

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

**“Simulación del Comportamiento Térmico
del Receptor de un Captador Fresnel Lineal”**



Curso 2018/2019

Alumno/a:

Oswaldo Barrueto Novoa

Director/es:

Loreto Valenzuela Gutierrez
Eduardo Zarza Moya



Simulación del Comportamiento Térmico del Receptor de un Captador Fresnel Lineal

Autor

Osvaldo Barrueto Novoa

Titulación

Master en Energía Solar

Tutor

Eduardo Zarza Moya

Loreto Valenzuela Gutiérrez

Departamento

Energía Solar de Media Concentración

Modalidad

Trabajo de investigación

Palabras clave

Tecnología Solar Térmica
Concentrada, Dinámica de Fluidos
Computacionales, Receptor Solar,
Coeficiente de Pérdidas Térmicas

Fmdo. Autor

Vº.Bº Tutor

Vº.Bº Co-tutora

1

Índice de Contenido

Capítulo 1	9
Introducción	9
1.1. Contextualización de Tecnologías Solares de Concentración	9
1.2. Funcionamiento de un Captador Solar Fresnel Lineal	9
1.3. Mejoras de diseño propuestas para investigación	10
Capítulo 2	12
Objetivos, Hipótesis y Metodología de Trabajo	12
2.1. Objetivo general y específicos	12
2.2. Hipótesis de la Investigación	12
2.3. Metodología de trabajo y fases de desarrollo	12
Capítulo 3	14
Diseño de la Cavidad Receptora del CLF	14
3.1 Características de los tubos	14
3.2. Características de la cavidad receptora	14
3.2.1. Características del aluminio reflectante y el vidrio frente a la radiación	15
3.3. Cavidad receptora completa	16
Capítulo 4	18
Simulación del Comportamiento Térmico de la Cavidad	18
4.1. Interfaz de SolidWorks Flow Simulation	18
4.1.1. Condiciones de borde	20
4.1.2. Perfiles de radiación	20
4.2. Parámetros de Mallado	21
4.2.1. Análisis y definición del mallado	21
4.3. Escenarios de prueba a analizar	24
4.3.1. Dominio Computacional	25
4.4. Análisis térmicos con ingreso del agua a los tubos por tomas laterales	25
4.4.1. Análisis térmico del agua y paredes de parrilla de tubos expuestos al ambiente	25
4.4.2. Análisis térmico del agua y paredes de parrilla de tubos dentro de la cavidad receptora	27
4.4.3. Análisis térmico del ambiente interior de la cavidad y alrededores	28
4.4.4. Análisis térmico de paredes y ventana de la cavidad	30
4.4.4.1. Análisis térmico de láminas de aluminio reflectante	30
4.4.4.2. Análisis térmico de paredes exteriores de aluminio	31
4.4.4.3. Análisis térmico de la ventana de vidrio	32
4.4.5. Coeficiente de pérdidas térmicas globales de la cavidad completa	32
4.5. Análisis térmicos con ingreso del agua a los tubos por tomas laterales y cavidad sin ventana de vidrio	33

4.5.1. Análisis térmico del agua y paredes de parrilla de tubos dentro de la cavidad receptora	33
4.5.2. Análisis térmico del ambiente interior de la cavidad y alrededores	34
4.5.3. Análisis térmico de paredes interiores y exteriores de la cavidad	36
4.5.3.1. Análisis térmico de láminas de aluminio reflectante	36
4.5.3.2. Análisis térmico de paredes exteriores de aluminio	37
4.5.4. Coeficiente de pérdidas térmicas globales de la cavidad sin ventana	37
4.6. Análisis térmicos con ingreso del agua a los tubos por tomas centrales	38
4.7. Análisis térmico de paredes interiores de aluminio reflectante	39
4.7.1. Análisis térmico de paredes exteriores de aluminio	40
Capítulo 5	42
Análisis y Discusión de Resultados	42
Capítulo 6	44
Conclusiones y Perspectivas de la Investigación	44
Capítulo 7	46
Bibliografía básica	46

Índice de Figuras

Capítulo 1	9
1. Esquema general del captador solar CLF considerado en éste TFM	10
2. Representación del movimiento individual de los espejos en el plano transversal del CLF considerado en éste TFM	11
3. Representación geométrica del perfil transversal de la cavidad receptora, disposición de tubos y estructura del CLF considerado en éste TFM	11
Capítulo 3	14
4. Vista en planta de secciones de entrada y salida del arreglo de tubos transportadores del fluido	14
5. Sección transversal de la cavidad trapezoidal	15
6. Vista completa de la cavidad extremo de tomas laterales de la parrilla de tubos	16
7. Vista completa de la cavidad extremo de tomas centrales de la parrilla de tubos	16
8. Sección transversal de tomas laterales de la parrilla de tubos	17
9. Sección transversal de tomas centrales de la parrilla de tubos	17
Capítulo 4	18
10. Configuraciones del receptor analizadas en Flow Simulation	18
11. Listado de componentes de ingreso para el análisis (a) y de resultados de éste (b)	19
12. Interfaz general de SolidWorks Flow Simulation	19
13. Perfiles de radiación incidentes sobre cada tubo en su vista transversal	20
14. Temperatura promedio alcanzada por el fluido en uno de los tubos de entrada del receptor, en relación a las iteraciones realizadas para cada configuración de mallado	23
15. Perfil de temperaturas a la salida del tubo para los casos de mallado analizados	23
16. Malla utilizada para análisis del fluido al interior de los tubos	24
17. Dominio Computacional considerado para los análisis	25
18. Contorno de temperaturas de la superficie de la parrilla de tubos expuestos al ambiente sin cavidad receptora	26
19. Contorno de temperaturas de fluido y tubo en sección transversal a la salida	26
20. Contorno de temperaturas de fluido y tubo en sección transversal en el plano medio	26
21. Contorno de temperaturas de la superficie de la parrilla de tubos al interior de la cavidad receptora	27
22. Contorno de temperaturas de fluido y tubo en sección transversal a la salida	27
23. Contorno de temperaturas de fluido y tubo en sección transversal en el plano medio	27

24. Contornos de temperaturas del ambiente interno y alrededores de la cavidad receptora en la salida	28
25. Contornos de temperaturas del ambiente interno y alrededores de la cavidad receptora en el plano medio	28
26. Gráfica comparativa de temperaturas del aire respecto a la altura de la cavidad receptora en el punto medio de su sección transversal para las condiciones de plano medio y salida	29
27. Contornos de la magnitud de velocidad de los fluidos en el interior y alrededores de la cavidad receptora en la salida	30
28. Contornos de la magnitud de velocidad de los fluidos en el interior y alrededores de la cavidad receptora en el plano medio	30
29. Contorno de temperaturas de superficie de láminas de aluminio reflectante	31
30. Contorno de temperaturas de superficie de paredes laterales de aluminio reflectante	31
31. Contorno de temperaturas de superficie de capa de aluminio exterior de la cavidad receptora	32
32. Contorno de temperaturas de superficie de la ventana de vidrio	32
33. Contorno de temperaturas de superficie de parrilla de tubos	33
34. Contorno de temperaturas de fluido y tubo en sección transversal a la salida	34
35. Contorno de temperaturas de fluido y tubo en sección transversal en el plano medio	34
36. Contornos de temperaturas del ambiente interno y alrededores de la cavidad receptora en la salida	34
37. Contornos de temperaturas del ambiente interno y alrededores de la cavidad receptora en el plano medio	35
38. Gráfica comparativa de temperaturas del aire respecto a su altura en la cavidad receptora en el punto medio de su sección transversal para las condiciones de plano medio y salida (cavidad sin ventana de vidrio)	35
39. Contornos de la magnitud de velocidad de los fluidos en el interior y alrededores de la cavidad receptora en la salida	36
40. Contornos de la magnitud de velocidad de los fluidos en el interior y alrededores de la cavidad receptora en el plano medio	36
41. Contorno de temperaturas de superficie de paredes interiores de aluminio reflectante	37
42. Contorno de temperaturas de superficie de capa de aluminio exterior de la cavidad receptora	37
43. Contorno de temperaturas de la superficie de la parrilla de tubos expuestos al ambiente sin cavidad receptora	38
44. Contorno de temperaturas de fluido y tubo en sección transversal a la salida	39
45. Contorno de temperaturas de fluido y tubo en sección transversal en el plano medio	39
46. Contorno de temperaturas de superficie de paredes interiores de aluminio reflectante	39
47. Contorno de temperaturas de superficie de aluminio exterior de la cavidad	40



Capítulo 5	42
48. Temperaturas máximas del agua por secciones analizadas y de superficie de los tubos. (a) entrada del agua por tomas laterales. (b) entrada del agua por las tomas centrales	42
49. Comparativa de Coeficiente de pérdidas térmicas globales y calor cedido al ambiente	43

Índice de Tablas

Capítulo 3	14
1. Propiedades mecánicas del arreglo de tubos de acero inoxidable AISI 304	14
2. Propiedades físicas y térmicas de los materiales de la cavidad	15
Capítulo 4	18
3. Condiciones de borde ingresadas en Flow Simulation	20
4. Irradiancia total incidente sobre cada tubo	21
5. Configuraciones de mallado analizadas	22
6. Tiempo computacional para cada configuración de mallado analizado ...	22
7. Parámetros para el cálculo de U_L de la cavidad completa	33
8. Parámetros para el cálculo de U_L de la cavidad sin ventana	38
9. Parámetros para cálculo de conducción a través de la lana mineral	40

Nomenclatura

A_c	Superficie de la cavidad [m^2]
e_{lm}	Espesor lana mineral [m]
k_{lm}	Conductividad térmica lana mineral [W/mK]
q_{loss}	Calor cedido [W]
q_{cond}	Calor transferido por conducción [W]
T_i	Temperatura de ingreso [K]
T_o	Temperatura de salida [K]
$T_{c,av}$	Temperatura media de superficie de cavidad [$^{\circ}C$]
$T_{a,av}$	Temperatura media ambiental [$^{\circ}C$]
T_{in}	Temperatura superficie interior [$^{\circ}C$]
T_{ex}	Temperatura superficie exterior [$^{\circ}C$]
U_L	Coficiente de pérdidas térmicas [W/ m^2K]

1. Introducción

1.1 Contextualización de Tecnologías Solares de Concentración

El desarrollo de tecnología solar térmica concentrada juega un papel clave en la implementación de la energía solar como fuente de energía primaria tanto a nivel de generación de calor de proceso, como generación de electricidad. Hasta el día de hoy, en la tecnología de concentración solar lineal, predominan los concentradores cilíndro-parabólicos (CCP), los cuales han demostrado ser equipos fiables, pero con un coste que es necesario reducir para que sean más competitivos. Es por esto que se encuentran activamente en investigación tecnologías que abaraten tanto los costos de producción como de operación en la industria solar, con el fin de hacerla más competitiva aún frente a otras alternativas de combustible.

En cuanto al consumo energético mundial, el consumo industrial alcanza valores cercanos al 30 % del total [1]. Dentro de éste, se tiene que los procesos industriales requieren energía térmica en ciertos rangos de temperatura, a los cuales se les puede adjudicar una correspondiente tecnología solar que sea capaz de abastecer las necesidades del proceso, a un coste razonable. Muchos procesos industriales trabajan en un rango térmico entre los 100 y 400 °C [2], lo cual es un rango de temperatura perfectamente suministrable por tecnologías de concentración solar térmica lineal.

Una alternativa frente a los CCPs, son los captadores lineales Fresnel (CLF), que pueden suministrar energía térmica en el mismo rango de temperatura que los CCPs y presentan ciertas ventajas. Estas ventajas son las siguientes:

- El tubo absorbente se encuentra fijo, sin necesidad de juntas flexibles o rotativas
- Reflectores especulares de menor costo, al tener una curvatura muy leve
- Los reflectores se montan más cerca del suelo, por lo que el costo del soporte estructural es menor, y también lo son las cargas de viento sobre la estructura

Una cualidad inferior de los CLFs frente a los CCPs es la eficiencia óptica, situación dada por la componente angular de la radiación incidente en los reflectores, la cual incrementa al alejarse el Sol de la posición cenital. A niveles más bajos, ligeros errores ópticos aparecen debido a la mayor distancia entre los reflectores y el foco, lo que contribuye a una disminución en el rendimiento óptico del captador.

1.2 Funcionamiento de un Captador Solar Fresnel Lineal (CLF)

Un CLF está compuesto por una serie de reflectores primarios planos, o con una leve curvatura, que trabajan bajo un control de seguimiento solar, reflejando la radiación solar directa sobre un receptor lineal, que permanece fijo. La energía absorbida por el receptor es transferida al fluido de trabajo que fluye a través de los tubos receptores dentro de éstos. Debido a que el área total de los reflectores es considerablemente mayor al área del receptor, se alcanza una concentración geométrica elevada, la cual se define como el cociente entre el área del reflector y el área del receptor.

1.3 Mejoras de diseño propuestas para investigación

Con el objetivo de mejorar la eficiencia óptica de ésta tecnología, se han publicado datos de ciertos prototipos innovadores que consideran modificaciones geométricas de los CLF convencionales. Dai et al [3] describen tres tipos de movimientos simultáneos: el seguimiento de los espejos (reflectores) a la posición solar, traslación este – oeste de todo el campo de reflectores de acuerdo a la posición relativa del Sol, y la rotación de un reflector secundario ubicado en el receptor. Zhu et al [4] proponen un diseño orientado Este – Oeste, el cual tiene la particularidad de ajustar la inclinación de todo el captador, acorde a la altura solar. También, Zhu et al [5] presentan otro prototipo con orientación Este – Oeste, incluyendo en ambos una superficie reflectora que forma una parábola; y el receptor que es capaz de moverse en su eje axial, con el fin de compensar las pérdidas generadas en el extremo. Finalmente, Nixon y Davies [6] presentan un diseño que permite a los espejos ascender y descender individualmente a través de su plano horizontal. Estas modificaciones a la geometría convencional presentadas se han desarrollado individualmente, por lo que el diseño de CLF propuesto por Pulido et al [7] y analizado en éste proyecto reúne simultáneamente cada una de ellas, junto con la integración de innovaciones adicionales que persiguen mejorar el rendimiento óptico del conjunto.

