de recorrer.

Esta analogía resulta especialmente útil cuando el problema tiene varios cuerpos adyacentes por los que ha de fluir el calor, ya que este puede considerarse como una corriente eléctrica mientras que los cuerpos y sus superficies de contacto actuarían como resistencias a su paso. Esto permite asociar estas resistencias, en serie o en paralelo, de la misma forma que se hace ante un problema de tipo eléctrico.

Únicamente cabe destacar que a diferencia de los electrones que viajan por un hilo de área y recorrido definido, el calor se distribuirá libremente buscando el camino que presente una menor resistencia. Además, si se está considerando un recorrido en una dirección, en el que hay dos cuerpos situados en paralelo, habrá que tener en cuenta que si su diferencia de temperatura es notable, puede darse un flujo de calor entre ellos, que viajaría en dirección perpendicular a la considerada inicialmente, lo que repercutirá en la fiabilidad de los resultados obtenidos con esta analogía.

2.1.2 Constante de conductividad térmica

La conductividad térmica, denominada normalmente con la letra k , es una propiedad de los materiales que no es posible determinar analíticamente excepto en el caso de los gases a muy bajas temperaturas. Los datos con los que se trabajan son valores obtenidos a partir de medidas experimentales que han sido recogidos en tablas. Cabe destacar además que esta propiedad varía según varios factores del problema, sin embargo, en caso de ser función únicamente de la temperatura, puede expresarse como presenta la fórmula (2.1.2-1) a continuación:

$$k = k(T) = k_0(1 + \beta \cdot T) \quad (2.1.2-1)$$

Siendo k_0 el valor de la constante a la temperatura de referencia y β el coeficiente de dilatación del material, que también es un constante. Sin embargo, en la mayoría de las ocasiones puede obtenerse un resultado válido tomando un valor medio, asociado al valor de la temperatura media del sistema.

2.2 CONVECCIÓN

Este mecanismo de transferencia de calor tiene lugar entre un sólido y un medio fluido en contacto. Puede ser de dos tipos, convección forzada, cuando el fluido es obligado a moverse por un medio externo y convección natural en el caso de que el movimiento sea debido únicamente a las variaciones de densidad del fluido causadas a su vez por las variaciones de temperatura. Un modelo de transferencia de calor por convección es la Ley de enfriamiento de Newton:

$$H = h \cdot A \cdot (T - T_F) \quad (2.2-1)$$

Donde $h \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ es el coeficiente de convección, $A [m^2]$ es, de nuevo, el área de transmisión de calor, T_F la temperatura del fluido adyacente y T la temperatura de la pared.

Esta ecuación sirve como definición del coeficiente de convección, su valor ha de ser calculado por métodos experimentales y puede encontrarse normalmente recogido en tablas para los casos más comunes.

En este mecanismo de transferencia de calor hay que tener en cuenta que el medio fluido se encuentra en movimiento constante, debido al rozamiento, su velocidad disminuirá a medida que se encuentre más cerca de la superficie sólida con la que intercambia calor. Por otro lado, el gradiente de temperatura en la superficie, vendrá dado por el gradiente de velocidad del fluido a medida que se aleja de ella, ya que cuanto mayor sea este, mayor será la cantidad de energía que llegará hasta la corriente principal del fluido y es cedida por la pared.

2.2.1 Coeficiente de transferencia de calor por convección

Este coeficiente, también denominado coeficiente de película, tiene como objetivo evitar la resolución en la mayoría de los casos de las ecuaciones diferenciales que describen el fenómeno. Este parámetro no es una propiedad termodinámica sino que es una relación simplificada entre el estado del fluido y las condiciones del flujo, por lo que depende de un

gran número de factores, tales como la media de la temperatura de la superficie sólida, la del fluido sin perturbar, el tipo de superficie y su geometría, las condiciones del fluido y su tipo de movimiento, así como el tipo de convección que está teniendo lugar.

Este coeficiente está relacionado con la capa límite, la más cercana a la superficie del sólido, que es una zona de transición como se aprecia en la figura. Como puede observarse, tanto la velocidad del flujo en dirección x , $u(x,y)$, como su temperatura $T(x,y)$ se ven afectadas por el contacto con la placa.

El espesor de la capa límite, $\delta(x)$, representa dicha zona de afección, ya que abarca desde la superficie hasta la arista externa, donde la velocidad alcanza el 99% del valor que toma en la zona de corriente libre.

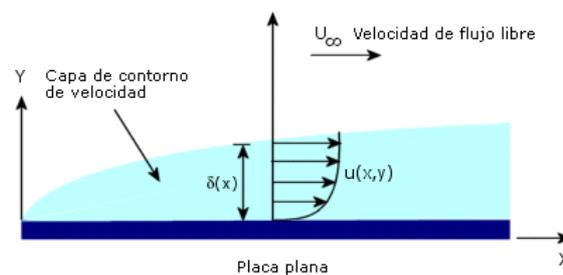


Figura 3: Capa límite en una placa plana

En el caso de la temperatura se da una situación similar, ya que también se produce una transición, sin embargo cabe destacar que el valor del espesor del contorno térmico no es necesariamente el mismo que el del fluido.

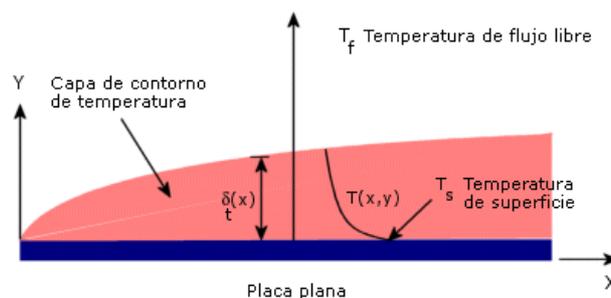


Figura 4: Capa límite térmica en una placa plana

El número de Prandtl es el que rige la relación entre ambos espesores, tal que solo cuando toma el valor unidad serían estos iguales. Este número adimensional es un parámetro del fluido que relaciona la difusión de cantidad de movimiento debida a la viscosidad con la difusión térmica, y puede expresarse de la siguiente forma:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (2.2.1-1)$$

El mecanismo de transferencia de calor en la capa de contorno se considera conducción en la dirección y perpendicular a la placa, a través del fluido estacionario cercano a la pared, siendo igual a la tasa de convección que va desde la capa límite al fluido, lo que puede expresarse de la siguiente forma:

$$h \cdot A \cdot (T - T_f) = -k \cdot A \cdot \left(\frac{dT}{dy} \right)_s \quad (2.2.1-2)$$

Es decir, el coeficiente puede hallarse para una situación concreta, midiendo la tasa de transferencia de calor y la diferencia de temperatura, o el gradiente de temperatura en la superficie y la diferencia de temperatura. Sin embargo estas mediciones requieren de una gran precisión, con lo que deberán ser realizadas en el laboratorio. Otra forma de obtener este coeficiente es a partir de correlaciones teóricas y experimentales.

2.3 RADIACIÓN

Al contrario que en los otros dos casos, este mecanismo de transmisión de calor no requiere de un medio material para propagarse, ya que la energía se transporta en forma de ondas electromagnéticas.

2.3.1 Ley de Stefan-Boltzman

Según la Ley de Planck, en el momento en el que un cuerpo negro se calienta a una temperatura T por encima del cero absoluto, comienza a emitir fotones desde su superficie, los cuales poseerán una distribución de energía determinada que será función de la temperatura de la superficie.

Planck demostró además en 1900 que la potencia emisiva espectral del cuerpo negro a una temperatura T podía expresarse de la siguiente forma, en W/m^3 :

$$E_{b\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (2.3.1-1)$$

Siendo los valores de las constantes:

$$C_1 = 3,7418 \cdot 10^{-16} W \cdot m^2 \quad (2.3.1-2)$$

$$C_2 = 1.4388 \cdot 10^{-2} m \cdot K \quad (2.3.1-3)$$

Seguidamente se plantea la Ley del desplazamiento de Wien, imponiendo la condición del máximo a la Ley de Planck, con el fin de hallar la longitud de onda a la cual la potencia emisiva monocromática alcanza su valor máximo para una temperatura determinada:

$$\frac{dE_{b\lambda}(T)}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \right)_{T=C} = 0 \quad (2.3.1-4)$$

Siendo por tanto el resultado:

$$\lambda_{max} T = 2,898 \cdot 10^{-3} m \cdot K \quad (2.3.1-5)$$

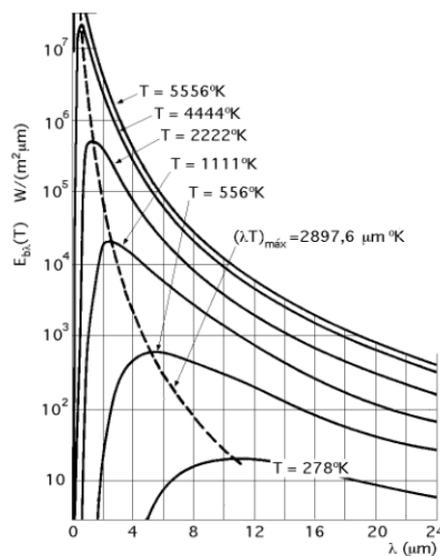


Figura 5: Potencia emisiva espectral del cuerpo negro

La totalidad de energía radiada por unidad de superficie por un cuerpo a una temperatura absoluta T , a todas las longitudes de onda, se denomina poder emisor total. Si la superficie en cuestión corresponde a un cuerpo negro, dicho poder emisor total viene dado por la integral de la distribución de Plank para todas las longitudes de onda:

$$E_b(T) = \int_0^{\infty} E_b(T) d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad (2.3.1-6)$$

El resultado obtenido se conoce como Ley de Stefan-Boltzman, siendo el valor de la constante el mostrado en la expresión 2.3.1-7.

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \quad (2.3.1-7)$$

Debido al pequeño valor de esta constante, la influencia de la transferencia de calor por radiación solo cobrará importancia a partir de los 300K, por contraposición, a temperaturas altas, al ser función de la cuarta potencia de la temperatura absoluta, su importancia es muy grande.

Un cuerpo negro perfecto emite un flujo de calor por radiación a través de toda su superficie, según la siguiente ecuación:

$$H = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (2.3.1-8)$$

Siendo A la superficie del cuerpo expresada en metros cuadrados y T la temperatura de dicha superficie expresada en grados Kelvin. Aunque la emisión es independiente de la temperatura exterior, la medida del flujo energético requiere de una temperatura de referencia, como por ejemplo otro medio que la reciba, y de esta forma obtener la transferencia neta. Por lo tanto se plantea un cuerpo A , que se encuentra en el interior de un recinto, que es el segundo cuerpo al que denominaremos B , ambos pueden considerarse superficies negras; para estas condiciones, la transferencia de calor neta irradiada por A se puede expresar de la siguiente forma:

$$H_{\text{neta}} = \sigma \cdot A_A \cdot (T_A^4 - T_B^4) \quad (2.3.1-9)$$

Este método de transferencia de calor tendrá una gran relevancia a altas temperaturas, debido al exponente al que se encuentran elevadas, con lo que puede hacer que los otros métodos resulten despreciables.

Sin embargo es necesario tener también en cuenta otros factores que afectan a la transferencia de energía por radiación, modelizando el material de los cuerpos presentes y su geometría relativa.

2.3.2 Emisividad

La emisividad de un radiador imperfecto o cuerpo gris, representa el porcentaje de radiación emitida respecto al valor que hubiera sido radiado si el cuerpo hubiese sido negro. Por lo tanto, únicamente en el caso de un radiador perfecto el valor de la emisividad sería la unidad, a continuación se presentan en la tabla 1, valores para diferentes superficies:

Material	Emisividad
Metales en estado pulido	0,01 a 0,08
Metales tal como se reciben (mates)	0,1 a 0,2
Óxidos cerámicos	0,25 a 0,7
Pinturas especiales	0,4 a 0,8

Tabla 1: Valores de la emisividad de los materiales

Por otro lado es necesario tener en cuenta que los cuerpos también absorben energía radiada por otros, al igual que ocurre con la energía radiada, la absorbida vendrá dada por el valor de absorción del la superficie del material, que será un porcentaje de la que absorbería el cuerpo negro. Estas dos propiedades están muy relacionadas. Como se observa en la tabla, puede modificarse esta característica para determinado material mediante una capa de pintura en su superficie, esto resultará normalmente más práctico ya que permite obtener un cuerpo con unas características radiantes muy cercanas a las del cuerpo negro,

mientras que a nivel estructural, de maquinabilidad o coste, se mantienen también propiedades aceptables.

2.3.3 Factor de forma

Es necesario tener en cuenta la relación geométrica que puede existir entre dos cuerpos, ya que únicamente en el caso de que uno de ellos envuelva totalmente al otro y ambos fuesen negros, podría considerarse que toda la energía emitida por uno es absorbida por el otro.

La geometría del problema se modeliza con un coeficiente denominado factor de forma, que tiene una interpretación similar a la emisividad, ya que representa el porcentaje de radiación que saliendo de un cuerpo llega al otro, del total de radiación saliente.

Tomando como ejemplo el cuerpo gris A temperatura T_A , suponiendo que se encuentra encerrado dentro de un cuerpo negro B; la energía emitida por el cuerpo gris se podría expresar como se describe en la expresión:

$$H_{emitida} = \varepsilon_A \cdot \sigma \cdot A_A \cdot T_A^4 \quad (2.3.3-1)$$

Por otro lado, la energía neta transferida desde el cuerpo anterior al cuerpo negro a temperatura T_M :

$$H_{neta,A-M} = \varepsilon_A \cdot \sigma \cdot A_A \cdot (T_A^4 - T_M^4) \quad (2.3.3-2)$$

En el caso en el que ninguno de los cuerpos fuese un radiador perfecto, pero existiera entre ellos una relación geométrica determinada, la energía transferida neta sería:

$$H_{neta,A-M} = F_{AM}^* \cdot \sigma \cdot A_A \cdot (T_A^4 - T_M^4) \quad (2.3.3-2)$$

Siendo F_{AM}^* un factor de forma que depende de las emisividades y geometrías relativas de los cuerpos presentes.

La determinación de los factores de forma si la relación entre las superficies es sencilla, puede hacerse a partir de graficas donde los datos de entrada son las relaciones entre las dimensiones de las superficies.

3 CAMPO DE HELIOSTATOS

El campo de heliostatos es una de las partes más importantes de la central ya que puede llegar a representar más de la mitad del su presupuesto total, por ello es necesario que su diseño se adapte lo máximo posible a las condiciones de la localización y el tamaño de la central.

La función del campo es captar la radiación que alcanza la superficie terrestre y reflejarla, haciendo que llegue concentrada al plano frontal del receptor, esto implica que los espejos han de tener un sistema de seguimiento del Sol, ya que su posición tendrá de variar con el movimiento del astro. El programa con el que se simula el movimiento de los heliostatos y la radiación que reflejan ya fue desarrollado en el documento previo a este, con lo que en el presente trabajo el punto de partida es hallar la distribución de dicha radiación concentrada en el receptor a partir de la posición de los heliostatos.

3.1 DATOS DE PARTIDA

El análisis detallado del campo de heliostatos se realizó en el proyecto previo que se ha resumido en la introducción del presente documento. En este apartado se profundizará en los resultados obtenidos para determinar con claridad cuál es el punto de partida.

Las conclusiones alcanzadas fueron relativas al área útil de los heliostatos y por tanto el rendimiento del conjunto del campo, para un determinado tamaño y altura de torre. Los espejos se encuentran distribuidos en anillos concéntricos en la base de la torre, en forma de corona circular.

El grueso del problema consiste en analizar las interferencias que se producen entre los heliostatos ya que será el factor que reduzca el área útil del campo en mayor medida. Otro factor de gran relevancia es la altura de la torre, ya que cuanto mayor sea esta, menor serán las interferencias mencionadas. Posteriormente será posible determinar que

numero de espejos, distribución sobre el terreno y altura de torre son necesarios para satisfacer las necesidades energéticas de la central, teniendo en cuenta todos los rendimientos de sus parte intermedias.

3.1.1 Orientación de los heliostatos

En primer lugar es necesario determinar la posición de los heliostatos en cada momento ya que como se ha mencionado previamente han de seguir la trayectoria solar. Suponiendo que el terreno es horizontal, la posición del Sol puede determinarse mediante los ángulos detallados en la tabla 2, los cuales permiten definir el vector \vec{s} .

δ	Declinación. Posición angular del Sol al mediodía solar respecto al plano del ecuador.
λ	Latitud. Se considera positiva en el hemisferio norte.
τ	Angulo horario. Se considera negativo antes del mediodía solar y positivo después.

Tabla 2: Ángulos que definen la posición solar

Estos ángulos están relacionados tanto con la posición del campo de heliostatos como con el momento del día y el día del año que se está estudiando que serán conocidos.

La orientación de la superficie del espejo se define mediante su vector perpendicular, denominado \vec{n} , que recibe los rayos solares con la dirección del vector \vec{s} , y han de ser reflejados al centro del receptor según la dirección del vector \vec{r} , que es además la del segmento que une el centro del heliostato con el centro del receptor. Estos vectores han de cumplir la Ley de la reflexión de la luz, con lo que el vector normal a la superficie del heliostato, se ha de encontrar en la bisectriz de los otros dos.

3.1.2 Interferencias entre heliostatos

Uno de los factores más importantes que afectan al rendimiento del campo son las interferencias entre heliostatos. Estas pueden clasificarse en dos grandes grupos, las sombras y los apantallamientos. Ambas

pueden definirse como la proyección del plano de un heliostato sobre otro. En el caso de las sombras, son los rayos solares los interceptados antes de llegar a su destino, que en este caso es la superficie del heliostato sombreado, por ello la proyección a realizar será con la dirección del vector \vec{s} . Por otro lado, en el caso de los apantallamientos, son los rayos que ya han sido reflejados por el heliostato apantallado los que chocan contra la superficie trasera de otro heliostato, no alcanzando por lo tanto la superficie del receptor.

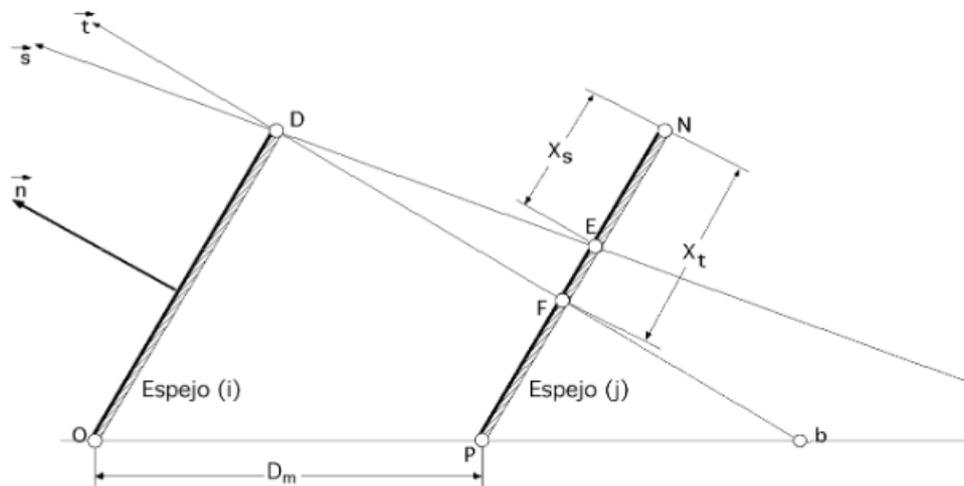


Figura 6: Representación de las sombras y apantallamientos

En la figura 6 se representan los perfiles de dos heliostatos del campo, como los vectores asociados al primero de ellos. El segundo espejo se encuentra tanto sombreado, en su superficie correspondiente al segmento \overline{PE} , como apantallado en la correspondiente al segmento \overline{PF} , Resultando por tanto que el área reducida notablemente, a la que corresponde al segmento x_s .

A la vista de la figura, se puede observar que cuanto menor sea el ángulo que forman vector \vec{n} y la horizontal, mayores serán las interferencias. Además, la posición de este ángulo se relaciona directamente con la posición del Sol y del receptor, es decir, cuanto mayores sean las alturas de estos elementos, menores serán las interferencias entre los heliostatos del campo.

3.2 EFECTO COSENO

Es necesario realizar una corrección en el valor del área de los heliostatos ya que el estudio que se realiza de la radiación solar es sobre una superficie perpendicular a su vector de incidencia, lo que no es el caso de los heliostatos. El efecto coseno se debe a que los rayos solares no inciden perpendicularmente en el espejo, con lo que el área útil visible para ellos se verá reducida; siendo el factor de reducción el coseno del ángulo de incidencia.

3.3 REFLEXIÓN DE LOS RAYOS SOLARES

En la mayoría de los casos resulta aceptable considerar los rayos solares como un conjunto de vectores, todos ellos con una misma dirección, sin embargo esto sólo es estrictamente correcto si la luz procede de un punto. En este caso, los rayos proceden de una esfera, el Sol, con un diámetro de $1,4 \cdot 10^6$ m y a una distancia de la Tierra de $1,5 \cdot 10^8$ m, con lo que llegan con un ángulo de apertura de $\xi = 32'$ y se reflejarán de la misma forma. Esto quiere decir que la radiación llega de forma más dispersa al receptor y será necesario tenerlo en cuenta a la hora de realizar el diseño para evitar perder parte de ella.

En resumen, aunque en un primer momento se definan los haces de luz salientes de la superficie del heliostato y con forma de prisma con la otra base en el plano frontal del receptor, tendrán en realidad forma de pirámide, siendo la base mayor la correspondiente al receptor. Además el ángulo que forman los planos que la delimitan es de $16'$.

3.3.1 Método de cálculo

A continuación se explican ampliamente las subrutinas desarrolladas en el software MatLab para determinar y estudiar el comportamiento de la radiación recibida en la instalación.

En primer lugar será necesario definir los sistemas de coordenadas con los que se va a trabajar, se han definido con la finalidad de simplificar los

cálculos, ya que permitirán expresar tanto vectores como puntos de forma más sencilla.

Sistema de coordenadas	Sentidos de los ejes (X,Y,Z)	Origen
General	(Este, Norte, Vertical)	Base de la torre
Heliostato	(Lado del heliostato, lado del heliostato paralelo al terreno, normal al plano del heliostato)	Centro del plano del heliostato
Receptor	(Lado del receptor, lado del receptor paralelo al terreno, perpendicular al plano frontal del receptor)	Centro del plano frontal del receptor

Tabla 3: Sistemas de coordenadas utilizados

Recepción de los rayos

El punto de partida de este trabajo es la radiación solar reflejada por los heliostatos del campo, es necesario calcular como alcanza el receptor, es decir, que distribución de valores tiene en cada uno de los planos donde incide. En primer lugar, se ha tomado como denominador común el plano frontal del heliostato, como plano de entrada para la potencia, y será la distribución en dicho plano la que se calcule como comienzo.

Este cálculo se llevará a cabo mediante una subrutina programada en el software MatLab de la forma explicada a continuación.

Variables de entrada	Definición
\vec{i}	Vector con la dirección de los rayos reflejados
x_s, y_s	Coordenadas del área útil del heliostato, expresadas en el sistema de referencia del propio heliostato
a	Numero del heliostato que se está estudiando

<i>Base_heliostato</i>	Vectores base del sistema de referencia del heliostato
<i>Base_Plr</i>	Vectores base del sistema de referencia del receptor
<i>Pc</i>	Coordenadas de la situación del centro de cada heliostato sobre el terreno
<i>Ht</i>	Altura a la que se encuentra el centro del receptor
<i>xr, yr</i>	
<i>q</i>	Número de puntos en el lado de la malla que cubre el plano frontal del receptor

Tabla 4: Variables de entrada de la subrutina

Variables de salida	Definición
<i>RRa</i>	Matriz de los valores de radiación que aporta el heliostato a al receptor
<i>X,Y</i>	Matrices que contienen las coordenadas de los puntos de la malla que cubre el plano frontal del receptor

Tabla 5: Variables de salida de la subrutina

Cabe destacar como se han estructurado las variables de salida para evitar perder información. Se ha definido una malla sobre el plano frontal del receptor, que cuenta con q^2 nodos equidistantes, cada uno con una superficie de influencia de $100/q^2\text{m}^2$. Las coordenadas de los puntos de la malla se encuentran definidas en el sistema de referencia del receptor, se calculan siendo l el valor del lado de la malla en metros.

Utilizando la función de la expresión 3.1.1-1 se consigue un vector de elementos equidistantes en el intervalo determinado por los límites establecidos, en este caso centrado en el plano del receptor; y cuyo número de elementos coincide con q .

$$vr = \text{linspace}\left(-\frac{l}{2}, \frac{l}{2}, q\right) \quad (3.1.1-1)$$

Partiendo del vector ya definido se puede crear una malla mediante la siguiente función:

$$[XY] = \text{meshgrid}(vr, vr) \quad (3.1.1-2)$$

La malla se compone en realidad de un conjunto de mallas superpuestas, tantas como heliostatos en el campo, ya que en cada una de ellas se va a almacenar el valor y la distribución del aporte de un espejo. Esto permite obtener la radiación en el plano frontal, simplemente sumando los elementos de las mallas superpuestas; pero además, en caso de desear trasladar esa radiación a otros planos si el receptor tiene una configuración diferente, se conoce la dirección con la que llega cada porción de potencia, con lo que es posible determinar el recorrido que realizaría tras incidir en el plano frontal.

Esta subrutina trabaja con un heliostato cada vez, y su correspondiente área útil para el momento del día que se estudia, por ello el primer paso es obtener las coordenadas en el espacio de los vértices de dicha superficie. Dos de estas coordenadas son datos de entrada de la subrutina, expresadas en el sistema de referencia del heliostato, siendo necesario únicamente determinar aquella coordenada perpendicular al plano. La posición del centro del heliostato se tiene definida en el sistema de referencia general, por lo que en primer lugar se expresa en el sistema de referencia del heliostato:

$$Pca = \text{Base_heliostato}(:, :, a) \setminus Pc(a, :)' \quad (3.1.1-3)$$

Una vez hallado el valor en el sistema de referencia del heliostato, se puede componer una matriz con los valores de las coordenadas de los vértices de la siguiente forma:

$$PH_{SRH} = [xs; ys; \text{ones}(1, \text{length}(xs)) \cdot Pca(3)] \quad (3.1.1-4)$$

Se comenzará trabajando en el sistema de coordenadas general, cuyo origen de coordenadas se encuentra en la base de la torre; el cambio de coordenadas se realiza mediante la matriz de cambio e base, es necesario hacerlo punto por punto, tal que:

$$PH_{SRG}(:, k) = Base_heliostato(:, :, a) \cdot PH_{SRH}(:, k) \quad (3.1.1-5)$$

Una vez se han determinado las nuevas coordenadas en el sistema de referencia general, se las proyecta según el vector \vec{t} sobre un plano paralelo al plano frontal del receptor que además contiene al punto central de la superficie del heliostato, denominado Pra . Esto simplificará notablemente la posterior proyección de los puntos sobre el plano receptor.

Seguidamente es necesario cambiar de nuevo la base en la que se expresan las coordenadas de los vértices, pasándolas al sistema de coordenadas del receptor. Esto permite trasladar la superficie útil de heliostatos simplemente sumándole el valor correspondiente a la tercera coordenada, la distancia entre el centro del heliostato y el centro del receptor en dicha dirección.

A continuación es necesario ampliar la superficie de energía reflejada, ya que como se ha mencionado previamente, los haces de luz tienen un ángulo de apertura de $16'$. Con este fin se van a definir los vectores unitarios con la dirección de los lados del polígono que forma el área útil. Si se multiplica vectorialmente cada uno de estos vectores por el vector perpendicular al plano del receptor, se obtiene un tercero que tiene la dirección en la cual hay que desplazar el lado del polígono para ampliarlo, no se puede olvidar que será necesario que tengan el módulo adecuado, que siendo d la distancia entre el centro del receptor y el centro del heliostato expresada en el sistema de referencia asociado al primero, el valor de dicho módulo puede determinarse como se plantea en la fórmula (3.1.1-6). Para realizar la ampliación, a cada uno de los vértices se le sumaran los dos vectores correspondientes a los lados que llegan a él.

$$amp = d / \tan(16') \quad (3.1.1-6)$$

Por último se analizará que puntos de la malla (X, Y) se encuentran en el interior del polígono de radiación reflejado por cada heliostato, expresado en el sistema de referencia del receptor y ampliado (xp, zp) , para lo que se utiliza la siguiente subrutina:

$$[inon] = inpolygon(X, Y, xp, zp) \quad (3.1.1-7)$$

La salidas de esta función son matrices de las mismas dimensiones que aquellas que definen las coordenadas de los puntos de la malla, con lo que cada uno de sus elementos va asociado a uno de dichos puntos, tomarán el valor unidad los elementos situados en la posición de los nodos queden dentro del polígono en el caso de *in*, o en el límite en el caso de *on*. La suma de todas estas matrices, para todos los heliostatos, dará lugar a la distribución de la potencia en el plano frontal del receptor expresado como veces que incide un heliostato en este punto. Cabe destacar que previamente a la suma, se aplica a cada matriz el coeficiente que le corresponde a su heliostato, ya que no todos tienen la misma reducción de área útil, en función del ángulo con el que incide el Sol en ellos. Finalmente se obtiene la matriz *RRe*, donde la letra e hace referencia a que se trata de la parte eficaz.

Tratamiento de los resultados

Una vez tenidos en cuenta los coeficientes reductores para cada heliostato, puede considerarse todas las veces que un heliostato incide en un punto del receptor lo hace con el mismo valor, con lo que el total de la radiación puede dividirse entre el número de incidencias. El valor obtenido podrá luego multiplicarse por la matriz *RRe*, obteniéndose finalmente los vatios que llegan a cada nodo.

Es necesario tener en cuenta que la potencia recogida corresponde a la superficie total útil de los espejos del campo, expresada en metros cuadrados, por la densidad de potencia que recibe la superficie terrestre por metro cuadrado; dicha energía se encontrara distribuida en un área mayor en el receptor debido a la apertura que sufre en haz de luz en su recorrido. Esta distribución permite que aunque por simplicidad se han considerado todos los heliostatos redirigiendo la energía al centro del receptor, la distribución de esta energía reflejada sea más uniforme por todo el plano.

Distribución de la radiación por la cavidad

Esta subrutina se ejecutará únicamente en el caso de que el receptor sea de cavidad.

Variables de entrada	Definición
<i>prf</i>	Profundidad de la cavidad del receptor expresada en metros.
<i>RR</i>	Matriz en la que se almacenan los valores de radiación para cada punto del receptor y heliostato.
<i>T</i>	Matriz de los vectores con la dirección de los rayos reflejados para cada heliostato.
<i>Base_Plr</i>	Matriz que contiene los vectores del sistema de coordenadas del receptor, expresado en el sistema de coordenadas general.
<i>Ht</i>	Altura del receptor expresada en metros.
<i>q</i>	Número de puntos de la malla sobre el receptor en 10 m de longitud.
<i>X,Y</i>	Matrices que contienen las coordenadas de los puntos de la malla sobre el plano.
<i>l</i>	Lado del plano frontal del receptor expresado en metros cuadrados.

Tabla 6: Variables de entrada de la subrutina

Las variables de salida de esta subrutina son las matrices que contienen las coordenadas de los puntos de las mallas sobre los planos este y superior, así como las matrices análogas a ellas que contienen los valores de radiación correspondientes. No es necesario estudiar el plano oeste porque en el punto de diseño, a las 12 del mediodía, la distribución de la radiación es simétrica; por otro lado el plano situado en la parte inferior no recibe apenas radiación con lo que tampoco se estudia.

Hasta ahora se ha considerado el plano frontal del receptor, como aquel donde llegan los rayos reflejados, esto resulta cierto en el caso del receptor plano. Sin embargo, en el caso del receptor de cavidad será necesario calcular como se redistribuyen dichos rayos por los planos que lo forman.