A modo de comprensión del diseño propuesto, se presenta en las Figuras 1 y 2, el esquema general del captador, y el movimiento de los espejos en el plano transversal. En ambas figuras se representan los movimientos y desplazamientos angulares del receptor y facetas mediante los respectivos símbolos griegos λ y β . Cabe destacar que en ambas figuras se presentan los tubos de manera simplificada, sin considerar la cavidad receptora, la cual se detalla a continuación.

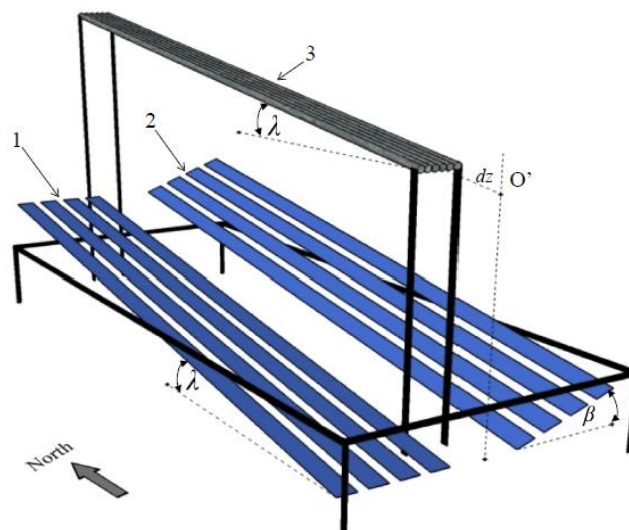


Figura 1. Esquema general del captador solar CLF considerado en éste TFM [7].

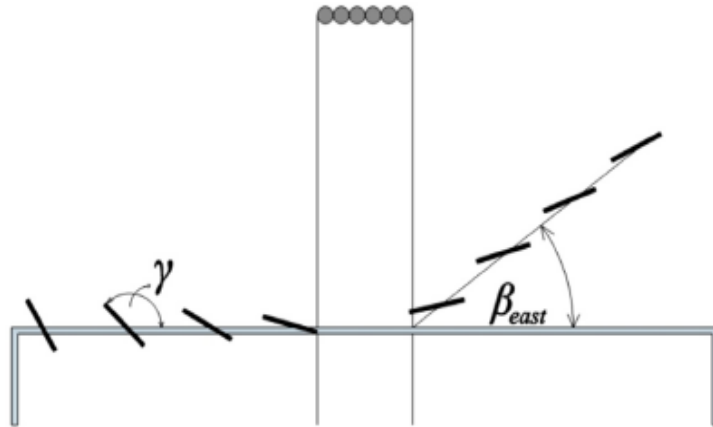


Figura 2. Representación de movimiento individual de los espejos en el plano transversal del CLF considerado en éste TFM [7].

El receptor es un elemento clave en un CLF; considerando el nivel de temperatura al cual se va a trabajar el diseño presentado (~ 200 °C máx.), se considera una cavidad trapezoidal [8], que contiene la parrilla de tubos dispuestos paralelamente uno respecto al otro, en su interior. La geometría básica correspondiente al perfil de la cavidad del receptor se presenta a continuación en la Figura 3, donde se aprecia la forma de éste, y la disposición de los tubos.

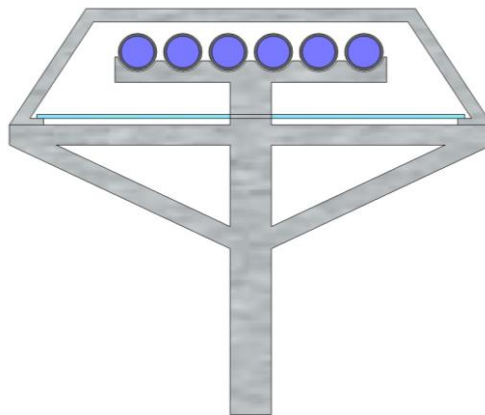


Figura 3. Representación geométrica del perfil transversal de la cavidad receptora, disposición de tubos y estructura soporte del CLF considerado en éste TFM [7].

2. Objetivos, Hipótesis y Metodología de Trabajo

2.1 Objetivo general y específicos

El objetivo principal de éste proyecto es modelar el comportamiento térmico del receptor del captador CLF propuesto, mediante simulación a través de dinámica de fluidos computacionales (CFD) y los respectivos análisis térmicos.

Dentro del objetivo propuesto se presentan los siguientes objetivos específicos:

- Cuantificar y comparar las mejoras propuestas al modelo respecto a los modelos existentes.
- Análisis del intercambio de calor entre la cavidad receptora y el fluido de trabajo
- Obtención del coeficiente de pérdidas térmicas de la cavidad receptora y distribución de temperaturas en el propio material absorbedor, ambiente de la cavidad y pared de la cavidad.

2.2 Hipótesis de la Investigación

Ante la presencia de la cavidad receptora propuesta para el diseño de este captador solar Fresnel, las pérdidas térmicas al exterior disminuirán frente a la exposición directa de los tubos al ambiente. Se espera que la temperatura alcanzada por el fluido circulante por el interior de los tubos sea mayor en presencia de la cavidad receptora propuesta, frente a la que se alcanzaría si ésta no existiera. También se espera que la temperatura exterior de la cavidad sea significativamente menor que la temperatura superficial interior de ésta, por la presencia de la capa de material aislante entre ambas superficies, exterior e interior.

2.3 Metodología de trabajo y fases de desarrollo

La principal herramienta a utilizar para el desarrollo del proyecto es el software SolidWorks, con la aplicación de las herramientas Simulation y Flow Simulation. Mediante éste software se lleva a cabo el diseño de toda la geometría del receptor en análisis, incluyendo la cavidad receptora y los tubos por donde circula el fluido de trabajo.

Posterior al diseño, se realiza la simulación de la incidencia de la radiación solar sobre el receptor, con la herramienta de Flow Simulation, llevando a cabo un análisis CFD del comportamiento térmico de la cavidad. Se trabaja con los perfiles de radiación incidentes sobre la cavidad obtenidos por Pulido et al (Plataforma Solar de Almería) [7].

Para el correcto desarrollo del proyecto, se establecen los siguientes pasos a seguir:

1. Evaluación del estado del arte de simulaciones de comportamiento térmico en receptores de captadores CLF; mediante la recopilación y contextualización de información en base a estudio de documentos y publicaciones anteriores.
2. Definición de la geometría y características del receptor; y posterior simulación de ésta y su funcionamiento mediante un software de diseño termo-mecánico.

3. Simulación del comportamiento térmico del receptor mediante CFD, evaluando la temperatura del fluido dentro de los tubos, y el intercambio de calor generado con la cavidad receptora.
4. Análisis e interpretación de los resultados obtenidos tras la simulación, y correspondiente corroboración con balances térmicos.

3. Diseño de la Cavidad Receptora del CLF

3.1 Características de los tubos

El receptor opera con 6 tubos de acero inoxidable AISI 304 situados de manera horizontal, paralelos unos a los otros, unidos con un arreglo de codos de 45° y 90°, de manera que se forman dos tubos en serpentin. La disposición de éstos, desde una vista en planta se muestra a continuación en la Figura 4. Cabe mencionar que para tener sólo una entrada y una salida, se les añade una conexión tipo T en los codos de 90° respectivos, lo cual al no intervenir en el análisis propuesto no se han diseñado.

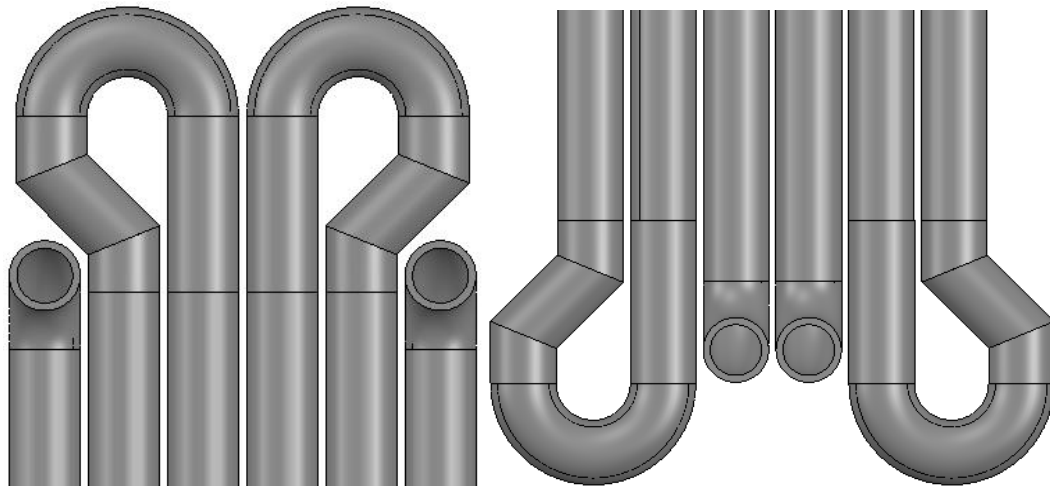


Figura 4. Vista en planta de secciones de entrada y salida del arreglo de tubos transportadores del fluido.

Los tubos en si cuentan con una longitud de 10 m, con una serie de extensiones y codos que le otorgan una longitud total de 10.67 m a la parrilla completa, con un diámetro interior y exterior de 19.05 – 26.67 mm respectivamente. Las propiedades mecánicas del material se presentan a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del arreglo de tubos de acero inoxidable AISI304.

Propiedades	Valor [unidad]
Densidad	7930 kg/m ³
Módulo de elasticidad	190 – 210 GPa
Resistencia a la tracción	460 – 1100 MPa
Coefficiente de expansión térmica	1.8 x 10 ⁻⁵ K ⁻¹
Conductividad térmica	16.3 – 22 W/mK

3.2 Características de la cavidad receptora

Como se menciona anteriormente, el receptor diseñado es una cavidad trapezoidal, diseñada para reducir de manera considerable las pérdidas térmicas con el ambiente que la rodea. Es por esto que las paredes laterales junto con la superior, están compuestas por 3 capas de material, correspondientes a una lámina de aluminio reflectante en el interior, una capa de lana de roca de efecto aislante en la zona intermedia, y una lámina de aluminio común al exterior. En la parte horizontal inferior se sitúa una ventana de vidrio por la cual atraviesan los rayos solares reflejados por

las facetas del captador. Las dimensiones de la cavidad se presentan en la Figura 5, con el detalle de la tricapa en la vista de recorte superior derecha. La longitud total de ésta es de 10.4 m. Los materiales empleados, con sus características y sus espesores para el diseño, se presentan en la Tabla 2.

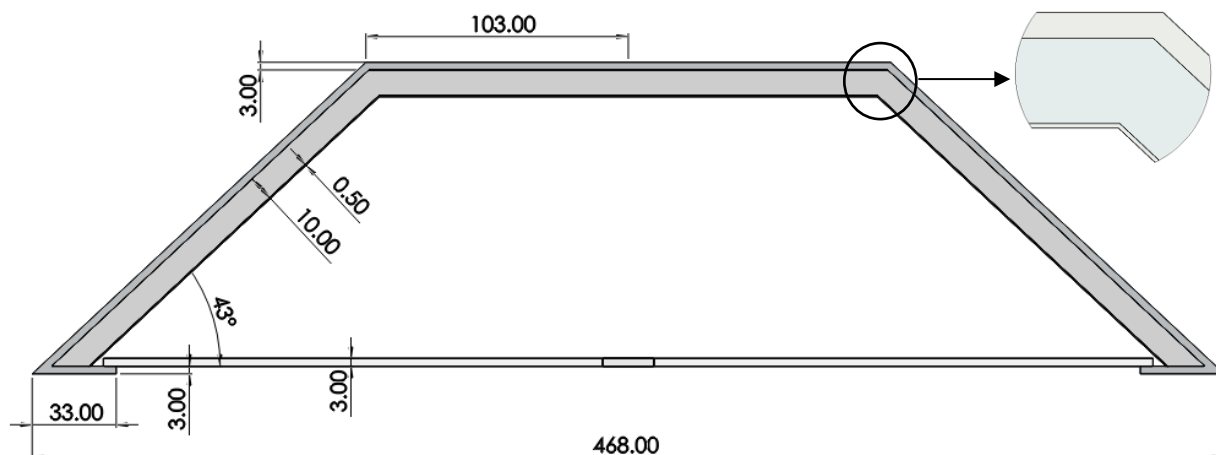


Figura 5. Sección transversal de la cavidad trapezoidal (medidas dadas en mm).

Tabla 2. Propiedades físicas y térmicas de los materiales de la cavidad.

Propiedades	Aluminio común exterior	Lana de roca intermedia	Aluminio reflectante interior	Vidrio ventana
Espesor [mm]	3	10	0.5	3
Densidad [kg/m ³]	2700	70	2700	2457.60
Coefficiente de expansión térmica [K ⁻¹]	2.4×10^{-5}	-	2.4×10^{-5}	9×10^{-6}
Conductividad térmica [W/mK]	200	0.05	200	0.75
Calor específico [J/kgK]	900	840	900	834.61

3.2.1 Características del aluminio reflectante y el vidrio frente a la radiación

La cavidad al estar sometida a radiación solar reflejada por las facetas del captador en su parte inferior, debe poseer las características adecuadas para lograr minimizar las pérdidas térmicas y contribuir a llevar el fluido del interior de los tubos a la temperatura deseada.