Es ahora cuando resulta de gran utilidad disponer del área donde incide cada heliostato por separado, ya que de esta forma es posible saber con que dirección continuará dicha radiación su recorrido.

En primer lugar se definen los planos que delimitan el receptor de cavidad mediante un vector perpendicular a ellos y un punto al que contienen. Como ya se ha mencionado anteriormente, sobre el plano frontal del receptor se ha definido una malla de puntos, para la que se dispone de dos matrices con las coordenadas de dichos puntos en el plano y una tercera con el valor de radiación que incide sobre él para cada uno de los heliostatos. El análisis se va a realizar atendiendo a un heliostato cada vez, denominado a , y sucesivamente a cada uno de los puntos de su matriz de radiación correspondiente.

Primeramente se determina si el espejo a incide o no sobre dicho punto, en caso afirmativo se plantea la recta que pasa por él con la dirección del vector \vec{t}_a . En segundo lugar se analizan las intersecciones de dicha recta con los planos del receptor, seleccionando aquella que se encuentre dentro del dominio de este.

Sobre los planos laterales se ha definido también una malla de puntos con la misma densidad que la del plano del fondo, tal que puede determinarse sobre que nodo incide el punto que se está analizando. De esta forma se ha conseguido distribuir de forma tan fidedigna como permite la densidad de la malla, la radiación incidente por el receptor.

4 RECEPTOR

4.1 GENERALIDADES

El receptor de la central termosolar de torre central es el lugar donde se concentran los rayos solares reflejados por el campo, y calientan un fluido caloportador que posteriormente intercambiará calor con el agua que recorrerá el ciclo Rankine.

Su tamaño se ha calculado bajo el principio de captar la totalidad de la radiación en todos los momentos del año.

La complejidad del análisis de la transferencia de calor en el receptor hace necesario su cálculo por medio de un método de elementos finitos, se ha decidido utilizar el programa informático SolidWorks.

Se han planteado dos modelos de receptor, la finalidad es comparar su funcionamiento y determinar cuál de ellos se adapta mejor al campo seleccionado y resulta más eficiente en las condiciones planteadas. Ambos reciben la radiación en su plano frontal, que tiene las mismas dimensiones y orientación en los dos casos, el calor fluirá desde él hasta la parte trasera del receptor, distribuyéndose hasta los tubos por donde circula el fluido.

4.2 FLUIDO CALOPORTADOR

En un principio se planteó utilizar agua para realizar este intercambio de energía ya que esta presenta ventajas como su precio, alto calor específico, falta de toxicidad e infalabilidad, pudiendo además eliminar si se deseara uno de los intercambios de calor, abaratando aun más el precio de la instalación. Sin embargo, al trabajar a temperaturas por encima de los 100°C, el agua se encontraría en estado gaseoso, su presión aumentaría notablemente con la temperatura; y esto sometería a la instalación a mucho estrés, encareciendo además su precio, y anulando por tanto el abaratamiento mencionado previamente.

Por todas estas razones, se ha decidido trabajar con sodio en estado líquido, ya que tiene unas excelentes propiedades de transferencia de calor, debido sobre todo a su alto calor específico. Sus características son las siguientes:

Temperatura de evaporación (K)	1156,09
Temperatura de fusión (K)	371,1
Cp (J/kg K)	1404

Tabla 7: Propiedades fluido caloportador

Cabe destacar que el calor específico es función de la temperatura, con lo que se ha tomado un valor medio que ofrecerá resultados válidos para el problema.

4.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Este método ha adquirido una gran importancia a la hora de hallar la solución a problemas relacionados con la ingeniería que hasta hace poco no era posible resolver utilizando métodos tradicionales; esto obligaba a utilizar prototipos sobre los que realizar ensayos, lo cual encarecía y alargaba en el tiempo notablemente el proceso.

El método de elementos finitos, en adelante MEF, permite realizar un modelo matemático del sistema que se estudia, siendo esto más sencillo, económico y fácil de modificar que un prototipo. Sin embargo no se puede olvidar que debido a la hipótesis básica del método, este no deja de ser aproximado, con lo cual seguirán siendo necesarios los prototipos, aunque podrán acercarse más al diseño final desde el primero, reduciendo por tanto su número y coste.

La idea básica del MEF es la división del medio continuo en un conjunto de pequeños elementos, conectados entre sí por puntos denominados nodos. Estos elementos rigen su comportamiento por las mismas ecuaciones que el medio continuo original. Mediante esta aproximación se consigue pasar de un cuerpo real con infinitos grados de libertad a un modelo con un

número de ellos finito, cuyo comportamiento se modela con un sistema de ecuaciones que pueden ser lineales o no.

En cualquier sistema que se desee analizar, es posible distinguir entre el dominio, que es el espacio geométrico en el cual se va a analizar el sistema; las variables conocidas que se denominan condiciones de contorno y las incógnitas, que son las que se desea conocer después de que hayan actuado sobre el sistema las condiciones de contorno ya mencionadas.

En función de las dimensiones del problema, los elementos mencionados pueden ser puntos (caso lineal), líneas (caso bidimensional) o superficies (caso tridimensional), tal que el conjunto de dichos elementos se aproxime lo máximo posible al dominio original. Los elementos se definen además por un número discreto de puntos denominados nodos que los conectan entre sí; será sobre estos nodos donde se materialicen las incógnitas del problema, que serán los grados de libertad de cada uno de los nodos, denominando el estado en el que se encuentran. Planteando por tanto la ecuación diferencial que determina el comportamiento del medio continuo original para el elemento, se llegará a formulas que relacionarán el comportamiento en el interior de este con el valor que tomarán los grados de libertad nodales. Esa transición se realiza por medio de la interpolación.

El problema se plantea de forma matricial debido a la facilidad con la que se manejan este tipo de sistemas mediante el ordenador. Conocidas las ecuaciones que modelan el comportamiento del elemento, se ensamblan obteniendo un conjunto de ecuaciones algebraicas, cuya resolución nos proporciona los valores de los grados de libertad del sistema.

Antes de comenzar con este tipo de método es necesario tener en cuenta una serie de factores planteados a continuación. En primer lugar, aunque la geometría del problema real es conocida, a la hora de realizar el análisis es necesario simplificarla lo máximo posible teniendo en mente cual es el objetivo del cálculo. La mayoría de los detalles resultan normalmente

irrelevantes, con lo que lo único que aportan es un consumo mayor de tiempo de cálculo y espacio en memoria. Además será interesante buscar simetrías en el problema, con el fin de reducir aún más el proceso de resolución.

Seguidamente es importante determinar qué condiciones de contorno conocidas influyen de forma apreciable al sistema que se está estudiando ya que de nuevo una elección correcta optimizará el tiempo de cálculo y la memoria utilizada.

Por último es importante tener una idea previa del resultado que se ve a obtener, ya que esto permitirá detectar incoherencias y errores en el planteamiento más eficaz y rápidamente.

4.4 MODELOS DE RECEPTOR PLANO

Este modelo consta de una placa plana cuadrada de 15 mm de espesor, con tubos de 20 mm de diámetro interior y 30 de exterior, separados 40 mm entre sí de centro a centro, adosados mediante dos cordones de soldadura a su parte trasera. En la cara delantera incidirá la radiación, que se transmitirá por conducción hasta llegar al fluido que circula por los tubos.

En este modelo es el más simple de los dos, contando únicamente con una placa situada en el plano frontal ya mencionado donde se recibe la radiación. Al contar únicamente con esta superficie, todo lo que ella radie debido a las altas temperaturas que alcanzará serán pérdidas, así como todo lo que no absorba. Por otro lado se tienen en cuenta las pérdidas por convección, ya que el aire no tiene ningún impedimento para circular libremente, con lo que alcanza una mayor velocidad y se produce un intercambio de calor mayor.

Tratando de limitar estas pérdidas se ha planteado el otro modelo de receptor, que cuenta con paredes laterales a los cuatro lados de la placa principal.

4.5 MODELO DE RECEPTOR DE CAVIDAD

El segundo modelo planteado es el de cavidad, con una profundidad de 2,5 m, se colocan otra serie de tubos con las mismas características que los anteriores en las paredes laterales.

Al igual que en el caso anterior, la radiación se recibe en el plano frontal, que en este caso no cuenta con una pared física, y de ahí se distribuye a las paredes reales del receptor. En este caso la radiación llegara desde un principio más distribuida por la superficie, además las paredes laterales establecerán un intercambio radiactivo con la del fondo ya que esta se encontrara a mayor temperatura; esto da lugar a una disminución de las perdidas ya que la radiación emitida por la pared del fondo sigue siendo alta, pero parte de ella es absorbida por la laterales. Por otro lado, las perdidas por convección también observan una disminución ya que el flujo de aire no puede circular de forma tan libre como en el caso anterior, con lo que el intercambio de calor será en principio menor.

4.6 ABSORTANCIA Y EMISIVIDAD

Una vez que la radiación alcanza la superficie del receptor, interesa que este absorba el mayor porcentaje posible, es decir, que su absortancia tenga el mayor valor posible, para lo que se utilizará normalmente pintura negra. El valor que se ha tomado para la superficie del receptor será de 0,8, es decir, absorberá el 80% de la radiación que absorbería un cuerpo negro con sus mismas características y condiciones.

Por otro lado hay que tener en cuenta que la emisividad, es decir el porcentaje de lo que radiaría el cuerpo negro que radia realmente la superficie que se está estudiando. Al contrario que en el caso anterior, interesa que sea lo menor posible ya que las pérdidas por radiación serán proporcionales a ella.

4.7 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

El comportamiento de los modelos del receptor se analizará mediante el método de los elementos finitos, utilizando el programa de simulación SolidWorks. La fiabilidad y exactitud de la solución dependerá notablemente de la definición de la malla, cuanto más tupida sea esta, sobre todo en lugares más intrincados. En contraposición, cuanto mayor sea el número de nodos que la forman, mayor será el tiempo de resolución y la memoria necesaria del equipo informático. Debido a las limitaciones de los sistemas disponibles, no es posible analizar el conjunto del receptor, con lo que es necesario plantear ciertas hipótesis a partir de análisis parciales del problema que posteriormente serán comprobadas.

4.7.1 Método iterativo

Al no ser posible analizar el conjunto, será necesario componer los resultados de los dominios parciales estudiados para obtener conclusiones sobre el receptor. Esto aumenta la complejidad del proceso notablemente.

En primer lugar se realizará una estimación de las pérdidas del receptor al exterior por radiación, en la superficie o conjunto de superficies, donde recibe el flujo de calor recogido por los espejos. Para ello se toma una temperatura de la superficie constante T_1 que será necesario estimar, a partir de ella puede determinarse el valor de las pérdidas. Cabe destacar que debido al rango de temperaturas con las que se trabaja, la convección resulta despreciable ya que la radiación tomará valores muy elevados. El valor de dichas pérdidas se sustraerá del valor de flujo de radiación entrante, obteniendo el flujo de calor neto.

Seguidamente se puede realizar el primer análisis donde se obtendrá el mapa de temperaturas del sistema, así como los flujos de calor extraídos por los tubos. A partir de los resultados se ajusta el valor de la temperatura estimada en la superficie del receptor, se calculan de nuevo las pérdidas y repite el análisis. Este proceso de iteraciones se detendrá cuando el valor del error sea aceptable. Este cálculo tendrá en cuenta

únicamente la conducción en el sólido y el intercambio de calor con el fluido que circula por el interior de los tubos.

A continuación, se estudia el conjunto del receptor, y su interacción con el aire ambiente. En este caso el análisis será externo, con lo que pueden eliminarse los tubos con el fin de simplificar el modelo. Será necesario introducir de nuevo el valor del flujo de calor entrante por radiación, así como el flujo saliente por los tubos hallado en el análisis anterior. Será necesario aislar el modelo de receptor del exterior por su zona trasera ya que no deben producirse pérdidas al exterior. Este cálculo sirve como comprobación de la estimación de pérdidas que se realizó en un comienzo, que ha de coincidir con la suma del calor radiado por la superficie mas el calor desalojado por el flujo de aire al exterior, en función de la diferencia entre la estimación y el dato obtenido será necesario o no realizar una nueva iteración.

4.7.2 Dominios computacionales

Como ya se ha mencionado previamente, no es posible realizar el análisis completo del modelo planteado debido a su alta complejidad, por tanto un paso importante es determinar en qué zonas van a analizarse, ya que a partir de los resultados obtenidos en ellas ha de ser posible extrapolar el comportamiento del conjunto del sistema.

Se ha decidido tomar por tanto volúmenes que abarquen la longitud total de los tubos para poder observar la evolución tanto en la temperatura del fluido caloportador como de la superficie de la placa correspondiente; además se han tomado grupos de tres tubos, estando las paredes del dominio situadas en el plano medio de la separación. Con ello se pretende contar con una zona en el tubo central no perturbada, además de los datos de distribución que ofrece el analizar más de un único tubo.

En resumen, se ha decidido tomar tres dominios de tres tubos, equidistantes entre sí, en cada una de las superficies del modelo, por lo tanto en el receptor plano se cuenta con tres volúmenes de análisis en

total, con unas dimensiones de 10 m de alto, 0,12 m de ancho, y la profundidad necesaria para abarcar la totalidad de la correspondiente al conjunto, es decir, 0,045 m.

En el caso del modelo del receptor de cavidad, el número de dominios analizados asciende a nueve, de nuevo tres de ellos se encuentran uniformemente distribuidos en el plano del fondo, con las mismas dimensiones que en el caso anterior; tres de los seis restantes se sitúan en el plano orientado al este, de nuevo uniformemente distribuidos, mientras que los tres últimos se sitúan a continuación de estos analizando la evolución del fluido por el plano situado en la parte superior.

5 BIBLIOGRAFÍA

CARNICERO, A. [en línea]: Introducción al método de elementos finitos. [Madrid]: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas, 2003. [Consulta: 11 de septiembre 2016]
http://www.iit.comillas.edu/~carnicero/Resistencia/Introduccion_al_MEF.pdf

CONESA, Juan A. [en línea]: Mecanismos de transmisión de calor (conducción, convección, radiación). [Alicante]: Universidad de Alicante, 2013. [Consulta: 13 de julio 2016]. <http://hdl.handle.net/10045/34475>

ESCRIBANO RÓDENAS, Miguel [en línea]: El análisis por elementos finitos: Una metodología muy reciente en economía. [Madrid]. Universidad Complutense de Madrid. [Consulta: 6 de septiembre 2016].
<http://www.uv.es/asepuma/XIV/comunica/117.pdf>

FERNANDEZ DIEZ, Pedro [en línea]: Ingeniería térmica y de fluidos. [Consulta: 12 de septiembre 2016]. Radiación térmica: Fundamentos y factores de forma.
<http://files.pfernandezdiez.es/IngenieriaTermica/Teoria/PDFs/17.pdf>

INZUNZA, Juan [en línea]: Capítulo 14: Mecanismos de transferencia de calor. [Concepción, Chile]: Departamento de geofísica, Universidad de Concepción, 2012. [Consulta: 11 de septiembre 2016]
<http://old.dgeo.udec.cl/~juaninzunza/docencia/fisica/cap14.pdf>

LÓPEZ-CÓZAR, José Manuel [en línea]: Energía solar térmica. [Madrid]: Instituto de la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2006. [Consulta: 24 de mayo 2016].
http://dl.idae.es/Publicaciones/10374_Energia_solar_termica_A2006.pdf

MILIARIUM [en línea]: Propiedades térmicas de los materiales. [Consulta: 8 de septiembre 2016].
<http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>

SOL-ARQ, [en línea]: Características superficiales. [Consulta: 12 de septiembre 2016]. <http://www.sol-arq.com/index.php/caracteristicas-materiales/caracteristicas-superficiales>

SOLIDWORKS, Help [en línea]: Coeficiente de transferencia de calor por convección. [Consulta: 11 de septiembre 2016].
http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection_Topics/Convection_Heat_Coefficient.htm

CÁLCULOS

INDICE

1	CAMPO DE HELIOSTATOS	47
2	RECEPTOR	48
2.1	RECEPTOR PLANO	48
2.1.1	Determinación de las pérdidas por radiación	49
2.2.1	Determinación de las pérdidas por radiación	50
2.3	FLUIDO CALOPORTADOR	51
2.3.1	Receptor plano	52
2.3.2	Receptor de cavidad	53

1 CAMPO DE HELIOSTATOS

El campo de heliostatos cuyo tamaño ya fue determinado, tiene como características básicas, 4596 heliostatos repartidos en 72 anillos con centro en la base de la torre y una altura de torre de 125 m.

Por otro lado el punto de diseño será momento más favorable del año será el mediodía del solsticio de verano, es decir, las 12 del mediodía del día 173 del año.

Para estos datos, ejecutando el programa informático diseñado en el proyecto previo, se obtiene un valor de área útil de espejos de 63104 m², lo que teniendo en cuenta que se ha considerado un valor de potencia incidente de 800 W/m², resulta un valor de potencia recogida por el campo de 50483200 W.

El valor que se había estimado para el rendimiento del ciclo Rankine de la central es de un 21%, y que la potencia eléctrica de la central es de 10W, es necesario contar con 47,6 MW salientes del receptor.

A la vista de los datos expuestos, será necesario calcular el rendimiento del receptor, es decir, las pérdidas que en él se producen por diferentes mecanismos térmicos que han sido expuestos en la memoria del presente proyecto.

2 RECEPTOR

En este proyecto se han planteado dos modelos para el receptor que se desarrollan a continuación, con la finalidad de comparar su funcionamiento.

El análisis de dichos modelos se llevará a cabo mediante un programa de simulación, sin embargo debido a las limitaciones de los equipos informáticos disponibles mencionadas previamente, no es posible realizar el cálculo del modelo completo. En cambio se tomarán algunas porciones representativas y se extrapolarán los resultados al conjunto, hay que tener en cuenta que el programa no va a considerar flujo de calor atravesando los límites del dominio, es decir, las paredes que lo delimitan son adiabáticas. Estos dominios computacionales abarcarán siempre tres tubos, su delimitación se situará siempre en el punto medio de la distancia que separa dichos tubos con los siguientes, con el fin de cometer el menor error posible.

2.1 RECEPTOR PLANO

El receptor plano se compone de una placa plana cuadrada de 10 m de lado y 15 mm de espesor, en uso arte delantera recibe la radiación solar y en su parte trasera se encuentran soldados los tubos por los que pasa el fluido caloportador. Dichos tubos tienen un diámetro exterior de 30 mm e interior de 20 mm, y la distancia entre ellos es de 40 mm de centro a centro, por lo que podrá instalarse un número total de 251 tubos.. Tras los tubos se situará una capa de aislante suficiente para evitar pérdidas de calor.

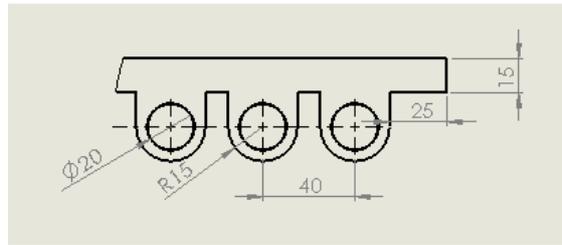


Figura 7: Tubos y placa en el recetor plano

2.1.1 Determinación de las pérdidas por radiación

En este primer caso, el receptor emite radiación al medio exterior según la siguiente expresión:

$$Q_{emitido} = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_{exterior}^4) \quad (2.1-1)$$

Siendo:

A (m²)	Área del receptor	10
ε	Emisividad	0,8
$\sigma \left(\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right)$	Constante de Stefan-Boltzman	$5,67 \cdot 10^{-8}$
T_r (K)	Temperatura media superficial	Estimada

Tabla 8: Datos térmicos del problema

La determinación de la temperatura media de la placa del receptor se hará de forma iterativa, empezando por un valor estimado, calculando el valor del flujo de calor saliente en forma de pérdidas y ejecutando con esos datos el modelo virtual. El resultado de dicho modelo incluirá un mapa de temperaturas que se comparará con el valor estimado, y se ajustará este último con el fin de afinar el cálculo todo lo necesario hasta alcanzar el valor de error fijado.

2.2 RECEPTOR DE CAVIDAD

Este segundo caso consta de nuevo de una placa plana con las mismas características que el receptor plano, a la que se rodea con cuatro placas

mas formando una cavidad, la profundidad será aquella que determine el usuario, sin embargo para este proyecto se ha elegido 2,5 m. Al igual que en el caso anterior, en la placa del fondo podrán instalarse 251 tubos con las mismas características; por otro lado, manteniendo las dimensiones de los tubos usados previamente así como las distancias entre ellos, en la zona lateral podrán instalarse un total de 62 tubos.

2.2.1 Determinación de las pérdidas por radiación

Los intercambios de calor que se producen en este caso son algo más complejos, ya que el fondo del receptor se encuentra a una temperatura mayor que las placas laterales, tanto por estar recibiendo una mayor cantidad de potencia como por encontrarse más protegido del medio externo, mientras que estas se van a considerar todas ellas a un valor constante e igual para todas.

Bajo estas consideraciones, se produce intercambio e calor entre el fondo del receptor y las placas laterales, así como de ambos con el medio exterior.

Factores de Forma

Como ya se ha explicado, los factores de forma modelan el porcentaje de radiación que saliendo de un cuerpo llega al otro, en función de la relación geométrica que existe entre ambos. En este caso existe intercambio de calor entre chapas que comparten un lado, y se encuentran soldadas con un ángulo de 90°; los datos de la gráfica que corresponden son los siguientes, expresados en metros.

Factor de forma	A	B	C
F Fondo-Lateral	10	10	2,5
F Lateral-Fondo	2,5	10	10

Tabla 9: Datos para entrar en la gráfica de los factores de forma

A continuación, se muestra la gráfica correspondiente a dicha relación para calcular el factor de forma.

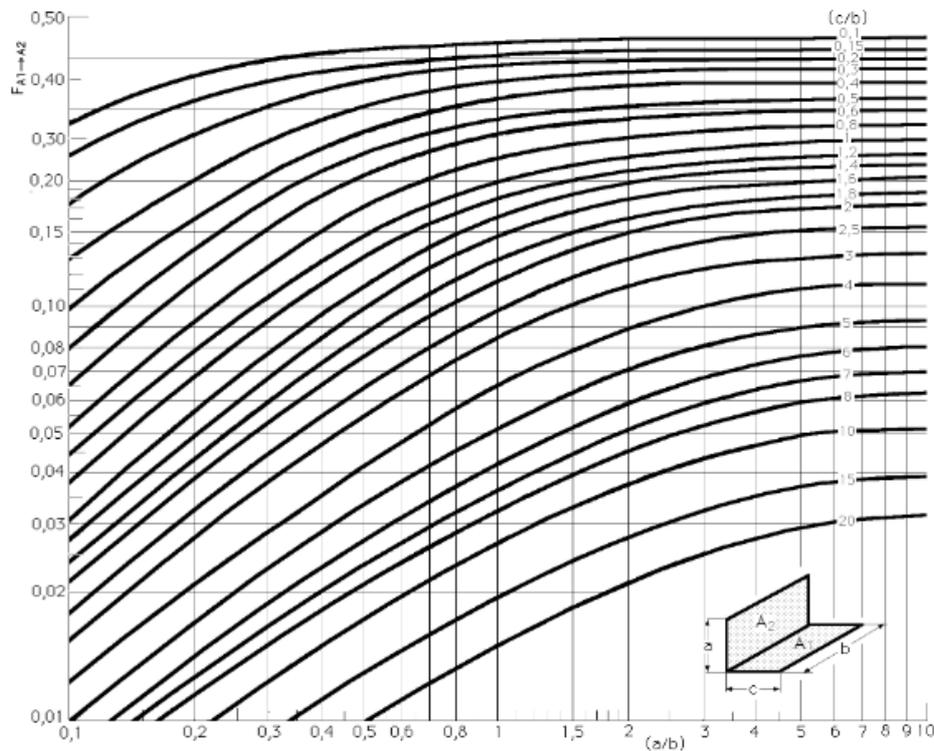


Figura 8: Gráfica del factor de forma entra dos rectángulos con una arista común formando un ángulo de 90°. (Fuente: <https://lopezva.files.wordpress.com/2011/10/cap19.pdf>)

Entrando en la gráfica con los valores de la tabla presentada previamente, se obtienen los siguientes resultados:

F Fondo-Lateral	0,1
F Lateral-Fondo	0,4

Tabla 10: Valores de los factores de forma obtenidos de la gráfica

2.3 FLUIDO CALOPORTADOR

El fluido va a ser el encargado de extraer el calor del receptor, sabiendo que es necesario que dicho flujo de potencia ha de ascender a unos 40 MW, puede realizarse la siguiente estimación:

$$Q_{extraido} = \dot{m}_{tubo} \cdot n \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2.3-1)$$

Sabiendo que:

\dot{m}_{tubo}	Flujo másico por cada tubo (kg/s)
n	Numero de tubos
c_p	Calor específico (J/kg·K)
ΔT	Salto térmico del fluido (K)

Tabla 11: Magnitudes relativas al fluido

Siendo todos los datos conocidos a excepción del flujo másico por cada tubo y el salto térmico, puede determinarse el producto que han de dar estos para cumplir las condiciones.

2.3.1 Receptor plano

En este modelo los tubos se encuentran situados en un único plano que recibe el total de la radiación solar, a partir de la formula (2.3-1), sustituyendo los valores conocidos detallados a continuación se obtiene la relación:

$$\dot{m}_{tubo} \cdot \Delta T = 133.75 \text{ kg} \cdot \text{K/s} \quad (2.3.1-1)$$

Para lo cual planteando un valor de salto térmico de unos 220K, se obtiene un flujo másico por cada tubo de 0,6 kg/s. Cabe destacar que la temperatura a la que se introduce el sodio es de 473 K, con lo cual se espera una salida a 693 K aunque no hay que perder de vista que se trata

de un cálculo aproximado con lo que la temperatura se encontrara cercana a ese valor pero no será igual en todos los dominios.

2.3.2 Receptor de cavidad

En este segundo caso, la radiación se reparte por los cinco planos que delimitan el receptor.

Plano	Fondo	Este	Superior
Radiación recibida (%)	96	1,6	0,2

Tabla 12: Valores de radiación en cada uno de los planos

El receptor de cavidad recibe la misma cantidad de energía que el plano, sin embargo esta se reparte entre la zona del fondo y la zona lateral. Al analizar la distribución obtenida de la radiación entrante, se observó que la mayor parte de ella, un 96%, incide sobre el plano del fondo, mientras que los planos situados al este y oeste reciben un 1,6% cada uno y el plano de la parte superior un 0,2%. Teniendo en cuenta estos datos, se ha decidido que por los 62 tubos laterales pase una cantidad del flujo másico tal que alcance la misma temperatura que el fluido que pasa por el fondo, es decir:

$$Q_{\text{extraido_lateral}} = 50 \text{ MW} \cdot 3,2\% = 1,6 \text{ MW} \quad (2.3-3)$$

$$\dot{m}_{\text{tubolateral}} = \frac{Q_{\text{extraido_lateral}}}{n_{\text{lateral}} \cdot c_p \cdot \Delta T} = 0,08 \text{ kg/s} \quad (2.3-4)$$

De esta forma podrán encontrarse ambos flujos en un colector y mezclarse sin comprometer con ello la temperatura de salida del flujo final. Esto tubos laterales permiten recoger parte de la radiación emitida por el plano del fondo que recogen el resto de planos.

PRESUPUESTO

1	PRESUPUESTO DE EJECUCION DE MATERIAL	56
1.1	TERRENO	56
1.2	RECEPTOR	57
1.3	HELIOSTATOS.....	58
1.4	ELEMENTOS DE LA CENTRAL.....	59
1.5	SUMA DE PARTIDAS	60
2	PRESUPUESTO DE EJECUCION POR CONTRATA	61
3	PRESUPUESTO PARA CONOCIMIENTO DE LA ADMINISTRACION	62

1 PRESUPUESTO DE EJECUCION DE MATERIAL**1.1 TERRENO**

Elemento	Cantidad (m ²)	Precio unitario (€/ud)	Precio total (€)
Compra de terreno	250000	8	2000000
Acondicionamiento de la superficie	250000	10	2500000
		Suma total	<hr/> 4500000

1.2 RECEPTOR

Elemento	Cantidad	Precio unitario (€/ud)	Precio total (€)
Hormigón	50000	60	3000000
Tubos	4400	30	132000
Material refractario	800	30	24000
Material aislante	900	15	13500
Chapas de acero inoxidable	700	40	28000
		Suma total	<hr/> 3197500

1.3 HELIOSTATOS

Elemento	Cantidad	Precio unitario (€/ud)	Precio total (€)
Hormigón	9200	60	552000
Espejos	4596	2500	11490000
Mecanismos de dirección	4596	2000	9192000
Estructura	4596	350	1608600
		Suma total	<hr/> 22842600

1.4 ELEMENTOS DE LA CENTRAL

Elemento	Cantidad	Precio unitario (€/ud)	Precio total (€)
Conjunto de bombas de circulación	1	135000	135000
Intercambiador de calor	1	3600000	3600000
Turbina y condensador	1	3825000	3825000
Circuito de tuberías	1	720000	720000
		Suma total	<hr/> 8280000

1.5 SUMA DE PARTIDAS

Partida	Precio (€)
Terreno	4500000
Receptor	3197500
Heliostatos	22842600
Elementos de la central	8280000
Suma total	<hr/> 38820100

El presupuesto de ejecución de material asciende a treinta y ocho millones ochocientos veinte mil cien euros.

Santander 29/09/2016

El ingeniero Industrial

2 PRESUPUESTO DE EJECUCION POR CONTRATA

Presupuesto de ejecución de material	38820100 €
Gastos generales (17%)	5046613 €
Beneficio (6%)	23292060 €
	<hr/>
IVA (21%)	46195919 €
Presupuesto de ejecución por contrata	55897602 €

El presupuesto de ejecución por contrata asciende a cincuenta y cinco millones ochocientos noventa y siete mil seiscientos dos euros.

Santander 29/09/2016

El ingeniero Industrial

3 PRESUPUESTO PARA CONOCIMIENTO DE LA ADMINISTRACION

Presupuesto de ejecución por contrata	55897602 €
Gastos de redacción del proyecto	2000 €
Gasto de tramitación del proyecto	2500 €
Presupuesto para conocimiento de la administración	<hr/> 55900562 €

El presupuesto para conocimiento de la administración asciende a cincuenta y cinco mil millones novecientos mil sesenta y dos euros.

Santander 29/09/2016

El ingeniero industrial

ANEXO A: RESULTADOS DEL CAMPO DE HELIOSTATOS

ÍNDICE

1 COMPORTAMIENTO DEL CAMPO DE HELIOSTATOS.....	65
1.1 VARIACIÓN DEL AREA ÚTIL.....	65
1.2 SOMBRAS Y APANTALLAMIENTOS	68

1 COMPORTAMIENTO DEL CAMPO DE HELIOSTATOS

A continuación, se plantea un resumen de los resultados obtenidos en el proyecto 'Diseño de una central termosolar de 10 MW con receptor central' con el fin de ilustrar la introducción al presente documento. Esta recopilación de resultados va a dividirse en dos grandes apartados, el primero de ellos se centrará en el campo como conjunto, mientras que el segundo analiza los heliostatos individualmente.

Como puede observarse en la figura siguiente, siempre será posible representar únicamente la mitad del campo debido a la simetría del problema. La distribución de los heliostatos es simétrica, su comportamiento solo lo será también a las 12 del mediodía, sin embargo, dicha hora también puede considerarse un "eje de simetría" ya que una mitad del campo n horas antes del mediodía, será simétrica a la otra mitad n horas después.

1.1 VARIACIÓN DEL AREA ÚTIL

El área útil del campo se ve afectada por varios factores, entre ellos la altura de la torre, la posición del Sol y la distancia entre heliostatos. Esto se debe a que todos estos factores harán que las interferencias entre los espejos aumenten o disminuyan en el área que aporta cada uno de los espejos y por tanto también el total. En la posición del Sol intervienen dos factores, el día del año y la hora del día.