El objetivo de la capa de aluminio reflectante del interior de la cavidad, es reflejar los rayos desviados que no alcancen directamente los tubos, sobre éstos. Por ende, se escoge este material ya que presenta un coeficiente de reflectividad de 0.85.

La ventana de vidrio debe interferir lo menos posible en la transmisión de la radiación hacia los tubos dentro de la cavidad, por lo que es muy importante que sea casi transparente a los rayos incidentes en ella. Este material en particular tiene un coeficiente de transmitancia solar de 0.91, absorptancia de 0.02 y emitancia de 0.86.

3.3 Cavity receptora completa

Hasta el momento se han presentado los tubos y la cavidad por separado, por lo que se presenta el diseño completo ensamblado a continuación, en la Figuras 6 y 7. Los tubos se han situado a una distancia de 10 mm desde la superficie horizontal superior de la cavidad, y haciendo coincidir el punto medio de los tubos de 10 m con el de la cavidad a lo largo del eje longitudinal, por lo que la parrilla de tubos queda 157.845 mm fuera de la cavidad en ambos costados, permitiendo introducir las tomas “T” de salida y entrada del fluido. Esta situación se ve representada de forma clara en las Figuras 6 y 7, donde se le ha otorgado cierta transparencia a la cavidad para lograr apreciar con más claridad la disposición de los tubos en su interior.

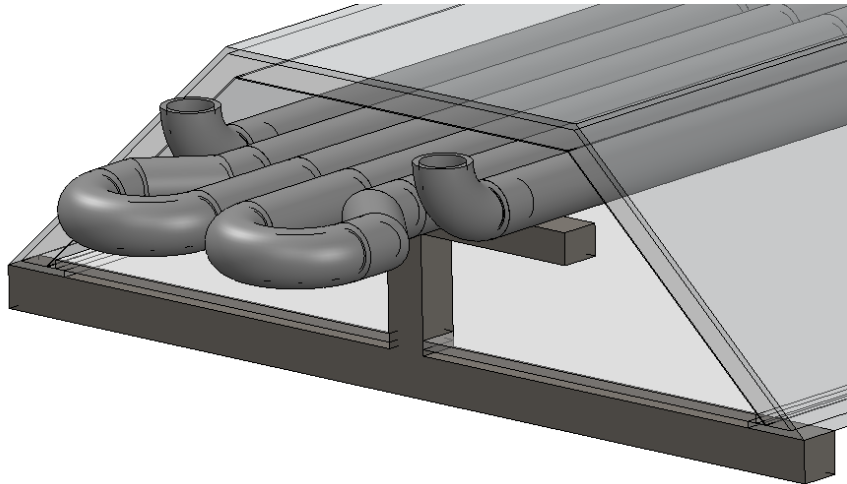


Figura 6. Vista completa de la cavidad extremo de tomas laterales de la parrilla de tubos.

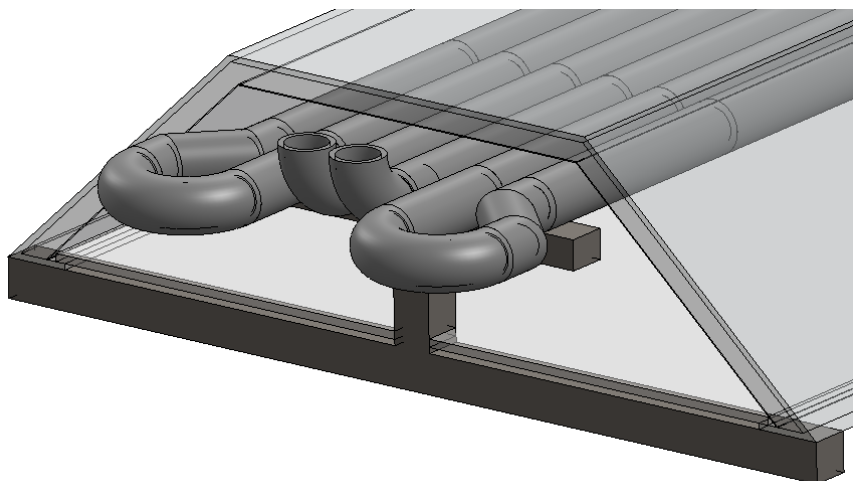


Figura 7. Vista completa de la cavidad extremo de tomas centrales de la parrilla de tubos.

Se presenta en la Figuras 8 y 9 las secciones transversales en los extremos de la cavidad, incluyendo los soportes estructurales y la parrilla de tubos.

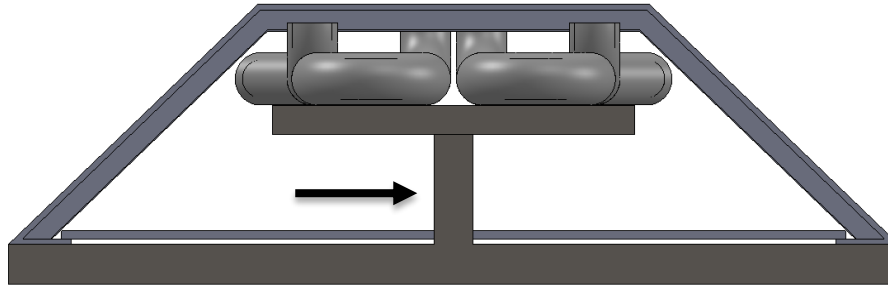


Figura 8. Sección transversal de tomas laterales de la parrilla de tubos.

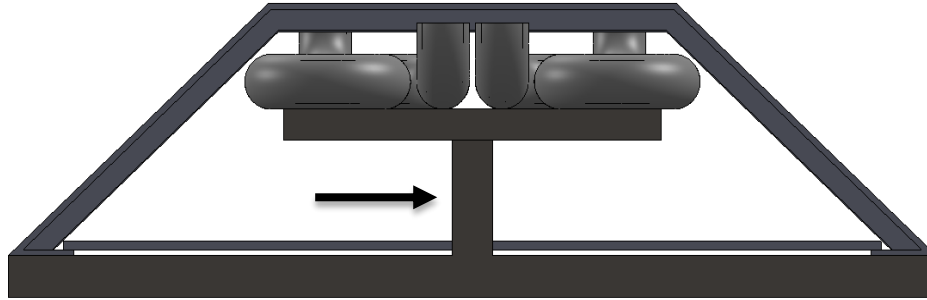


Figura 9. Sección transversal de tomas centrales de la parrilla de tubos.

Cabe mencionar que la cavidad receptora cuenta con 3 soportes estructurales, distribuidos en el centro y ambos costados, los cuales se presentan en las Figuras 8 y 9, indicados por flechas. Estos poseen un espesor de 20 mm en toda su sección, y una altura de 91 mm. Estos soportes poseen extensiones en su zona media que conectan con el suelo, lo cual no se presenta en el diseño ya que no influye en el análisis realizado.

4. Simulación del Comportamiento Térmico de la Cavity

4.1 Interfaz de SolidWorks Flow Simulation

El software SolidWorks posee dentro de su interfaz, como herramienta complementaria, la aplicación Flow Simulation [9]. Esta herramienta permite desarrollar análisis de dinámica de fluidos computacionales (CFD), lo cual se ha utilizado para este trabajo fin de master.

La herramienta requiere de un modelo CAD ya diseñado, especificando sus materiales, para luego simular el comportamiento de éste bajo las condiciones deseadas. Para esto, se trabaja con diferentes configuraciones del receptor, como se presenta en la Figura 10, donde se aprecian todos los análisis realizados, en los cuales se ha considerado el receptor completo, receptor sin la ventana de vidrio, solo la parrilla de tubos expuesta al ambiente, y solo un tubo también expuesto al ambiente. El software permite realizar análisis tanto externos como internos a la superficie diseñada, los cuales se han combinado para obtener los resultados respectivos tanto al exterior de la cavity, como los resultados concentrados al interior de los tubos.

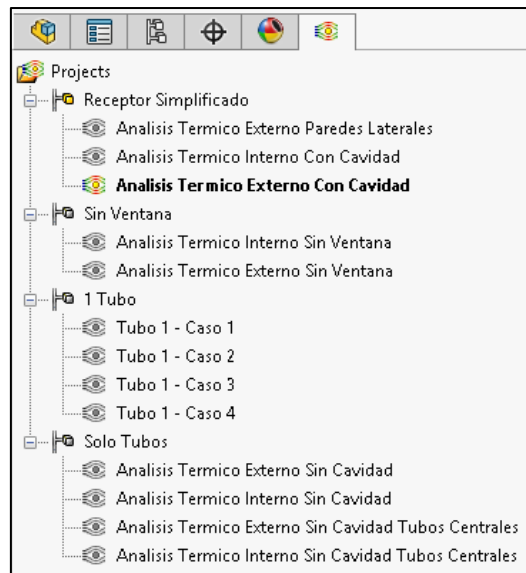


Figura 10. Configuraciones del receptor analizadas en Flow Simulation.

Luego, es necesario definir el dominio computacional con su respectivo volumen, en el cual se obtendrán los resultados, ingresando el dominio de los fluidos considerados en el análisis (agua en el interior de los tubos y aire en el exterior). Junto con esto, se definen los materiales sólidos dentro del análisis, para considerar su transferencia de calor entre sólidos, se imponen las condiciones de borde (presión de trabajo y flujo másico del agua circulante en el interior de los tubos), se define la temperatura y presión del aire ambiente, las superficies radiativas y los flujos de radiación en cada tubo. Esto se representa en la Figura 11 (a), donde se aprecia el listado de los componentes a definir previo el análisis.

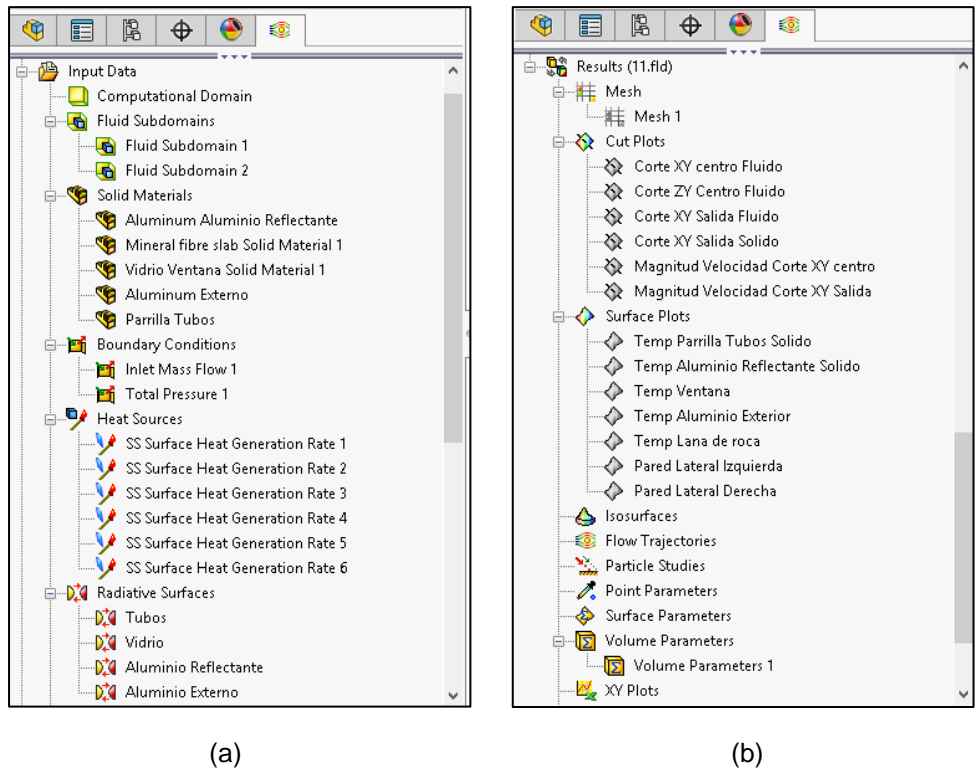


Figura 11. Listado de componentes de ingreso para el análisis (a) y de resultados de éste (b).

En la Figura 11 (b) se aprecia el listado de los resultados obtenidos del análisis, donde se han obtenido todas las imágenes de contornos de temperaturas y cortes de secciones a presentar.

Luego a modo de representación general de la aplicación, se presenta en la Figura 12 una captura de pantalla de la interfaz del programa con el ensamblaje de la cavidad receptora. En la imagen se muestra la cavidad simplificada, sin los codos de 45 y 90°, y sin los soportes estructurales.

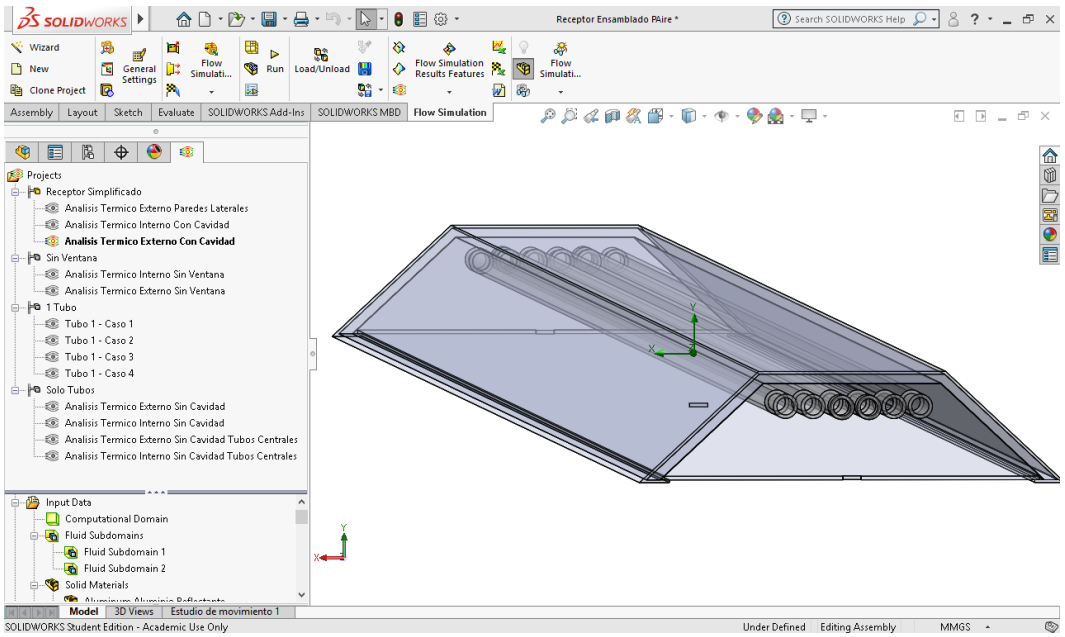


Figura 12. Interfaz general de SolidWorks Flow Simulation.

4.1.1 Condiciones de borde

Para llevar a cabo las simulaciones lo más realistas posibles, es necesario introducir adecuadamente las condiciones a las cuales opera el captador. Para esto se trabaja con los perfiles de radiación obtenidos en la Plataforma Solar de Almería, ingresando los flujos en W/m^2 incidentes sobre la cavidad del receptor. Dichos perfiles se obtienen mediante el software Tonatiuh, en una posición cenital de 0° , e irradiancia solar directa de $850 W/m^2$ representados en un total de 100000 rayos, especificados en la sección 4.1.2.

Las simulaciones se realizan en estado estacionario, considerando pérdidas térmicas por convección natural con el aire exterior a los tubos y la cavidad, pérdidas por radiación entre los tubos, ventana y paredes laterales de la cavidad al ambiente y conducción a través de los materiales sólidos. Para efectos de las pérdidas térmicas por convección natural en los tubos, se realiza un análisis externo de los fluidos, obteniendo los flujos térmicos de intercambio entre los tubos y el ambiente, y la cavidad y el ambiente.

Los demás parámetros de operación se presentan a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3. Condiciones de borde ingresadas en Flow Simulation.

Condiciones de borde	Valor [unidad]
Flujo Másico Agua	0.12 kg/s
Presión de operación	25 bar
Temperatura Ingreso Agua	180 °C
N° Reynolds	4000
Temperatura Ambiente	25 °C

4.1.2 Perfiles de radiación

Como se indica anteriormente, se utilizan perfiles de radiación obtenidos en la Plataforma Solar de Almería, los cuales se presentan a continuación en las Figura 13. Cabe destacar que dichos perfiles se proyectan a lo largo de la sección longitudinal en el tubo, correspondiente a su eje Z.

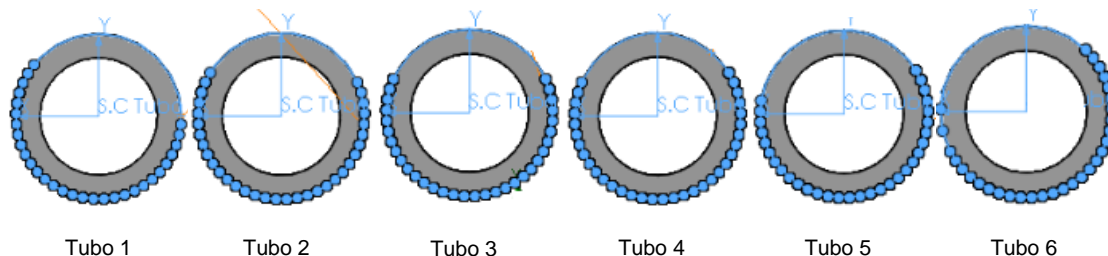


Figura 13. Perfiles de radiación incidentes sobre cada tubo en su vista transversal.

Para mayor claridad, se presenta en la Tabla 4 la irradiancia total incidente en cada tubo.

Tabla 4. Irradiancia total incidente sobre cada tubo.

	Irradiancia [W/m ²]
Tubo 1	9040743.78
Tubo 2	13562040.64
Tubo 3	12420616.68
Tubo 4	12276319.97
Tubo 5	13852484.02
Tubo 6	8918646.56

Al considerar que el Sol está en el cenit, podría esperarse que la irradiancia sobre los tubos 1, 2 y 3 pertenecientes al lado izquierdo de la parrilla, sea simétrica a los tubos 4, 5 y 6 del lado derecho, pero existe una muy pequeña diferencia en dicha simetría que se debe a varias razones. El principal motivo es el número finito de rayos que se han utilizado en el software Tonatiuh para obtener el perfil de radiación, los cuales no logran intersectar al 100% los tubos, que poseen un diámetro muy pequeño. Otro factor a considerar en el error, es el Sunshape, lo cual influye también en la direccionalidad de cada rayo reflejado por el concentrador primario del CLF y que incide en alguno de los 6 tubos que conforma el receptor.

4.2 Parámetros de Mallado

El mallado es un paso crucial en el análisis de diseño. El mallado automático en el software genera una malla basándose en un tamaño de elemento global, una tolerancia y especificaciones locales de control de malla.

El software estima un tamaño de elemento global para el modelo tomando en cuenta su volumen, área de superficie y otros datos geométricos. El tamaño de la malla generada, (número de celdas y nodos) depende de la geometría y cotas del modelo, tamaño del elemento, tolerancia de malla, control de malla y especificaciones de contacto.

Para análisis de fluidos, el software genera elementos (celdas) cúbicos y tetraédricos. En los análisis efectuados se han probado distintos tamaños de celdas hasta obtener resultados lo suficientemente precisos, tomando un tubo como referencia, los cuales se han comparado con un mallado realizado por el software Ansys Fluent en la Plataforma Solar de Almería. Se busca llegar a un compromiso entre tamaño de celda, convergencia de resultados y tiempo de computación, debido al tiempo que tarda el software en realizar las simulaciones a la parrilla de tubos y cavidad completa.

4.2.1 Análisis y definición del Mallado

A continuación en la Tabla 5 se presentan las configuraciones de mallado analizadas, separadas por casos, especificando el número de celdas de cada uno.

Tabla 5. Configuraciones de mallado analizadas.

Casos	Nº de Celdas	Nº de Celdas Fluido	Nº de Celdas Sólido	Nº Celdas de contacto entre Sólido - Fluido
1	4832	1592	3240	1624
2	41624	16640	24984	12496
3	349952	112392	237560	137488
4	637716	315560	319156	213186

Tras realizar las simulaciones pertinentes, un parámetro muy importante a tener en cuenta es la convergencia de éstas, que se puede ver de manera gráfica por los saltos u oscilaciones que presenten las curvas, de manera que la curva más estable y de incremento de temperatura del fluido más suavizado, asegura un resultado más confiable. Esto se observa a continuación en la Figura 14, representando la temperatura promedio alcanzada por el fluido en el interior del tubo, en relación al número de iteraciones que realiza el programa. El tiempo computacional que tardan las respectivas simulaciones se presenta a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6. Tiempo computacional para cada configuración de mallado analizado.

Caso	Tiempo CPU [min]
1	0.4
2	3.92
3	57.82
4	157.28

De la gráfica presentada (Fig. 14), se observa claramente la diferencia en el comportamiento de las curvas en relación al incremento de temperatura del fluido. El caso número 4, presenta un incremento más suave, sin una caída pronunciada en el comienzo de las iteraciones y alcanza la estabilidad térmica al finalizar las simulaciones. Esto indica que es la mejor configuración de mallado en comparación con los demás, en cuanto a criterios de convergencia.

Cabe destacar que todos los casos corresponden al análisis del primer tubo de la parrilla (Tubo 1, ver Fig. 10), por donde el agua ingresa por la toma lateral izquierda, y que el salto térmico sea tan solo de 2.5 °C se debe a que es la temperatura promedio del agua dentro de todo el tubo.

Temperatura media del Fluido - Iteraciones

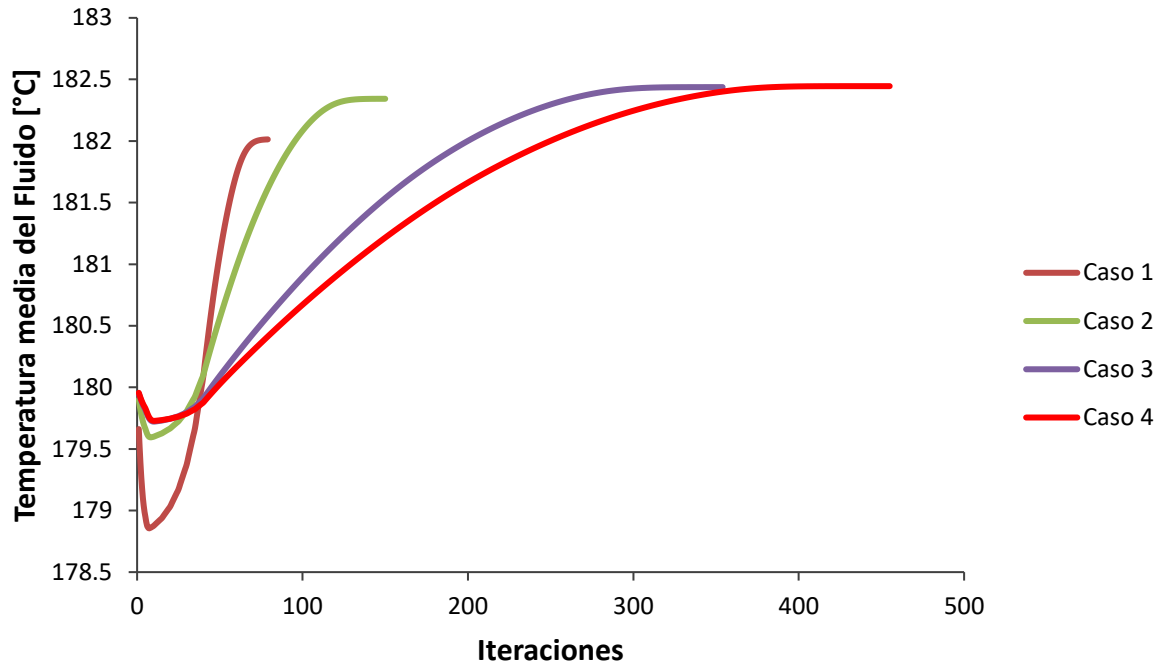


Figura 14. Temperatura promedio alcanzada por el fluido en uno de los tubos de entrada del receptor, en relación a las iteraciones realizadas para cada configuración de mallado.

Para realizar un análisis cuantitativo de los resultados, se presentan de forma gráfica en la Figura 15 la temperatura del fluido y de pared obtenida a la salida del tubo para cada caso analizado.

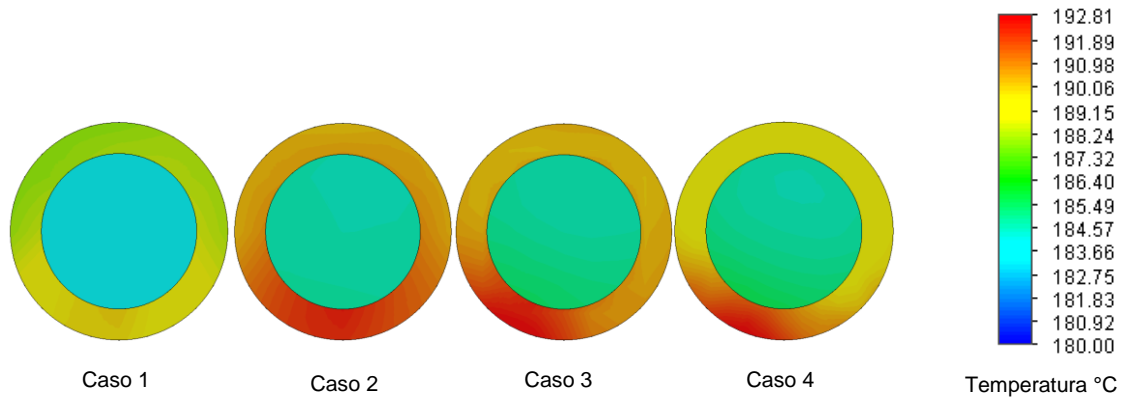


Figura 15. Perfil de temperaturas a la salida del tubo para los casos de mallado analizados.

De la figura se obtiene una clara diferencia en el perfil de temperaturas tanto en el fluido como en el tubo, lo que refleja la importancia de un mallado adecuado al momento de analizar los resultados de las simulaciones. Se observa que en el caso 4, se obtiene un gradiente de temperatura en la zona correspondiente al fluido, aumentando de manera radial. En todos los casos, como es de esperar, las

temperaturas mayores se obtienen en la superficie del tubo, alcanzando los 192.81 °C.

A continuación se presenta en la Figura 16 la sección transversal del fluido en el interior del tubo y parte de la sección longitudinal con su respectivo mallado. Se consideran entre 6 – 8 celdas para el fluido en la sección diametral de éste, con aristas inferiores a 2.3 mm cada una. El criterio utilizado para su representación gráfica, corresponde a la tolerancia de la malla, lo cual indica que si la distancia entre dos nodos es inferior al valor representado, estos se fusionan, nunca pudiendo exceder el 30% del tamaño de la celda.