Se toma como referencia el punto de diseño, 12 del mediodía el día 173 del año, para la altura de torre que se ha seleccionado finalmente, es decir 125 m, se puede observar en la figura 8 una representación del campo, tal que las tonalidades rojizas representan aquellas zonas con unos heliostatos con mayor área útil, y las zonas representadas en tonos más fríos, heliostatos que cuentan con una menor área útil.

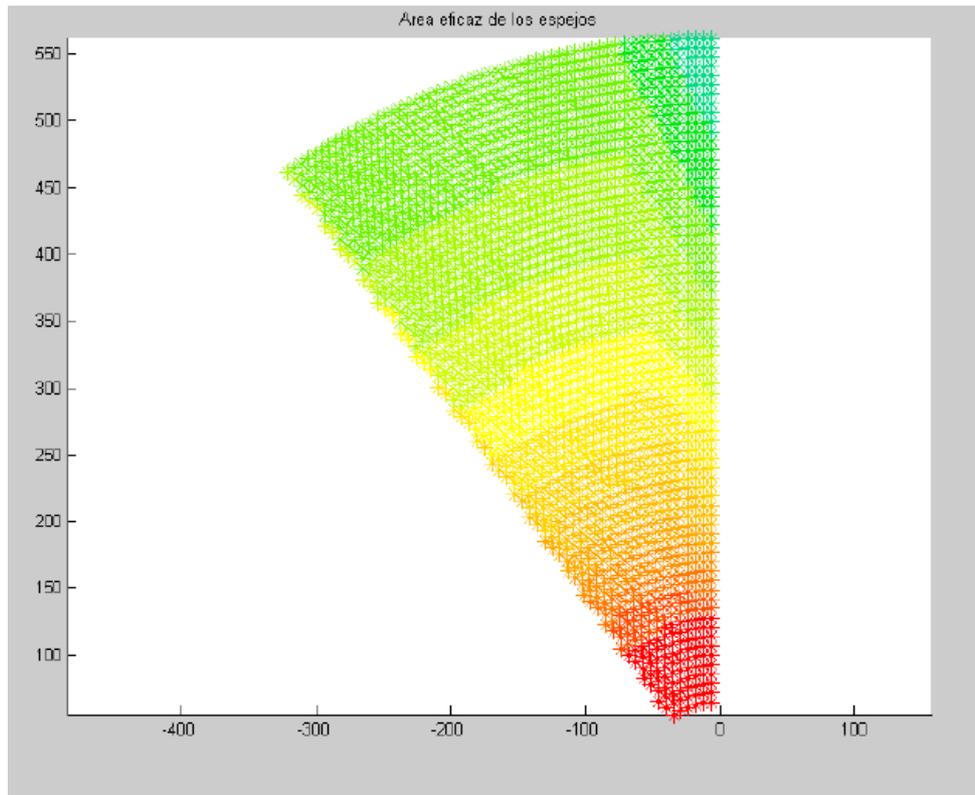


Figura 9: Representación esquemática de la mitad oeste del campo de heliostatos para una altura de torre de 125 m, en el punto de diseño

Como ya se ha explicado en el apartado 3.1.2, a mayor ángulo del vector \vec{n} , normal a la superficie de los heliostatos, con la horizontal, mayor será también el área útil de estos, esto se ve confirmado en la figura, ya que aquellos más cercanos a la torre, con un vector \vec{t} más vertical, contarán también con un \vec{n} más vertical y mayor área útil, además de interferir menos con los que se encuentran tras ellos.

En los siguientes apartados se van a presentar las imágenes obtenidas como resultado del software, que muestran cómo afectan al área útil del campo los factores mencionados.

En primer lugar, en la figura nueve puede apreciarse la variación que se produce al variar la altura del campo en 100 m, como ya se mencionó, al aumentar la altura del receptor, aumenta el área eficaz.

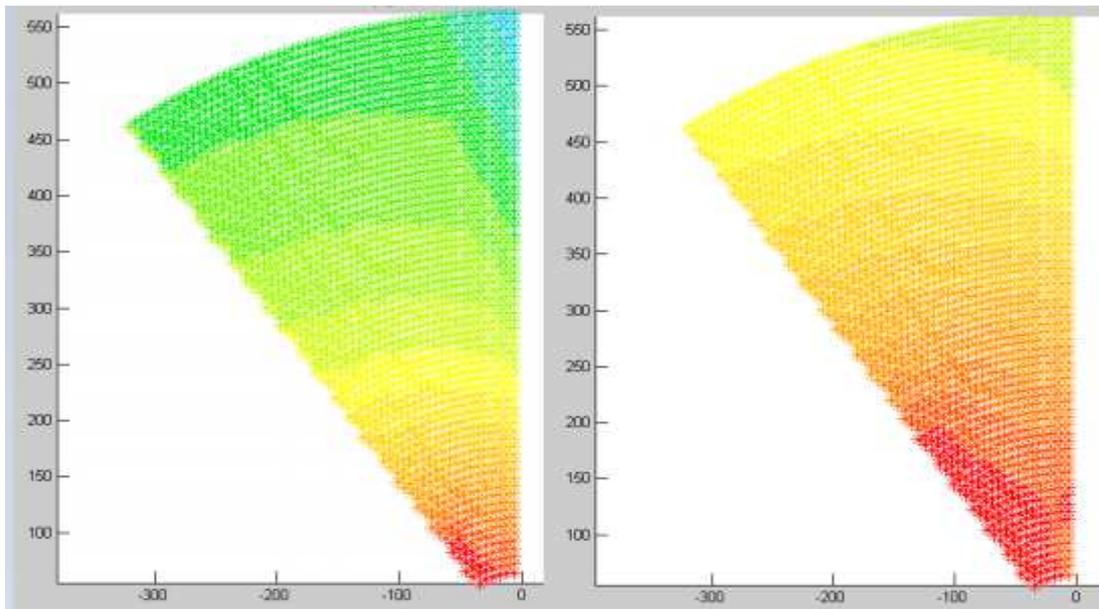


Figura 10: Representación del área útil de la mitad Este del campo de heliostatos el día 173 a las 10 am. A la izda. para una altura de torre de 100m, a la dcha. para una altura de 200m

En segundo lugar, en la figura 10 se puede ver como la altura del Sol sobre el ecuador afecta al área eficaz de los espejos, el día 173, solsticio de verano, dicha altura es máxima, mientras que el día del solsticio de invierno, 356, la altura es mínima. Esta altura se mide mediante la declinación.

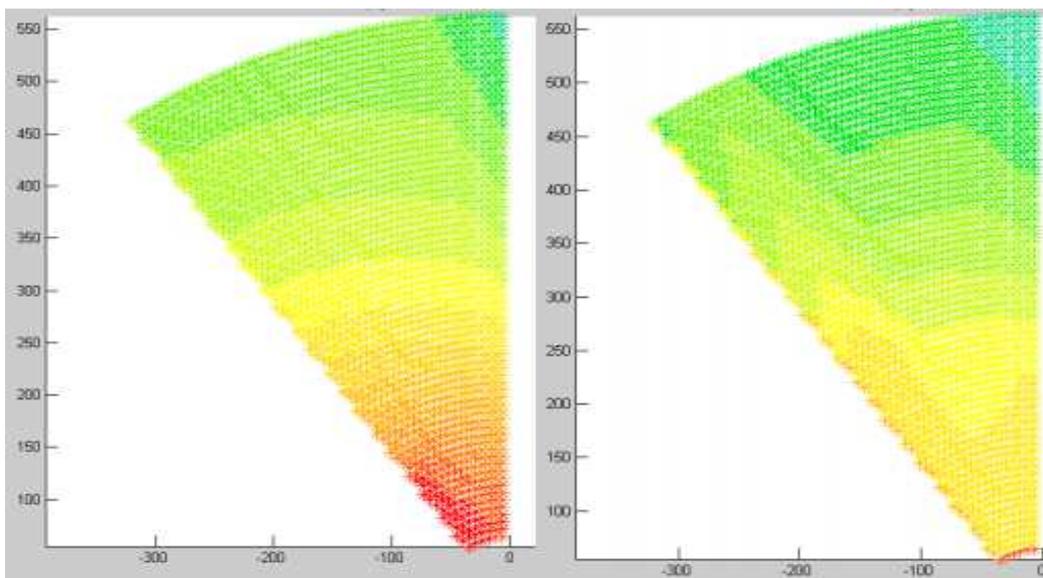


Figura 11: Representación del área útil de la mitad Este del campo de heliostatos a las 10 am, para una altura de torre de 125m. A la izda. el día 173, a la dcha. el día 356.

1.2 SOMBRAS Y APANTALLAMIENTOS

Estas interferencias pueden observarse en las siguientes figuras, de forma individual para cada heliostato. Las sombras se han representado en verde y los heliostatos en rojo, sobre el área del espejo.

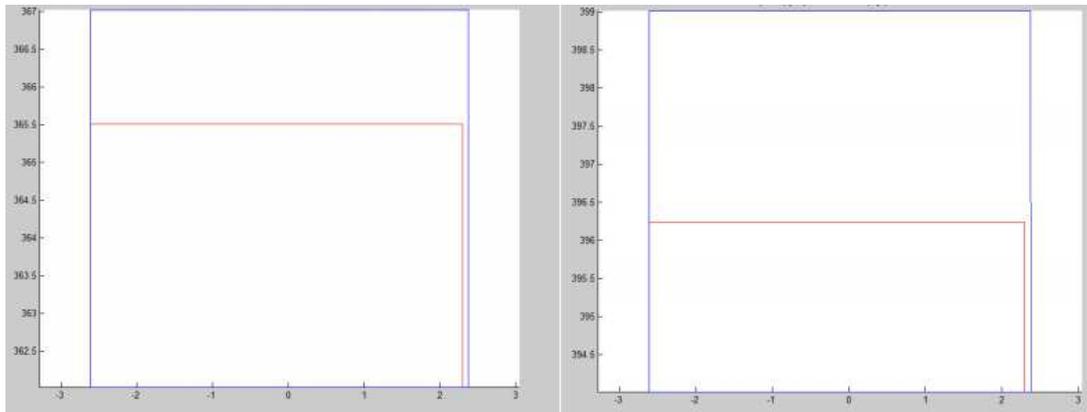


Figura 12: Representación del área de un heliostato (nº 2000), el día 173 del año, a las 12 am. A la izda. para una altura de 100 m y a la izda. para una altura de 200 m

Como era de esperar según lo explicado, en la figura 11 puede apreciarse como el apantallamiento que sufre el espejo es notablemente mayor al disminuir la altura de la torre.

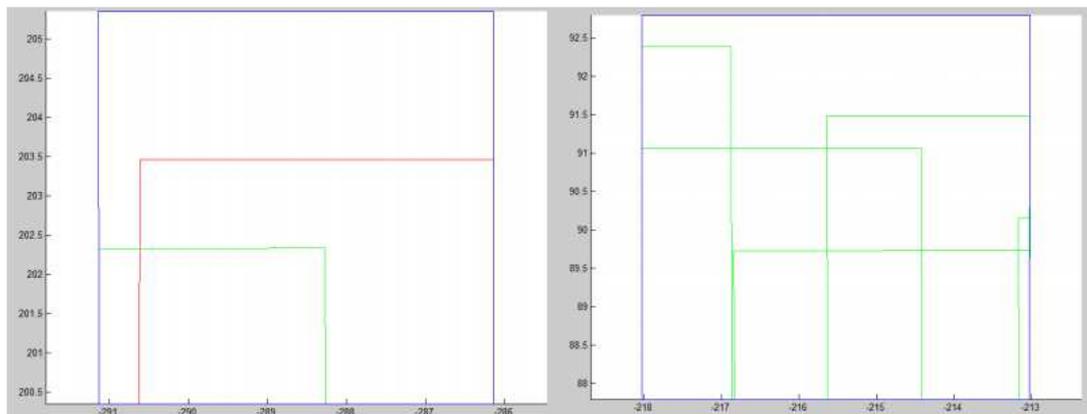


Figura 13: Representación del área de un heliostato (nº 1500), a las 4 pm, para una altura de torre de 125 m. A la izda. para el día 173 y a la dcha. para el día 356.

De igual forma que ocurría en el apartado 1.1, en la figura 12 puede observarse como las interferencias aumentan notablemente al encontrarse el Sol a una menor altura sobre el ecuador.

ANEXO B: RESULTADOS DEL RECEPTOR

ÍNDICE

1 COMPORTAMIENTO DEL RECEPTOR.....	71
1.1 ANÁLISIS DE LA CIRCULACIÓN DEL FLUIDO CALOPORTADOR	71
1.1.1 Receptor plano	72
1.1.2 Receptor de cavidad	74
1.2 ANÁLISIS DEL CONJUNTO DEL RECEPTOR Y SU ENTORNO ..	76
1.2.1 Receptor plano.....	78
1.2.2 Receptor de cavidad	82
2 CONCLUSIONES	85

1 COMPORTAMIENTO DEL RECEPTOR

En el presente apartado se van a analizar los resultados obtenidos a partir del método de elementos finitos del receptor. Como ya se ha mencionado en el desarrollo teórico, se han planteado dos modelos con diferentes configuraciones geométricas, además, debido a la complejidad del problema, ha sido necesario dividirlo en dos partes, ya que no era posible resolverlo en su totalidad con los medios informáticos disponibles.

1.1 ANÁLISIS DE LA CIRCULACIÓN DEL FLUIDO CALOPORTADOR

La primera parte del problema analiza la potencia absorbida por los tubos por donde circula el fluido, a partir del flujo de radiación neto entrante, es decir, la radiación reflejada por el campo, menos una estimación de las pérdidas. Para este análisis se analizan solo algunas zonas del receptor, que abarcarán siempre a longitud total de tres tubos.

Este análisis requiere una estimación de las pérdidas, por lo que es necesario estimar también una temperatura media para la superficie de la placa frontal, el objetivo del análisis ha requerido de algunas iteraciones hasta afinar este resultado.

Mallado

Uno de los factores más importantes para obtener un buen resultado por el método de elementos finitos es el mallado del sistema. Este no tiene por qué ser uniforme, sino que debe adaptarse a la complejidad de cada una de las partes del modelo con el fin de optimizar los recursos disponibles a la vez que se obtiene un resultado válido y coherente.

En los dos casos que se están estudiando la malla se ha definido de forma similar, sin embargo cabe destacar que en el receptor de cavidad esta se ha refinado en las aristas internas como se puede ver en la figura 13.

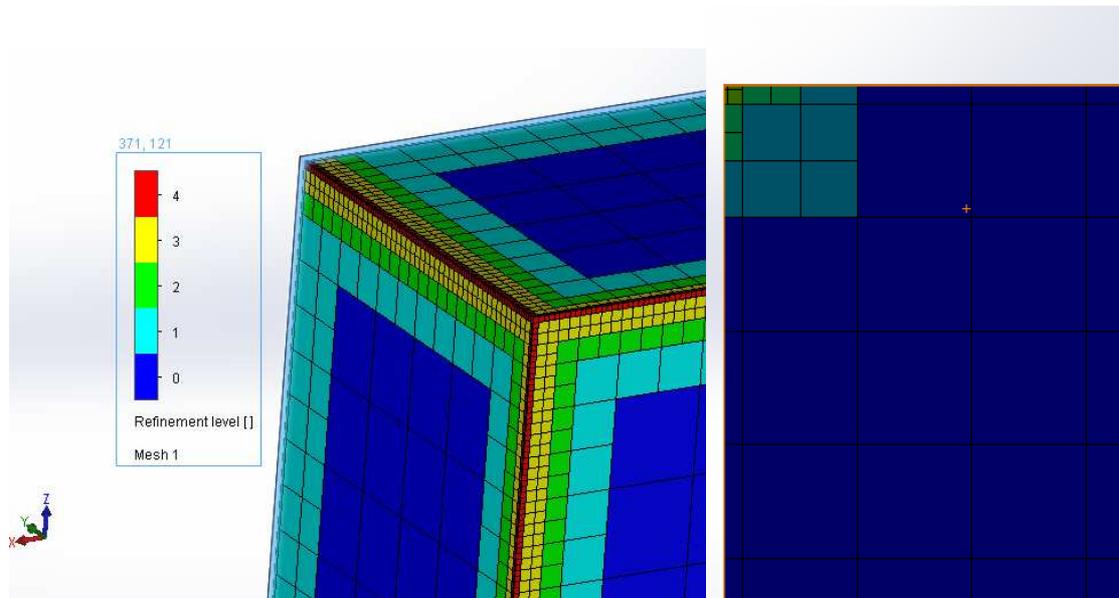


Figura 14: Representación en una de las esquinas de la malla utilizada para el receptor de cavidad, afinada en las aristas (izda) y afinada en las esquinas para el receptor plano (dcha).