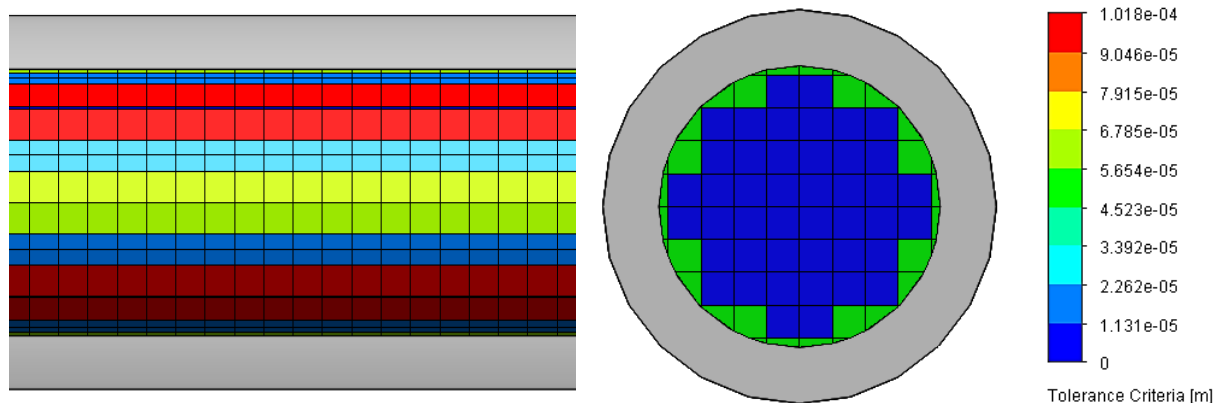


Figura 16. Malla utilizada para análisis del fluido al interior de los tubos.

Teniendo en cuenta la distribución de malla presentada, el número de celdas, tiempo de trabajo de CPU, y resultados de convergencia obtenidos, se confirma que el caso número 4 es aplicable para los análisis de la parrilla completa de tubos y cavidad receptora.

4.3 Escenarios de prueba a analizar

Teniendo en cuenta que el objetivo principal de este proyecto es el análisis de la influencia de la cavidad trapezoidal en la temperatura que alcanza el agua circulante en el interior de los tubos, en la búsqueda de disminuir las pérdidas térmicas, se analizan distintos escenarios de operación.

Primero se realizan simulaciones considerando que el agua ingresa a la parrilla de tubos por las tomas laterales (ver Figura 6). Para esto se realiza lo siguiente:

- Análisis térmico del agua y paredes de parrilla de tubos expuestos al ambiente.
- Análisis térmico del agua y paredes de parrilla de tubos dentro de la cavidad receptora.
- Análisis térmico del ambiente interior de la cavidad y alrededores.
- Análisis térmico de paredes y ventana de la cavidad.
- Análisis del Coeficiente de Pérdidas Térmicas de la cavidad.

Posteriormente se repite el análisis térmico del agua y paredes de parrilla de tubos dentro de la cavidad receptora, junto con el análisis del ambiente interior de ésta y sus alrededores, pero sin la presencia de la ventana de vidrio.

Luego, se realizan simulaciones considerando que el agua ingresa a la parrilla de tubos por las tomas centrales (ver Figura 7). Para esto se realiza lo siguiente:

- Análisis térmico del agua y paredes de parrilla de tubos expuestos al ambiente.

Comparando los resultados de estas dos configuraciones de entrada del agua en los tubos, se analiza el efecto que tiene la distribución de la radiación solar reflejada en los tubos, siendo mayor la incidente sobre los tubos centrales.

Por último, se analiza el comportamiento que tienen las paredes laterales interiores de aluminio reflectante al incidir perfiles de radiación directamente sobre ellas, desenfocando las facetas sin que alcancen los tubos.

4.3.1. Dominio Computacional

Para el desarrollo de todas las simulaciones, se considera un dominio computacional correspondiente a un prisma rectangular de dimensiones 0.5 m x 0.3 m x 5.5 m. En la Figura 17 se presenta el dominio en el plano XY, con una sección de 0.5 m x 0.3 m. El dominio computacional es muy importante ya que el análisis se efectúa solo en las zonas interiores de éste, considerando que todo el volumen externo a los tubos y a las superficies de la cavidad receptora, está compuesto por aire ambiente.

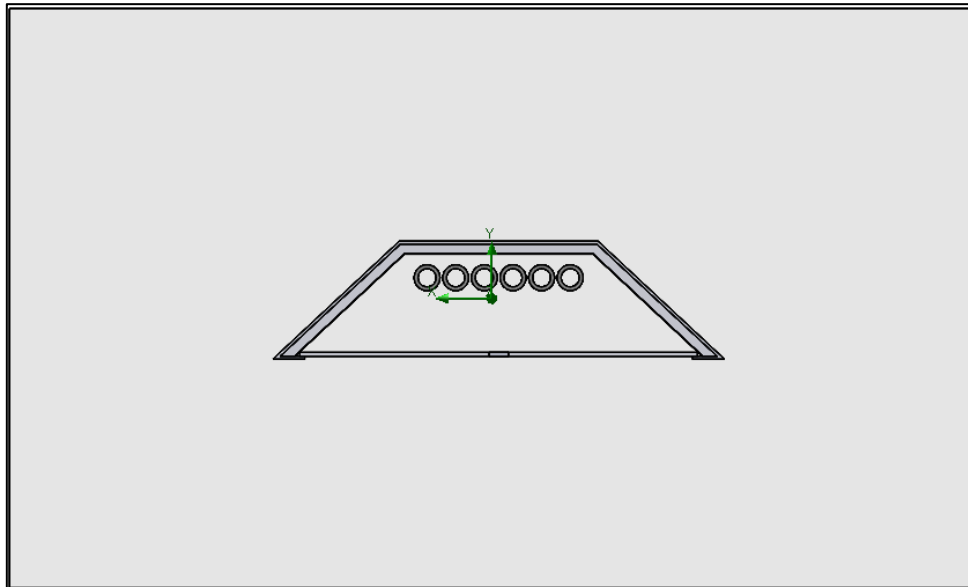


Figura 17. Dominio Computacional considerado para los análisis.

4.4 Análisis térmicos con ingreso del agua a los tubos por tomas laterales

Primero se presentan los resultados obtenidos para las simulaciones con el ingreso del agua en los tubos por las tomas laterales de éstos. Se presentan los resultados para los tubos expuestos al ambiente, y luego para los tubos dentro de la cavidad trapezoidal, con el fin de comparar los resultados y ver el efecto que tiene la cavidad en las pérdidas térmicas.

4.4.1 Análisis térmico del agua y paredes de parrilla de tubos expuestos al ambiente

Teniendo en cuenta que el flujo de agua entra a 180 °C por las tomas laterales, e incide radiación solar reflejada por las facetas en la superficie de cada tubo de 10 m, se obtiene el siguiente contorno de temperaturas en la superficie exterior de los tubos, presentado en la Figura 18. Como se observa en la imagen, la temperatura de

del tubo va aumentando a medida que circula el agua, alcanzando una temperatura máxima de 208.23 °C en la zona de salida de los tubos del centro.

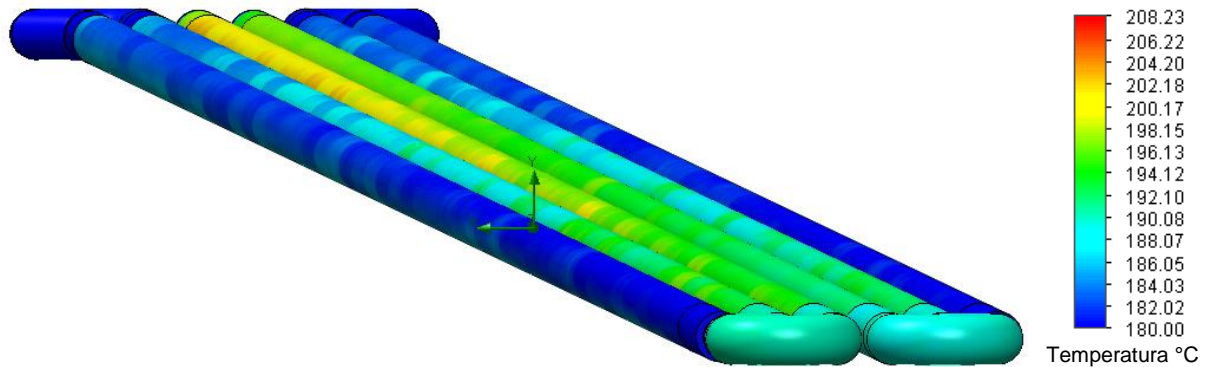


Figura 18. Contorno de temperaturas de la superficie de la parrilla de tubos expuestos al ambiente sin cavidad receptora.

Haciendo un análisis en el fluido, se obtiene que la temperatura máxima que éste alcanza en la salida es de 202.47 °C, y en el plano medio de los tubos de 198.19 °C. Estos resultados se presentan en un corte transversal a continuación en las Figuras 19 y 20, respectivamente. Dada la configuración de entrada y salida del agua por los tubos, las temperaturas máximas en cada figura se concentran en los dos tubos centrales, correspondientes a la salida, y las temperaturas más bajas se concentran en los dos tubos en los extremos, correspondientes a los de entrada.

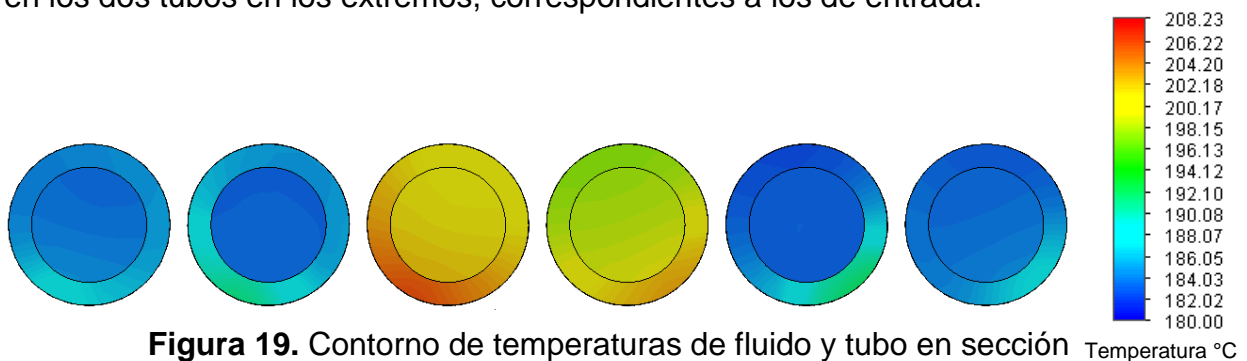


Figura 19. Contorno de temperaturas de fluido y tubo en sección transversal a la salida.

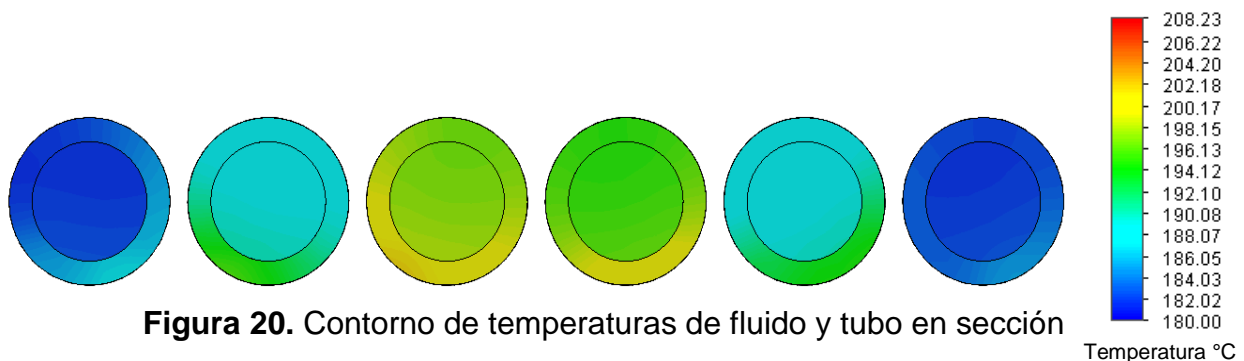


Figura 20. Contorno de temperaturas de fluido y tubo en sección transversal en el plano medio.

De ambas figuras se visualiza claramente que la superficie sólida de los tubos es la que alcanza mayor temperatura; y comparando ambas imágenes se observa el incremento de temperatura tanto del fluido como del tubo desde el plano medio hasta la salida.

4.4.2 Análisis térmico del agua y paredes de parrilla de tubos dentro de la cavidad receptora

Este análisis considera la parrilla de tubos dentro de la cavidad receptora, por lo que las pérdidas térmicas disminuyen considerablemente. Esto se puede ver de forma inmediata tanto en los contornos del tubo como del fluido, alcanzando una temperatura máxima exterior en la superficie de los tubos de 242.49 °C, situación representada en la Figura 21.

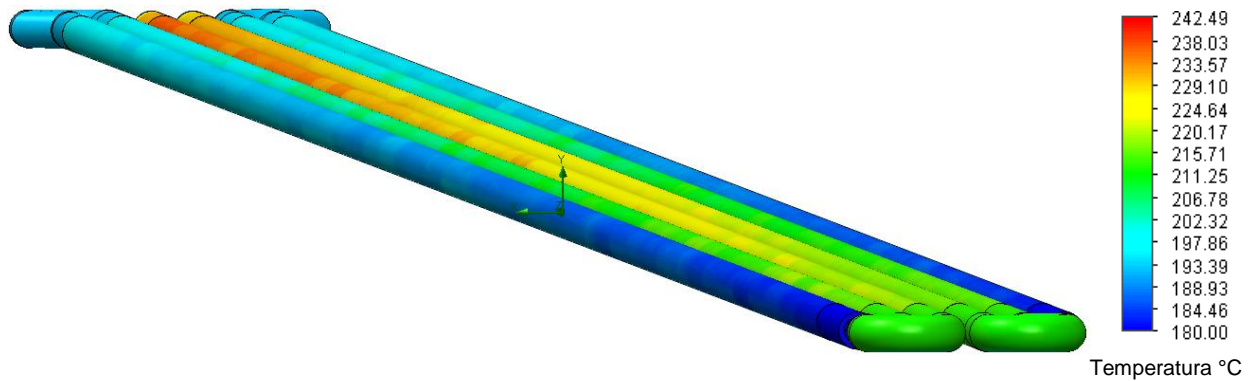


Figura 21. Contorno de temperaturas de la superficie de la parrilla de tubos al interior de la cavidad receptora.