El receptor plano cuenta con una malla como la de tipo cero que se utilizó para el de cavidad, estando afinada en las esquinas como se aprecia en la figura.

1.1.1 Receptor plano

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis con la ayuda del software SolidWorks. Para el presente problema se han analizado tres dominios computacionales, el principal de ellos se encuentra en el eje de simetría mientras que los otros dos se encuentran subdividiendo en dos las dos mitades.

En la figura 14 puede observarse la distribución de temperaturas sobre la superficie de la placa frontal en el dominio central, esta responde principalmente a la distribución de la radiación entrante, pero también se ve afectada por el calor que absorbe el fluido caloportador, que será proporcional al gradiente de temperatura entre este y la placa. Cabe destacar que la diferencia de temperaturas efectiva será entre la parte de los tubos en contacto con la placa y la parte trasera de esta, con lo que será algo menor de la observada en las figuras 13 y 14.

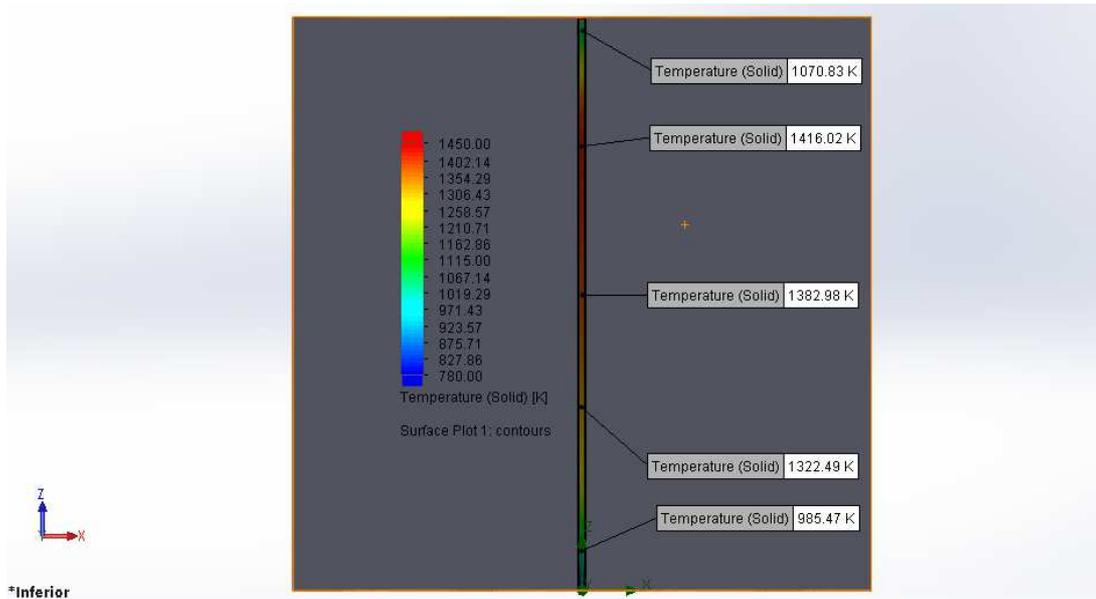


Figura 15: Distribución de temperaturas en la chapa metálica frontal

En la figura 15 se puede apreciar el gradiente de temperaturas que existe en el interior de los tubos por donde circula el fluido, se tomara el valor medio para realizar el cálculo de la potencia que absorbe.

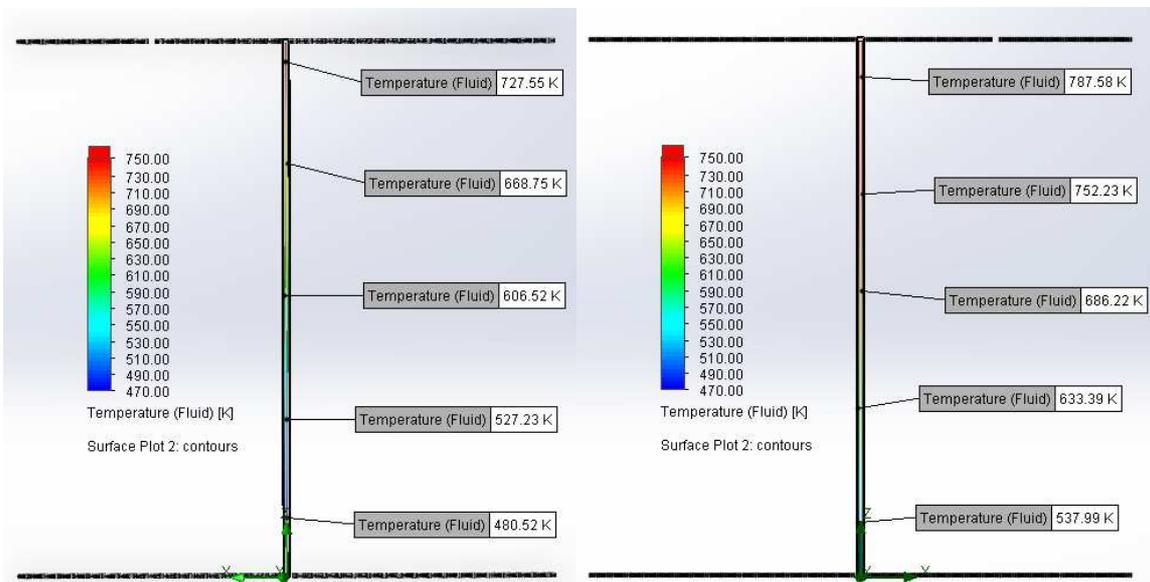


Figura 16: Distribución de temperaturas en los tubos, en la zona en contacto con la chapa (izda) y en la zona trasera (dcha)

Los otros dos dominios restantes cuentan con distribuciones similares a temperaturas ligeramente menores; sus valores se han utilizado para poder extrapolar al conjunto de la placa, ya que la distribución de radiación entrante no es uniforme y no resultaría valido tomar únicamente

lo obtenido en el dominio central. Se utilizan los valores obtenidos para comprobar que la temperatura media de la superficie sólida coincide con el valor estimado en un principio.

1.1.2 Receptor de cavidad

Este segundo caso resulta más complejo ya que cuenta con cuatro superficies que interactúan térmicamente, debido a la simetría vertical pueden analizarse únicamente tres de ellas. Como en el caso del receptor plano, se plantean tres dominios computacionales a analizar en cada una de las superficies que abarcan la longitud total de los tubos.

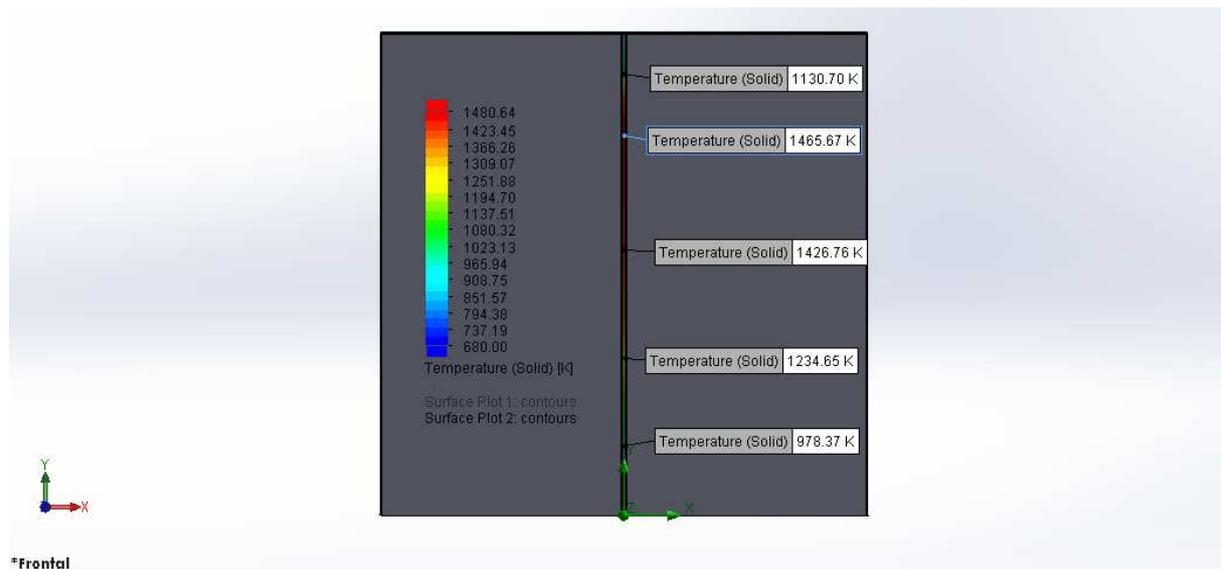


Figura 17: Distribución de temperaturas en la placa del fondo del receptor de cavidad

En la figura número 16 se presenta la distribución de temperatura correspondiente a la placa del fondo del receptor de cavidad, se puede observar que las temperaturas alcanzadas son algo mayores que en el caso anterior, aunque la distribución es muy similar ya que también lo es la distribución de la radiación recibida.

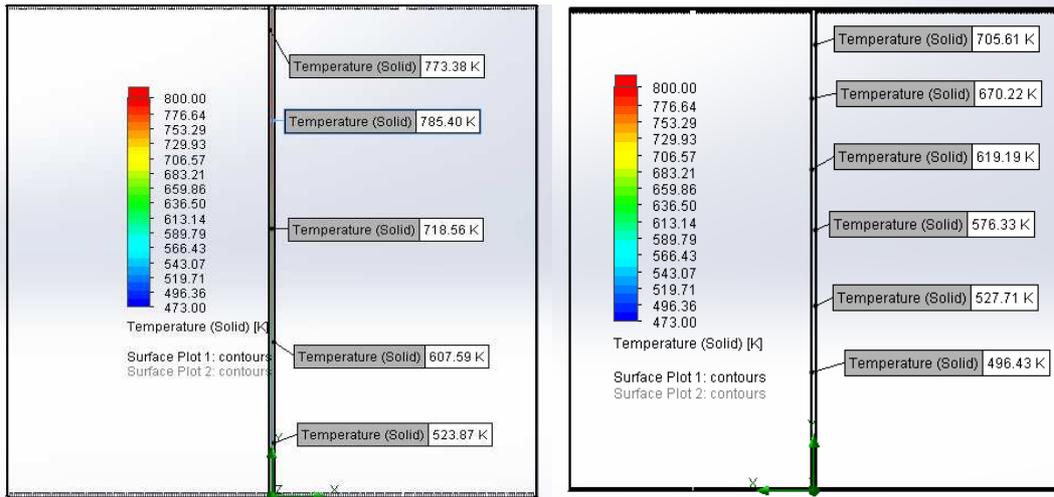


Figura 18: Distribución de las temperaturas en los tubos del dominio central de la placa del fondo del receptor de cavidad. Zona en contacto con la placa (izda), zona trasera (dcha)

Seguidamente se analiza la pared del receptor orientada al este, como las placas laterales reciben únicamente la radiación residual, ya que esta está orientada hacia el centro, estarán a temperaturas mucho más bajas, por lo que el fluido sufrirá un salto térmico menor. En las figuras 18 y 19 se puede comprobar esta diferencia.

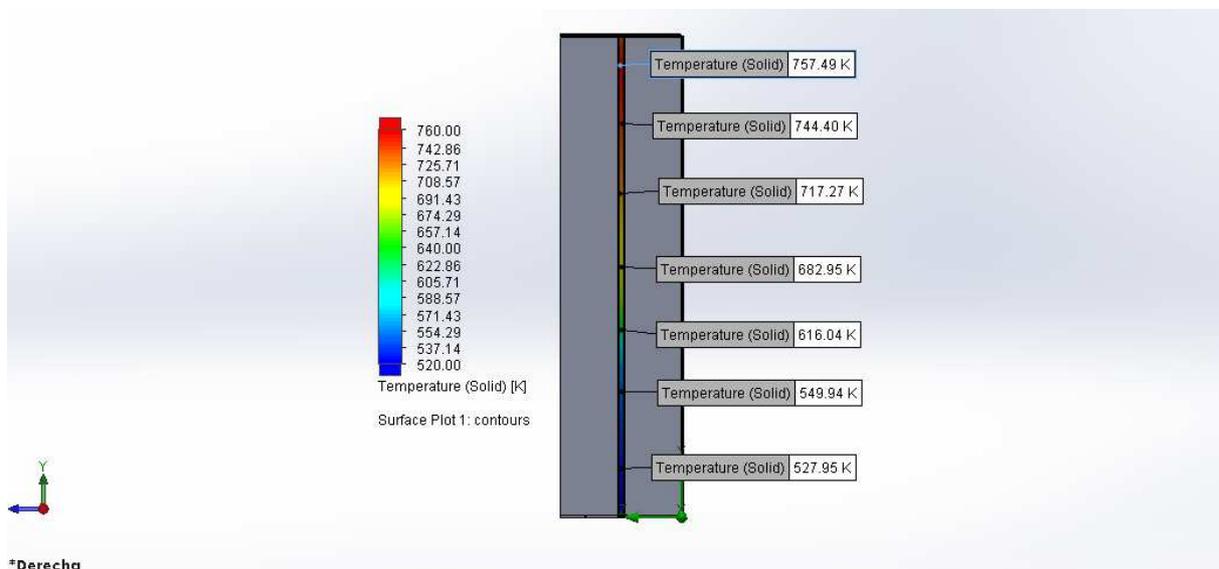


Figura 19: Distribución de la temperatura en la superficie de la placa lateral orientada al este del receptor de cavidad

A pesar de todo no hay que perder de vista que en el rango de temperaturas manejado, la radiación tiene unos valores importantes, con

lo que estas placas a temperatura más baja recibirán también un flujo de calor por radiación de la placa central, lo que disminuirá las perdidas.

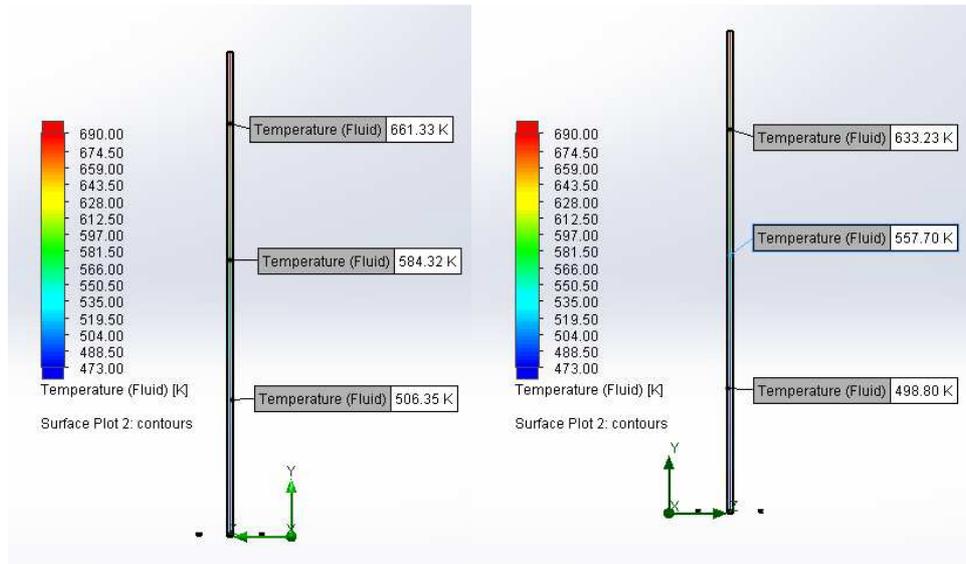


Figura 20: Distribución de las temperaturas en los tubos laterales orientados al este del receptor de cavidad. Zona interna en contacto con la placa (izda), zona externa (dcha)

Los tubos que circulan alrededor de las placas laterales son en principio un circuito independiente, aunque finalmente sean mezclados. Al recibir una radiación mucho menor, se ha decidido hacer circular un flujo másico también menor tal que alcance una temperatura igual o mayor que el flujo másico principal.

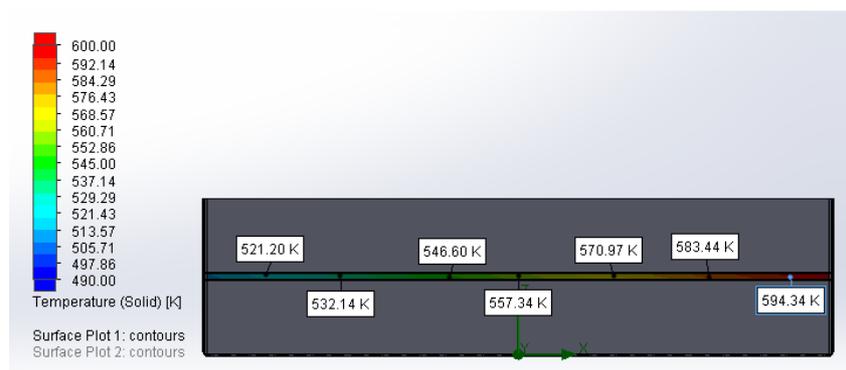


Figura 21: Distribución de temperaturas en la placa superior del receptor de cavidad

Seguidamente se estudia la placa superior, mostrada en la figura 20 y 21. Como ya se ha mencionado, de las placas que interactúan en el receptor, esta es la que tiene un flujo de radiación entrante menor, esto se refleja

en los valores de la distribución de la temperatura de la placa, así como en los del fluido, además al ser menor el flujo de calor absorbido por este, también es menor el gradiente de temperaturas en el interior del tubo tanto en la dirección longitudinal como diametralmente.

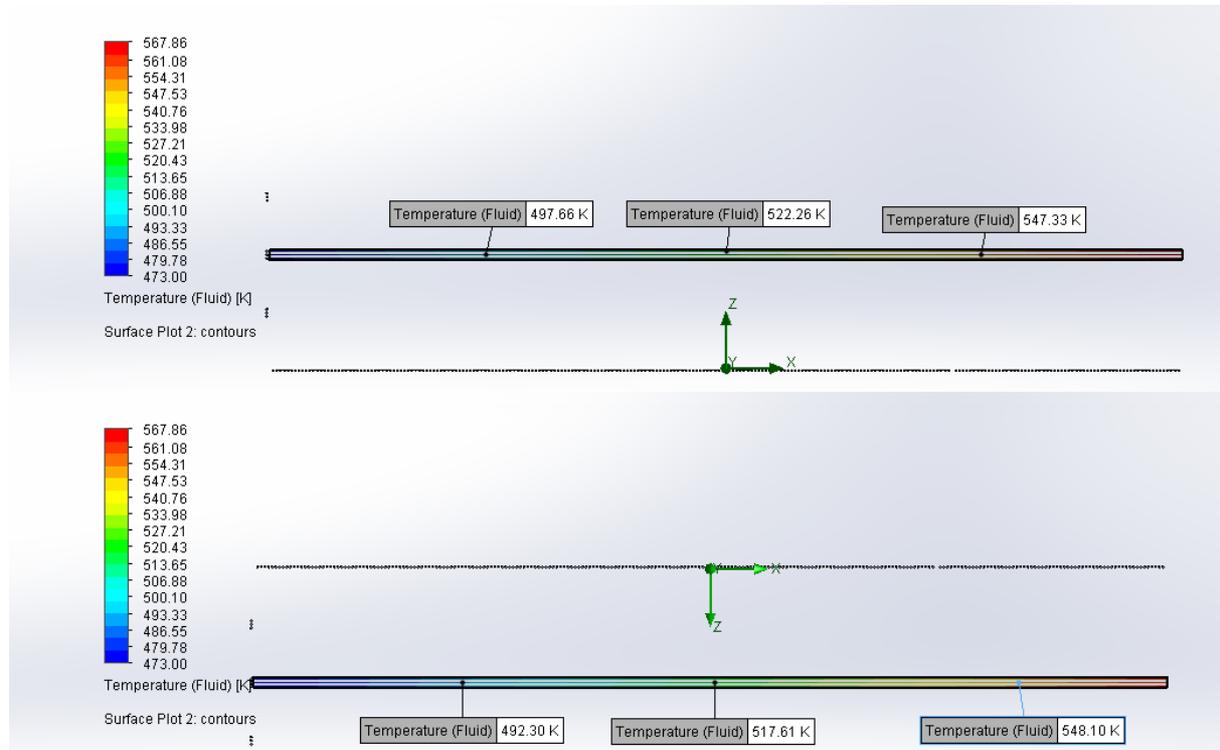


Figura 22: Distribución de las temperaturas en los tubos de la placa superior. Zona interna en contacto con la placa (arriba), zona externa (abajo)

1.2 ANÁLISIS DEL CONJUNTO DEL RECEPTOR Y SU ENTORNO

La parte final del análisis se basa en una notable simplificación del receptor, eliminando los tubos y dejando únicamente una chapa receptora del calor, que corresponde a la placa frontal con los tubos adosados del modelo completo, y otra chapa de material aislante situada tras ella. Esta simplificación permite que el número de nodos de la malla sea notablemente menor, aunque el dominio computacional analizado en este caso sea la totalidad del receptor y su entorno más cercano.

1.2.1 Receptor plano

En la figura 22 mostrada a continuación, se puede observar la distribución de temperaturas que aparecen en la superficie del receptor a consecuencia de los flujos de calor, por la placa delantera entra la radiación procedente del campo de heliostatos, y por la zona intermedia entre las placas, donde se encuentran los tubos no representados, se absorbe el calor extraído.

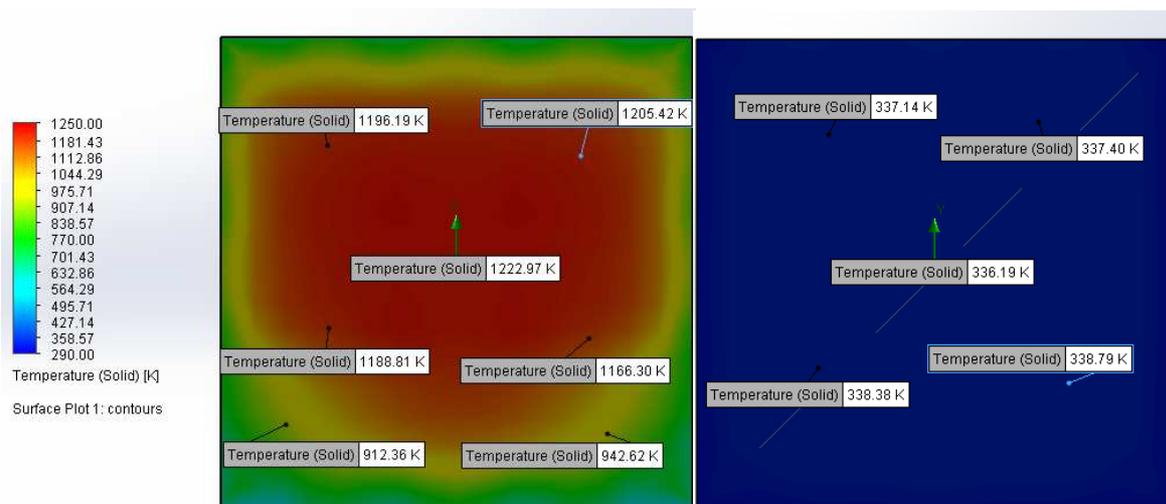


Figura 23: Distribución de temperaturas en la superficie del receptor plano. Zona delantera (izda), zona trasera (dcha)

En la parte de la derecha de la figura 22, se aprecia que la cara trasera de la placa de material aislante se encuentra a una temperatura poco mayor que la del ambiente, esto implica que el calor que se perderá por esa cara será muy bajo. Sin embargo la superficie receptora de la radiación se encuentra a muy alta temperatura, con lo que las pérdidas en ella serán considerables.

Seguidamente se analizan los flujos de calor salientes tanto por convección como por radiación en la placa delantera. Como ya se explicó en el apartado 2 de este proyecto, mientras que la convección es proporcional a la diferencia de temperaturas, en este caso entre la superficie y el medio, la radiación lo es a la diferencia de la cuarta potencia de las temperaturas, con lo que cuando se trabaja en un rango

de valores alto, esta última sera mas importante. Esto puese observarse en las figuras 23 y 24, asi como en la tabla 13, mostradas a continuación.

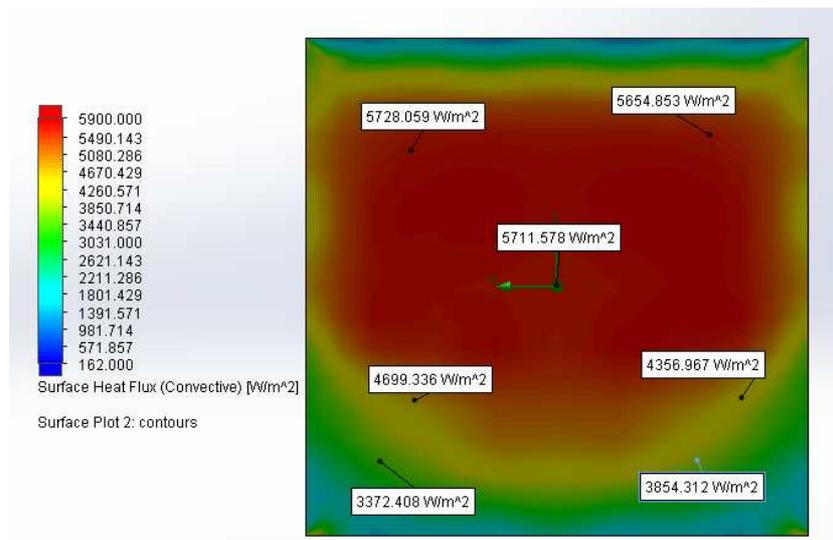


Figura 24: Calor perdido por convección en la superficie delantera

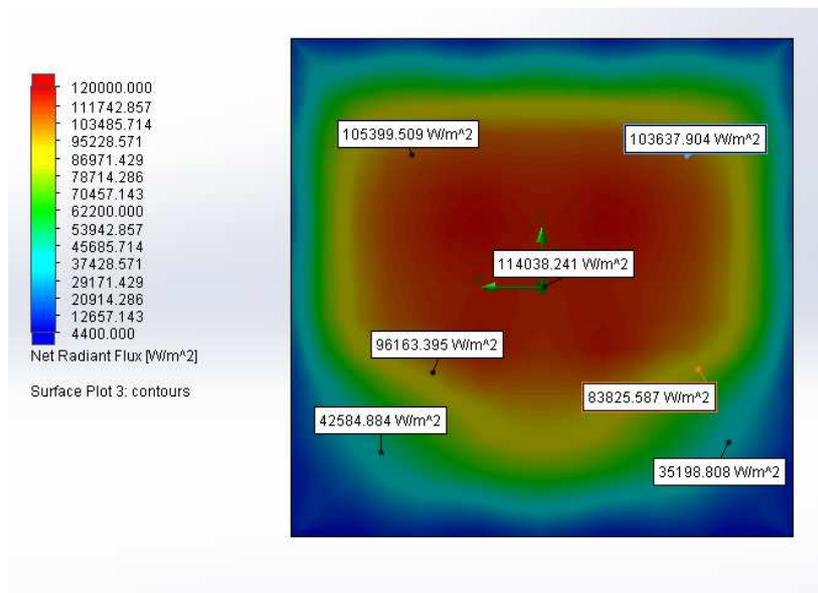


Figura 25: Calor perdido por radiación en la superficie delantera

Parámetro	Placa delantera	Placa trasera
Temperatua media (K)	1070	335
Calor medio perdido por convección (W/m ²)	4800	165
Calor medio perdido por radiación (W/m ²)	74494	268

Tabla 13: Parámetros térmicos obtenidos para el receptor plano

De los datos presentados se pueden sacar varias conclusiones, en primer lugar, se comprueba que las pérdidas por radiación son considerablemente mayores, de media 15 veces más que las convectivas. Por otro lado, se observa que mientras que las primeras tienen una distribución muy similar a la de la temperatura, las pérdidas por convección tienen una distribución más dispersa, esto se debe a que no son una función tan dependiente de la temperatura.

Los valores del coeficiente de película pueden apreciarse en la figura 25, en la zona central son prácticamente constantes.

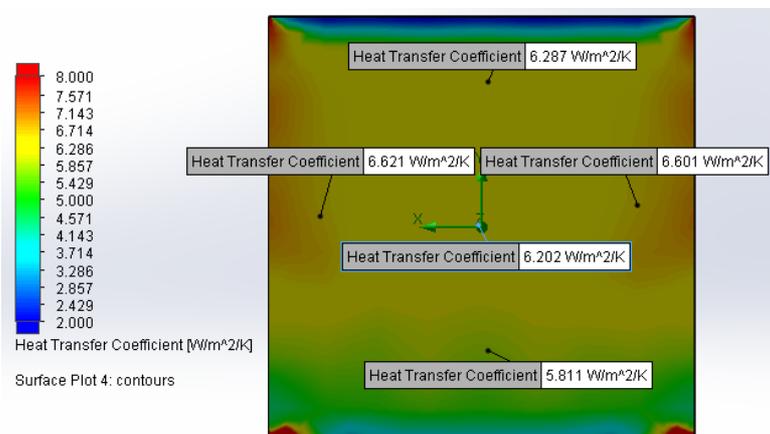


Figura 26: Valores del coeficiente de película en la placa delantera

Por último se analiza el flujo del aire externo dentro del dominio computacional estudiado. Este aire intercambiará calor por convección con el receptor y como ya se ha explicado, este intercambio será proporcional tanto a la diferencia de temperaturas como al coeficiente de película.

En la figura 26 se puede observar el flujo de aire que entra en contacto con el receptor, en la zona inferior tiene velocidad prácticamente nula y temperatura ambiente, sin embargo, ambas aumentan notablemente al entrar en contacto con la superficie a mayor temperatura, dando lugar a una corriente de aire ascendente que llega a alcanzar velocidades de 3 m/s, cabe destacar que el valor de la temperatura, aunque aumenta al contacto con la placa, disminuye de nuevo al entrar en la corriente y mezclarse con el ambiente.

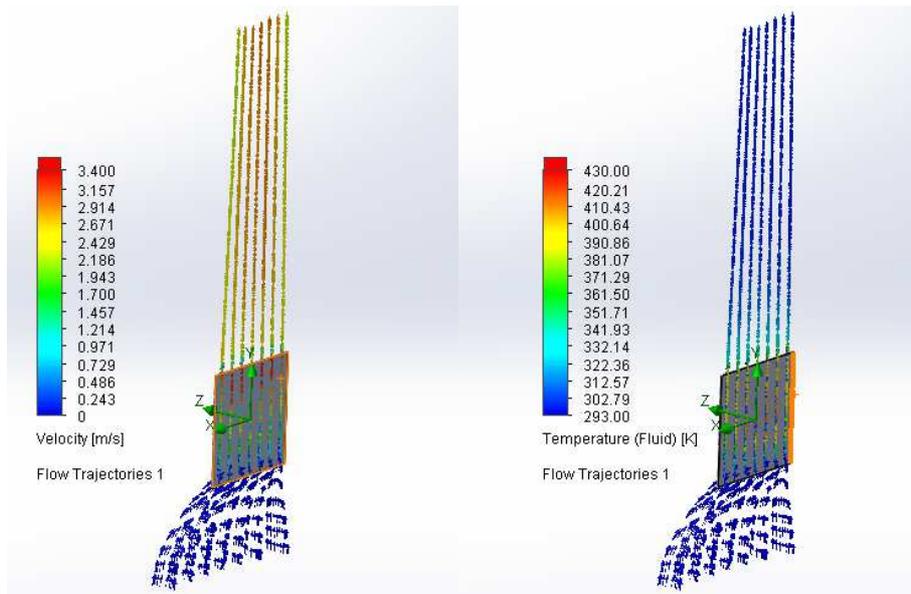


Figura 27: Flujo del aire que entra en contacto con el receptor. Distribución de velocidades (izda) y de temperaturas (dcha)

A continuación se muestra la figura 27, en la que puede observarse en dos de los planos principales la dirección de las líneas de flujo del aire del entorno, así como la distribución de velocidades que tiene. Se puede observar que el aire se desplaza hacia arriba sin perturbar apenas más allá de las dimensiones del receptor.