Haciendo un análisis en el fluido, se obtiene que la temperatura máxima que éste alcanza en la salida es de 231.57 °C, y en el plano medio de los tubos de 223.92 °C. Estos resultados se presentan en un corte transversal a continuación en las Figuras 22 y 23, respectivamente. Dada la configuración de entrada y salida del agua por los tubos, las temperaturas máximas en cada figura se concentran en los dos tubos centrales, correspondientes a la salida, y las temperaturas más bajas se concentran en los dos tubos en los extremos, correspondientes a los de entrada.

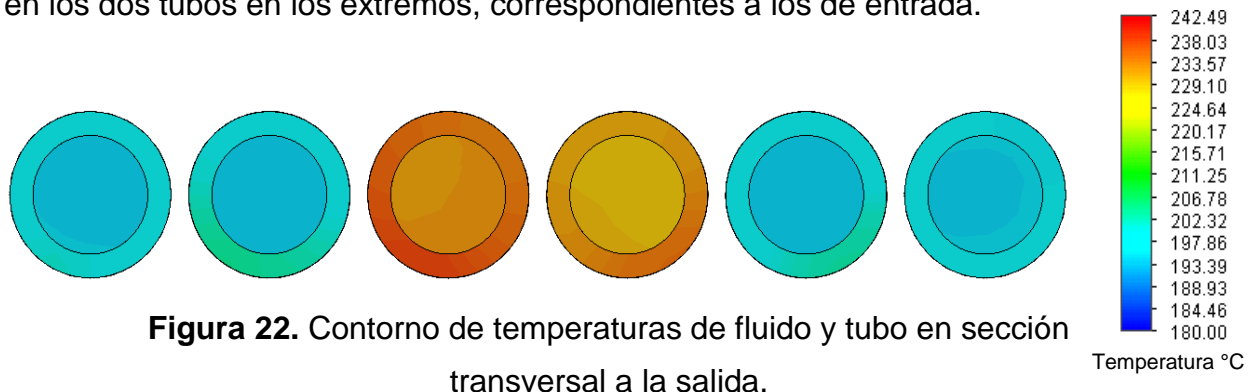


Figura 22. Contorno de temperaturas de fluido y tubo en sección transversal a la salida.

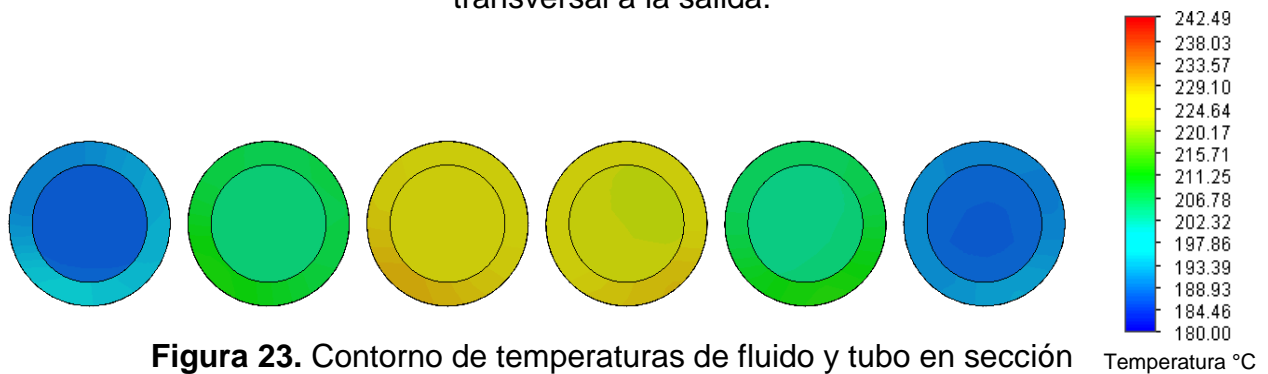


Figura 23. Contorno de temperaturas de fluido y tubo en sección transversal en el plano medio.

Nuevamente, de ambas figuras se visualiza claramente que la superficie sólida de los tubos es la que alcanza mayor temperatura; y comparando ambas imágenes se observa el incremento de temperatura tanto del fluido como del tubo desde el plano medio hasta la salida.

4.4.3 Análisis térmico del ambiente interior de la cavidad y alrededores

Al igual que en el análisis presentado en la sección anterior (4.4.2), se realiza un análisis con los tubos dentro de la cavidad, pero enfocado en el ambiente interno de la cavidad y sus alrededores, es decir, en la temperatura que alcanza el aire. Para esto cabe destacar nuevamente que se consideran sólo pérdidas por convección natural con aire ambiente a 25 °C, y transferencias de calor por radiación entre las superficies de la cavidad y el ambiente; y conducción entre los sólidos en contacto. De esta manera, se presenta en las Figuras 24 y 25, mediante un corte de la sección transversal, los contornos de temperatura de los fluidos (aire y agua) al interior de la cavidad y alrededores, para las situaciones de salida y plano medio, respectivamente.

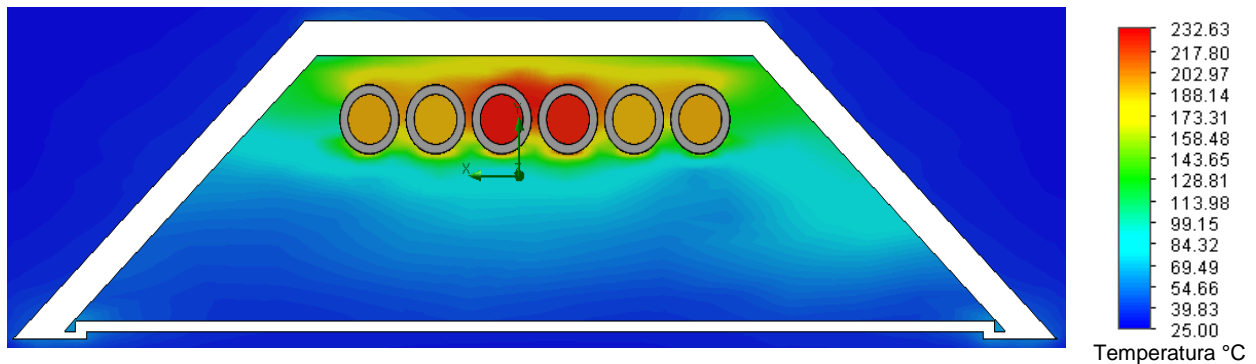


Figura 24. Contornos de temperaturas del ambiente interno y alrededores de la cavidad receptora en la salida.

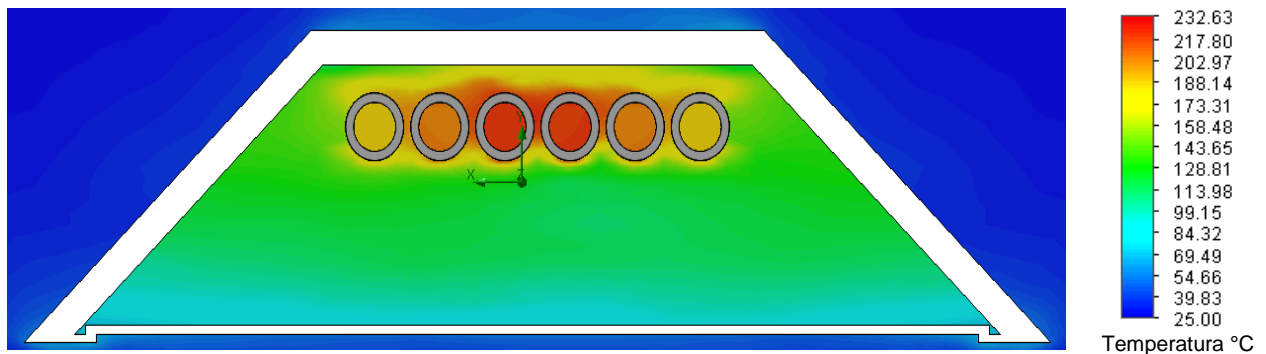


Figura 25. Contornos de temperaturas del ambiente interno y alrededores de la cavidad receptora en el plano medio.

Estas figuras se presentan para demostrar la variación de niveles de temperatura que existe al interior de la cavidad. Además, se demuestra muy claramente una disipación del calor presente en el aire en la salida en comparación con el plano medio de la cavidad. Esto es debido a que tanto la salida como la entrada están expuestas al ambiente, y hay mayores pérdidas térmicas; por el contrario, en el plano medio, es decir, en el centro de la cavidad, el ambiente está mucho más protegido, por lo que los niveles de temperatura del aire son mayores.

Cabe destacar que la temperatura máxima presente en ambas figuras corresponde a la del agua circulante en el interior de los tubos, por lo que para tener claro conocimiento de la temperatura del aire, se presenta en la Figura 26 una gráfica comparativa para la salida y el plano medio, tomando en cuenta la variación vertical de acuerdo a la altura de la cavidad, en el centro de su sección transversal.

De la gráfica se entiende que hay una clara diferencia entre las temperaturas alcanzadas por altura de la cavidad, alcanzando valores cercanos a los 200 °C en el plano medio en la zona intermedia a los tubos centrales (0.08 m de altura). En el mismo punto, para las condiciones de salida, se tienen valores por debajo de los 170 °C. Luego, la zona que demuestra ser más constante en ambas representaciones, es en la zona más alta de la cavidad, donde ambas curvas alcanzan temperaturas similares.

Temperatura del Aire al Interior de la Cavidad respecto a su Altura

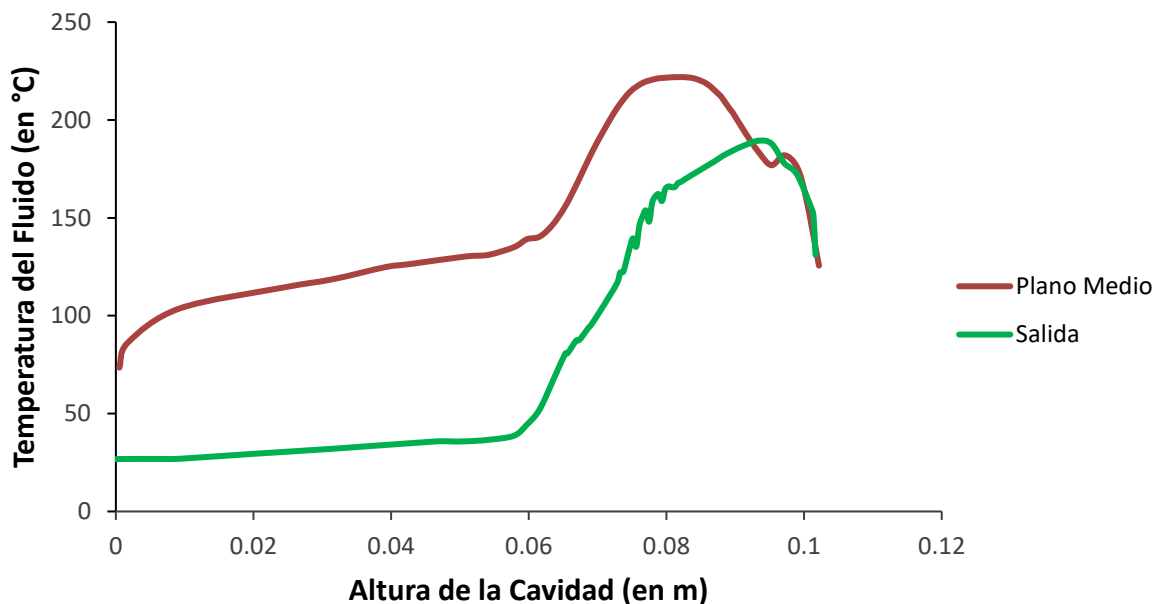


Figura 26. Gráfica comparativa de temperaturas del aire respecto a la altura de la cavidad receptora en el punto medio de su sección transversal para las condiciones de plano medio y salida.

Las dos imágenes a continuación, correspondientes a las Figuras 27 y 28, demuestran la transferencia de calor por convección en el ambiente interior y exterior a la cavidad con el aire ambiente. Las figuras muestran la magnitud de velocidad por el movimiento de los fluidos tanto como del agua al interior de los tubos, y el aire en sus alrededores. La Figura 27 corresponde a la situación en el plano transversal de salida y la 28 a la del plano medio de la cavidad.

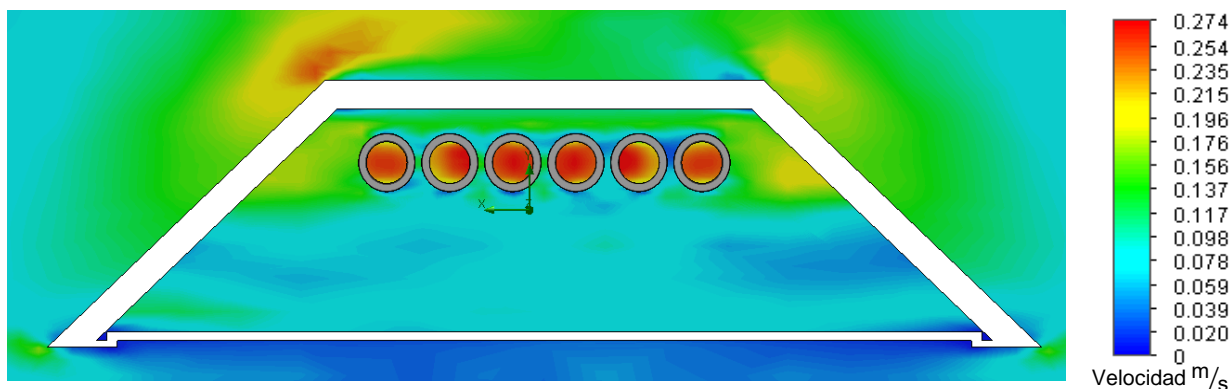


Figura 27. Contornos de la magnitud de velocidad de los fluidos en el interior y alrededores de la cavidad receptora en la salida.

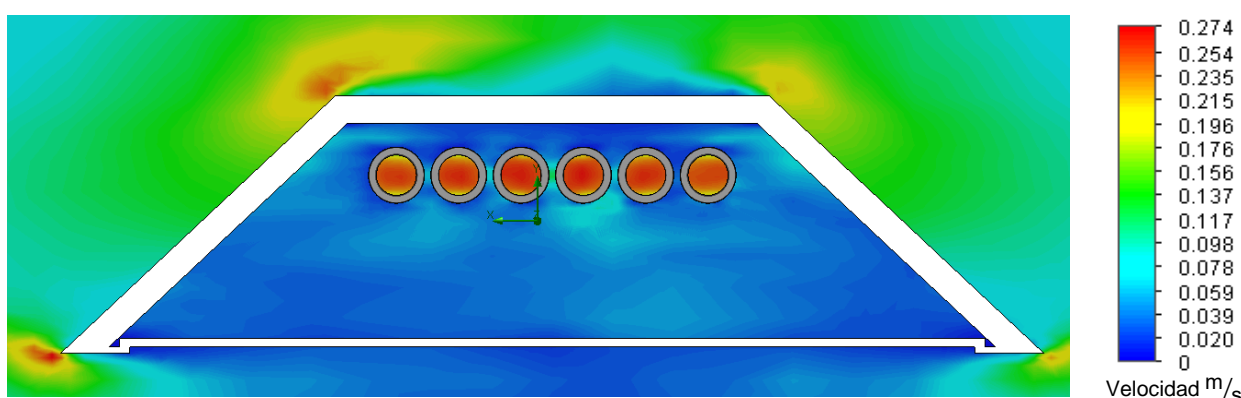


Figura 28. Contornos de la magnitud de velocidad de los fluidos en el interior y alrededores de la cavidad receptora en el plano medio.

En estas Figuras 27 y 28 se observa que a la salida existe un mayor intercambio de calor por convección debido al aire, ya que se observan magnitudes de velocidad mayores en los costados superiores interiores de la cavidad, zona donde hay mayor temperatura debido a la parrilla de tubos. También, en ambas figuras se aprecian valores elevados en los alrededores de la cavidad, es decir, en el ambiente externo. Esto es debido a la temperatura que alcanzan las paredes tanto interiores como exteriores de la cavidad, por la conducción a través de los sólidos, pese a tener una capa de lana mineral de efecto aislante.

4.4.4 Análisis térmico de paredes y ventana de la cavidad

Se procede a analizar las temperaturas alcanzadas por las paredes laterales, superior y ventana de la cavidad receptora.

4.4.4.1 Análisis térmico de láminas de aluminio reflectante

Se presenta en la Figura 29 la temperatura superficial del aluminio reflectante utilizado en la pared interior de la cavidad, alcanzando un máximo de 129.35 °C, en la zona superior de ésta, por encima de la parrilla de tubos; y una mínima de 59.48 °C en los costados inferiores.

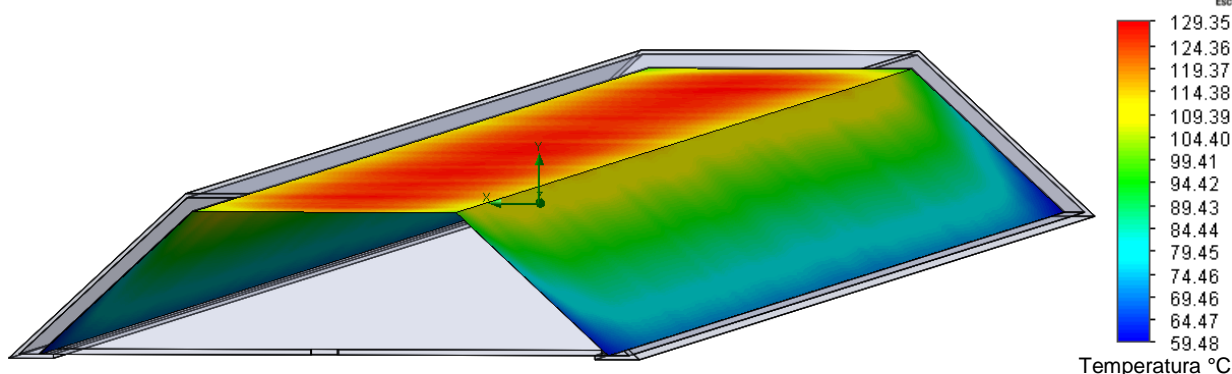


Figura 29. Contorno de temperaturas de superficie de láminas de aluminio reflectante.

De todas las superficies que conforman la cavidad, ésta es la que más temperatura recibe, al estar más expuesta a la radiación reflejada por las facetas y en cercanía de la parrilla de tubos. Sin embargo los niveles de temperatura alcanzados no son alarmantes, ya que este material presenta una temperatura de fusión de 660 °C.

De la imagen queda expuesta la influencia que tiene la transferencia de calor con el aire ambiente en toda su superficie, al presentar los valores más bajos en los costados inferiores lejos de la superficie radiante de los tubos. Para analizar este escenario más de cerca, se presenta en la Figura 30 el contorno de temperaturas que alcanzan justamente las paredes laterales de aluminio reflectante. La pared lateral izquierda llega a una temperatura máxima de 114.48 °C, y la pared lateral derecha a una temperatura de 115.06 °C.

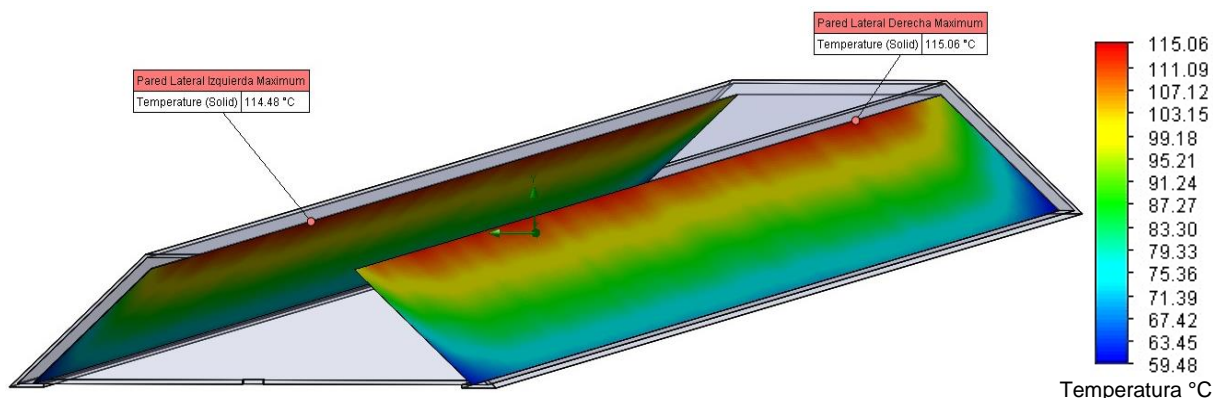


Figura 30. Contorno de temperaturas de superficie de paredes laterales de aluminio reflectante.

4.4.4.2 Análisis térmico de paredes exteriores de aluminio

Se presenta en la Figura 31 la temperatura superficial de la capa exterior de aluminio que protege a la cavidad, alcanzando un máximo de 71.01 °C y un mínimo de 59.39 °C. Al igual que en las capas de aluminio interiores, las temperaturas máximas se concentran en la parte plana superior, situación debida a la transferencia de calor por conducción entre las paredes de la cavidad.

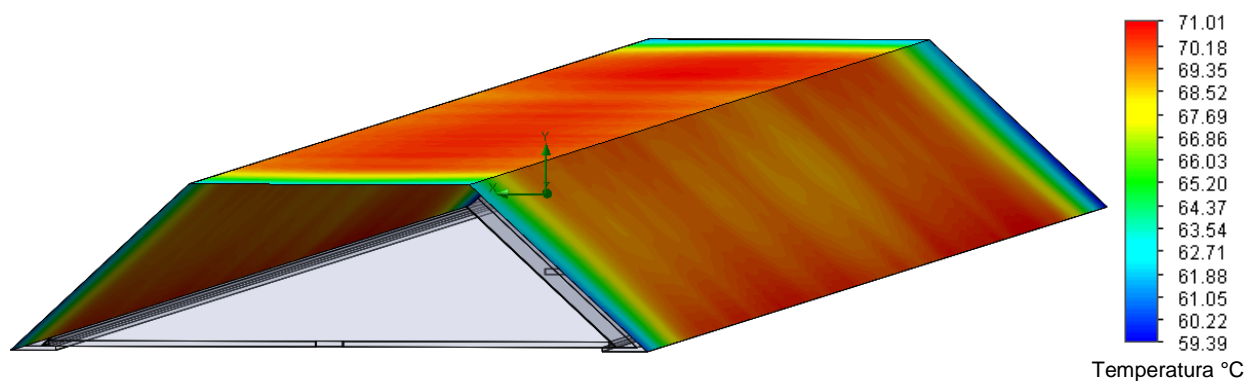


Figura 31. Contorno de temperaturas de superficie de capa de aluminio exterior de la cavidad receptora.

4.4.4.3 Análisis térmico de la ventana de vidrio

Se presenta en la Figura 32 la temperatura superficial de la ventana de vidrio situada en la abertura horizontal inferior de la cavidad. Como se observa en la imagen, alcanza temperaturas máximas de 96.77 °C distribuidos en la superficie donde incide el flujo de radiación hacia los tubos. Se observa el gradiente de temperaturas hacia los costados, donde predominan zonas cercanas a los 60 °C a lo largo de toda la ventana. En los extremos de ésta, hay zonas que permanecen a 25 °C, es decir, a la temperatura ambiente,

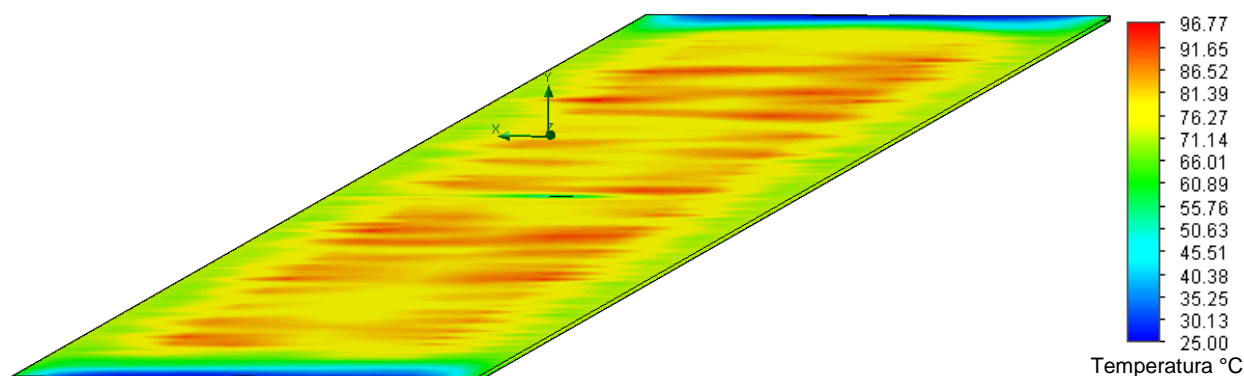


Figura 32. Contorno de temperaturas de superficie de la ventana de vidrio.

Como se indica anteriormente, las propiedades ópticas del material de la ventana, impiden que ésta alcance temperaturas tan elevadas, pese a que incide toda la radiación solar reflejada por las facetas directamente a través de ella. Esto es ya que tiene un comportamiento casi transparente (alta transmitancia de la radiación solar), absorbiendo solo el 2% del calor incidente en ella. Sin embargo, juega un papel clave en impedir el aumento de las pérdidas térmicas por aire ingresando por la parte inferior de la cavidad, donde se registraron magnitudes de velocidad de fluido cercanas a 0 m/s.

4.4.5 Coeficiente de Pérdidas Térmicas Globales de la Cavidad Completa

El coeficiente de pérdidas térmicas U_L es un indicador clave del rendimiento térmico de la cavidad receptora. A medida que U_L incrementa, también lo hacen las pérdidas de calor globales. U_L se define mediante la relación (1) como:

$$U_L = \frac{q_{loss}}{A_c(T_{c,av} - T_{a,av})}, \quad (1)$$

donde q_{loss} corresponde al flujo de calor cedido al ambiente por la cavidad, A_c al área superficial de la cavidad completa, $T_{c,av}$ es la temperatura media de los sólidos de la cavidad y $T_{a,av}$ es la temperatura media del aire ambiente.

Teniendo en cuenta las temperaturas de las paredes y ventana, ya se conocen las temperaturas de sólido de todas las secciones de la cavidad, por lo que mediante la relación (1), se puede estimar el coeficiente de pérdidas térmicas global de la cavidad receptora, trabajando con los valores de temperatura de sólidos y aire promedio, y el área superficial total de la cavidad presentados en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros para el cálculo de U_L de la cavidad completa.

Parámetros	Valor [unidad]
A_c	52.43 m ²
q_{loss}	28077.77 W
$T_{c,av}$	100.17 °C
$T_{a,av}$	28.81 °C

Con estos valores, se obtiene que el coeficiente U_L de la cavidad receptora completa en estado estacionario es 7.51 W/m²K, valor que coincide con el entregado por el software SolidWorks tras realizar los análisis.