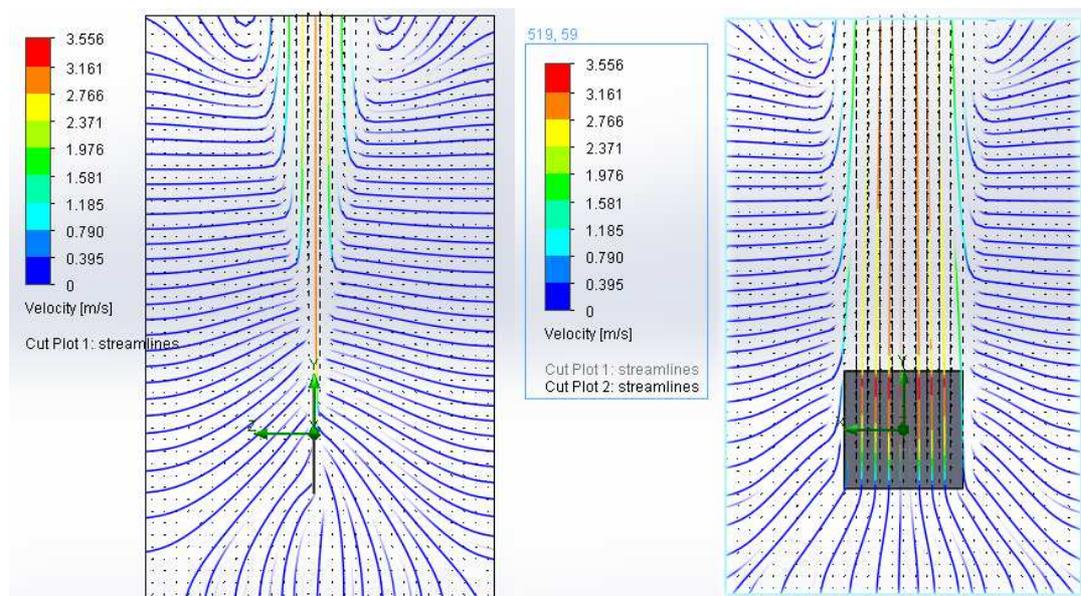


Figura 28: Distribución de velocidades en el aire del entorno

1.2.2 Receptor de cavidad

En este caso, en la figura 27 se puede ver que las temperaturas interiores son algo mayores en la placa central, mientras que las placas laterales apenas se encuentran más calientes que las caras exteriores. Hay que tener en cuenta que en este caso, la radiación emitida por la superficie central, debido a las diferencias de temperatura, puede ser absorbida por las adyacentes a ella, lo que disminuirá el valor total de las pérdidas.

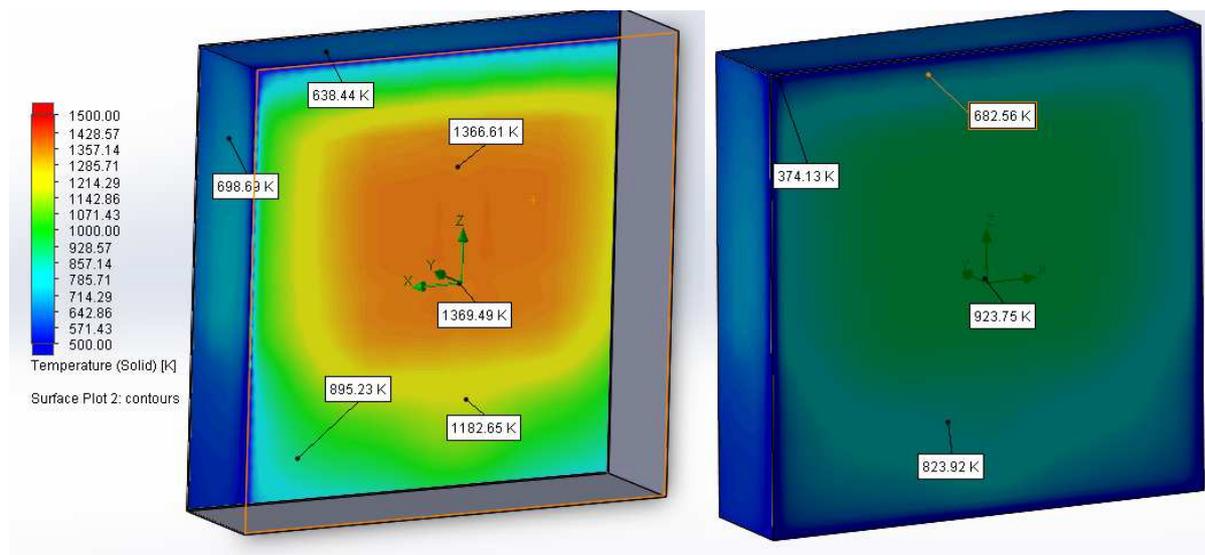


Figura 29: Distribución de temperaturas en las caras internas del receptor (izda) y en las caras externas (dcha)

Este intercambio de calor por radiación se representa en la figura 28, se ha dividido en dos partes abarcando diferentes zonas de la escala para poder apreciar mejor los flujos entrantes y salientes de cada una de las placas. En el lado izquierdo se puede ver la distribución de flujos salientes, que coinciden con las zonas representadas en rojo a la derecha; por el contrario, en la figura de la derecha se aprecian los flujos que entran a la superficie, representados en tonos fríos, que coinciden con las zonas azul oscuro de la figura de la izquierda. Se observa perfectamente por tanto como la superficie interna de la placa central emite radiación, que es absorbida por las placas laterales, como ya se había explicado y era de esperar debido al mapa de temperaturas.

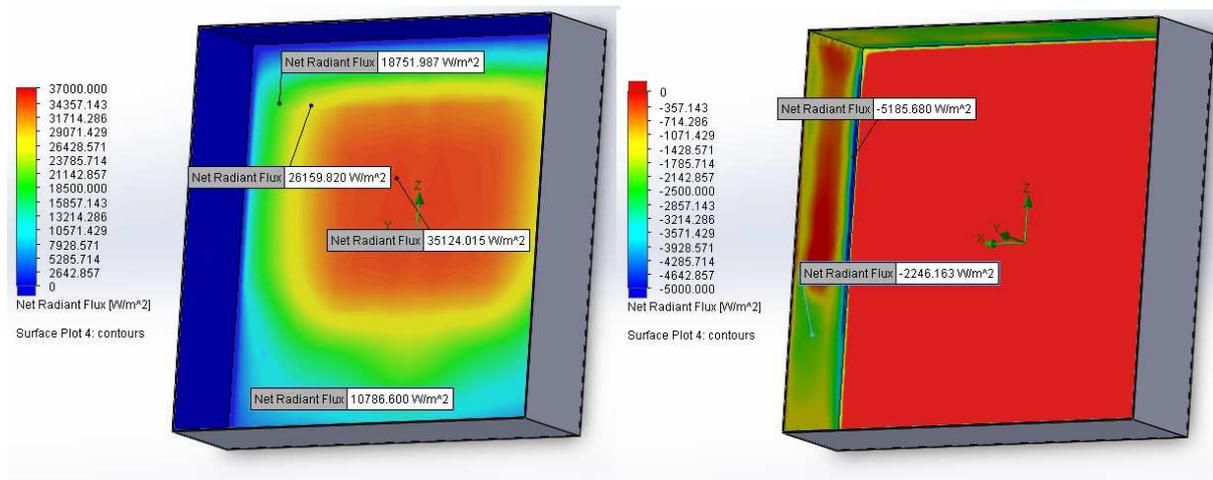


Figura 30: Distribución del flujo de calor por radiación representado a dos escalas.

Como ocurría para el receptor plano, el calor intercambiado por radiación es notablemente mayor que el transmitido por convección, esto se debe de nuevo al alto rango de temperaturas en el que se esta trabajando.

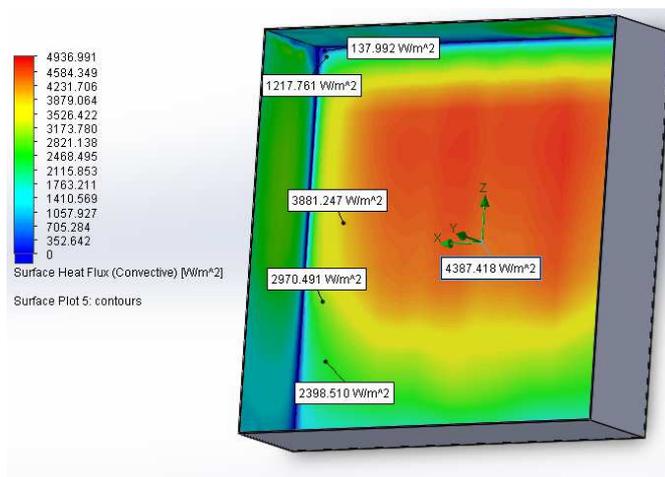


Figura 31: Distribución de los valores del flujo de calor perdido por convección

En la figura 31 se aprecia como el coeficiente de convección es prácticamente constante en toda la superficie central, y toma valores alto menores en las superficies laterales. Sin embargo, los altos valores que se observan en las aristas están fuera de rango y no resultan coherentes ya que en esas zonas la velocidad del flujo y la temperatura de la placa so menores, lo cual daría lugar a un coeficiente más pequeño que en la zona central.

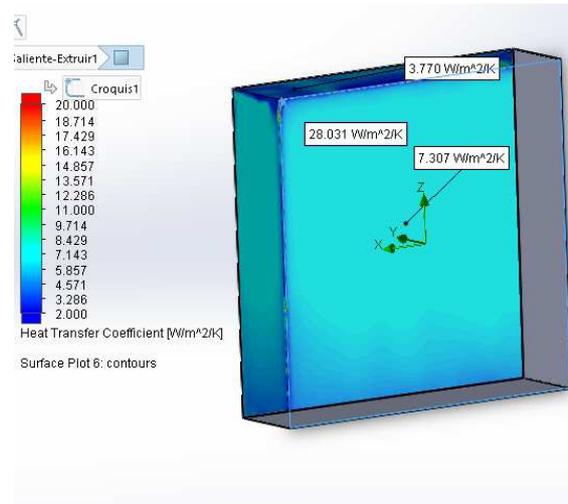


Figura 32: Valores del coeficiente de convección

En la tabla 14 se puede apreciar como gran parte del calor emitido por radiación por la superficie central es absorbido por el resto de las caras, ya que existe una gran diferencia entre el emitido por el conjunto de la zona interna y el emitido por la cara central. Esto disminuirá notablemente las pérdidas de este receptor. Por otro lado, la diferencia en los flujos de convección se debe a que tanto la temperatura como el coeficiente de película son menores en las placas laterales respecto a la central.

Parámetro	Zona interna	Superficie central
Flujo de calor por radiación (W/m^2)	9772	21125
Flujo de calor por convección (W/m^2)	2453	3468

Tabla 14: Intercambios de calor globales

Por último se analiza el flujo del conjunto del dominio computacional y su interacción con el receptor. De nuevo se observa cómo se forma una corriente de aire ascendente, después de que el aire de la parte inferior que se encuentra en condiciones normales pase por el receptor. En este caso se alcanzan velocidades mayores, con un máximo de 3,17 m/s mientras que el rango de temperaturas es similar al anterior.

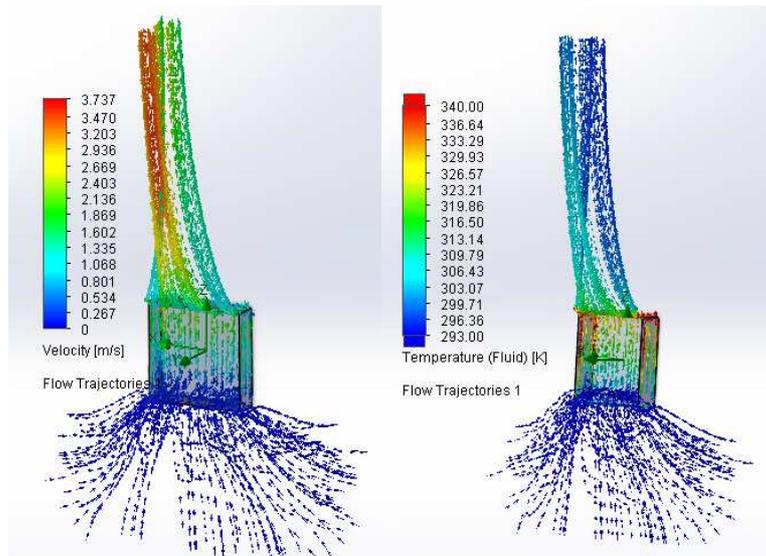


Figura 33: Distribución del flujo de aire que entra en contacto con el receptor. Velocidades (zda), temperaturas (dcha)

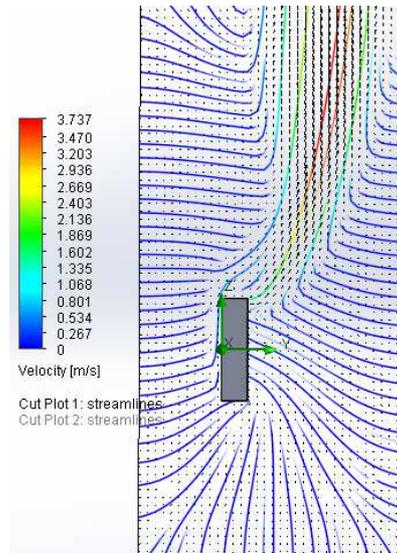


Figura 34: Líneas de flujo del aire en el domino estudiado

En la figura 33 se puede apreciar como para el receptor de cavidad el flujo de aire que sale de él es impulsado hacia delante, perturbando una zona mayor que el caso previo.

2 CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que ambos receptores reciben la misma cantidad de radiación, el objetivo último es seleccionar aquel que dé lugar a un valor de pérdidas menor.

La potencia recogida por el campo de heliostatos y redirigida al receptor es de 50483088 W, es decir 50,5 MW aproximadamente.

A partir de los datos de la tabla 13 se sabe que el receptor plano pierde 7972700 W, mientras que el receptor de cavidad pierde 2445000 W; esto representa un 15,79% para el receptor plano y un 4,84% para el receptor de cavidad.

Esta diferencia se debe principalmente al intercambio de calor por radiación que existe entre las placas.

Por otro lado, en cuanto al salto térmico del fluido y por lo tanto el calor extraído por él, al ser finalmente el rendimiento del receptor mayor que el esperado, la temperatura final del fluido también lo es, lo que permite un mayor margen de rendimiento en el ciclo de Rankine y el intercambiado de calor sodio-agua.

Un factor que ha resultado determinante en el comportamiento de los modelos estudiados, es la alta concentración de radiación recibida en la zona central, esto provoca altos gradientes térmicos que no resultan favorables ya que pueden dar lugar a tensiones en el material debido a los diferentes coeficientes de dilatación, además una temperatura más uniforme supondría menores pérdidas por radiación y un rendimiento mayor. Por todo lo anterior, resultaría interesante a pesar de la mayor complejidad que conlleva, dirigir la radiación de los heliostatos a diferentes zonas del receptor con el fin de darle una distribución más uniforme.