4.5 Análisis térmicos con ingreso del agua a los tubos por tomas laterales y cavidad sin ventana de vidrio

En esta sección se realizan análisis térmicos sin la presencia de la ventana de vidrio en la cavidad. Se realizan los análisis a la parrilla de tubos, al agua en su interior, las paredes y sólidos que conforman la cavidad y sus ambientes interno y externo.

4.5.1 Análisis térmico del agua y paredes de parrilla de tubos dentro de la cavidad receptora

Se presenta en la Figura 33 el contorno de temperaturas en la superficie de la parrilla de tubos, en la cual se alcanza un máximo de 233.20 °C.

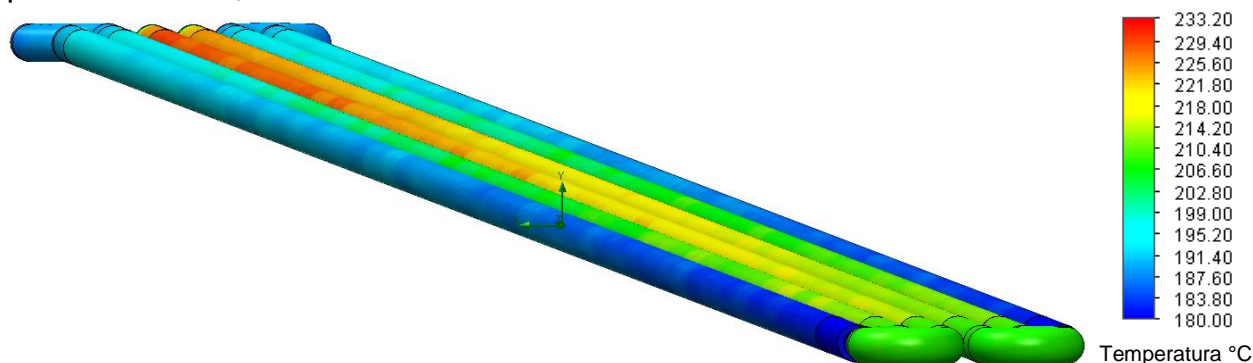
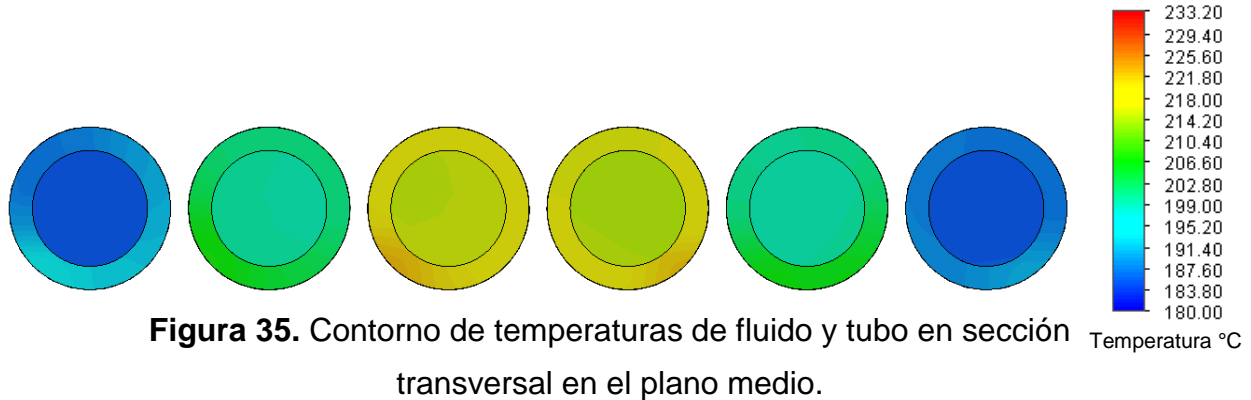
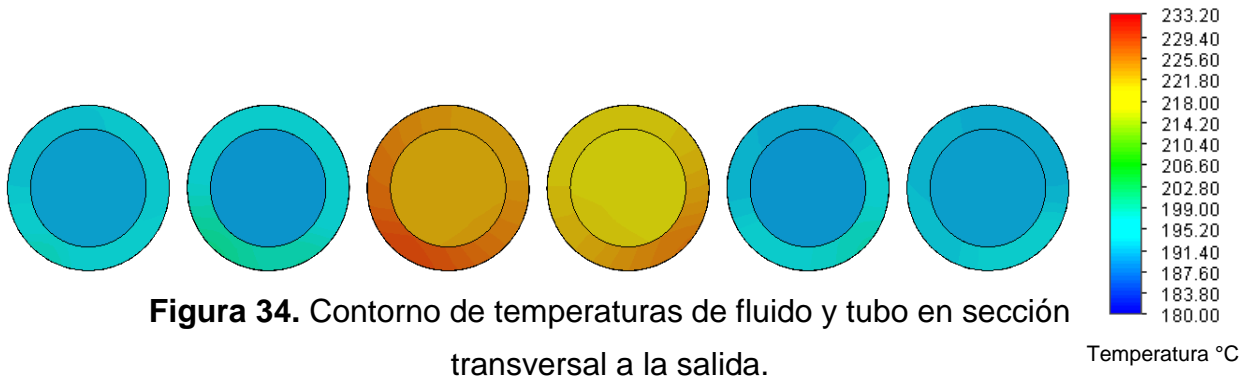


Figura 33. Contorno de temperaturas de superficie de parrilla de tubos.

Luego, la temperatura máxima alcanzada por el agua circulante al interior de los tubos es de 226.85 °C, lo cual se ve representado en un corte de sección transversal a la salida en la Figura 34. Posteriormente en la Figura 35 se presenta el mismo corte realizado en el plano medio, donde el agua está a 214.69 °C.



Nuevamente, de ambas figuras se visualiza claramente que la superficie sólida de los tubos es la que alcanza mayor temperatura; y comparando ambas imágenes se observa el incremento de temperatura tanto del fluido como del tubo desde el plano medio hasta la salida.

4.5.2 Análisis térmico del ambiente interior de la cavidad y alrededores

Al igual que en el análisis presentado en la sección anterior, se realiza un análisis con los tubos dentro de la cavidad, pero enfocado en el ambiente interno de la cavidad y sus alrededores, es decir, en la temperatura que alcanza el aire. Para esto cabe destacar nuevamente que se consideran sólo pérdidas por convección natural con aire ambiente a 25 °C, y transferencias de calor por radiación entre las superficies de la cavidad y el ambiente; y conducción entre los sólidos en contacto. De esta manera, se presenta en las Figuras 36 y 37, mediante un corte de la sección transversal, los contornos de temperatura de los fluidos (aire y agua) al interior de la cavidad y alrededores, para las situaciones de salida y plano medio, respectivamente.

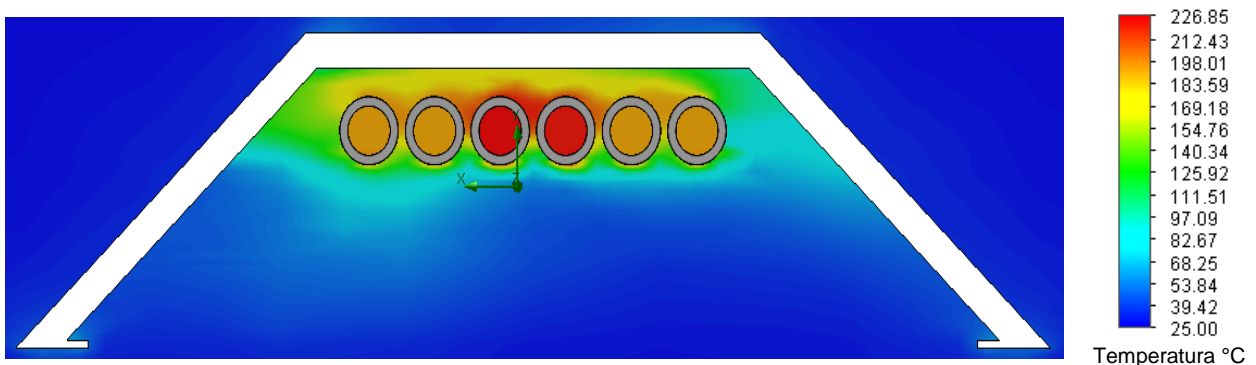


Figura 36. Contornos de temperaturas del ambiente interno y alrededores de la cavidad receptora en la salida.

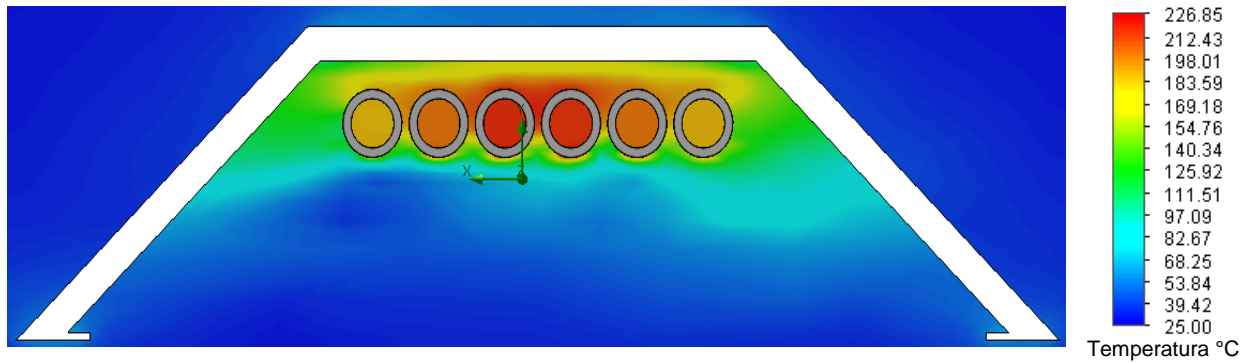


Figura 37. Contornos de temperaturas del ambiente interno y alrededores de la cavidad receptora en el plano medio.

Como se observa en las figuras, hay un perfil de temperaturas más homogéneo en la salida que en el plano medio, donde se tienen temperaturas del aire más altas en general. Los valores máximos de temperatura del aire se presentan en la zona de los tubos, disipándose hacia los costados. En la Figura 38 a continuación, se presenta la variación de la temperatura del aire, respecto a la altura de la cavidad, tanto como para la salida como para el plano medio.

Temperatura del Aire al Interior de la Cavidad respecto a su Altura

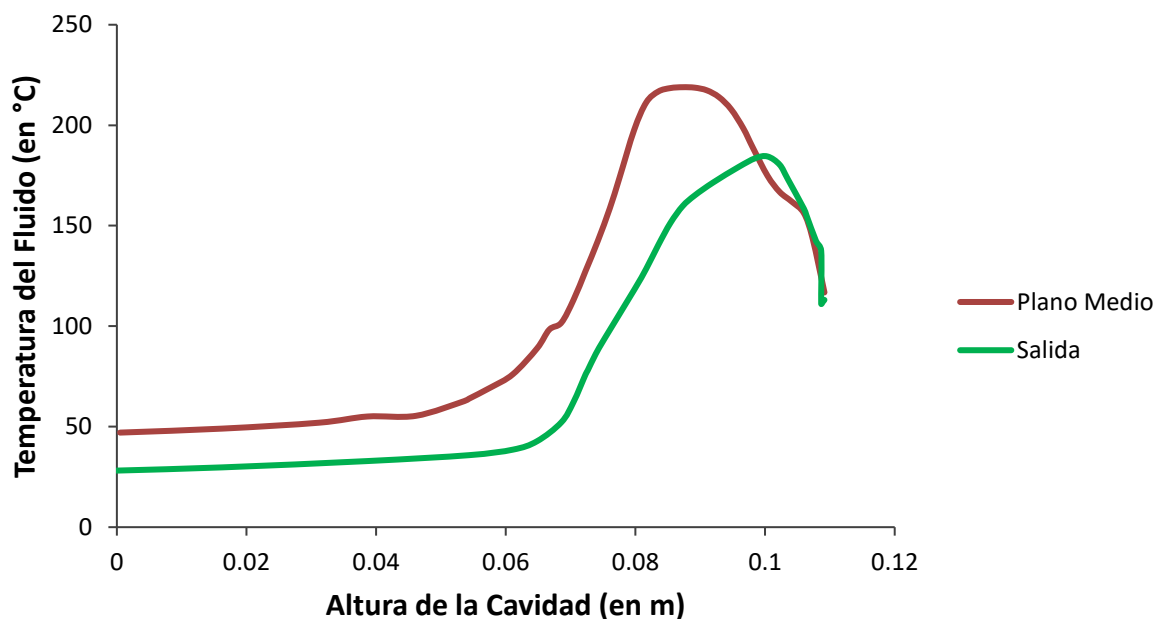


Figura 38. Gráfica comparativa de temperaturas del aire respecto a su altura en la cavidad receptora en el punto medio de su sección transversal para las condiciones de plano medio y salida (cavidad sin ventana de vidrio).

De la gráfica se demuestra que el aire alcanza temperaturas mayores en el plano medio de la cavidad en comparación con la salida, excepto en la zona de los tubos, donde la salida presenta zonas más calientes debido a la transferencia de calor con los tubos a mayor temperatura.

Las dos imágenes a continuación, correspondientes a las Figuras 39 y 40, demuestran la transferencia de calor por convección en el ambiente interior y exterior

a la cavidad con el aire ambiente. Las figuras muestran la magnitud de velocidad por el movimiento de los fluidos tanto como del agua al interior de los tubos, y el aire en sus alrededores. La Figura 39 corresponde a la situación de salida y la 40 a la del plano medio de la cavidad.

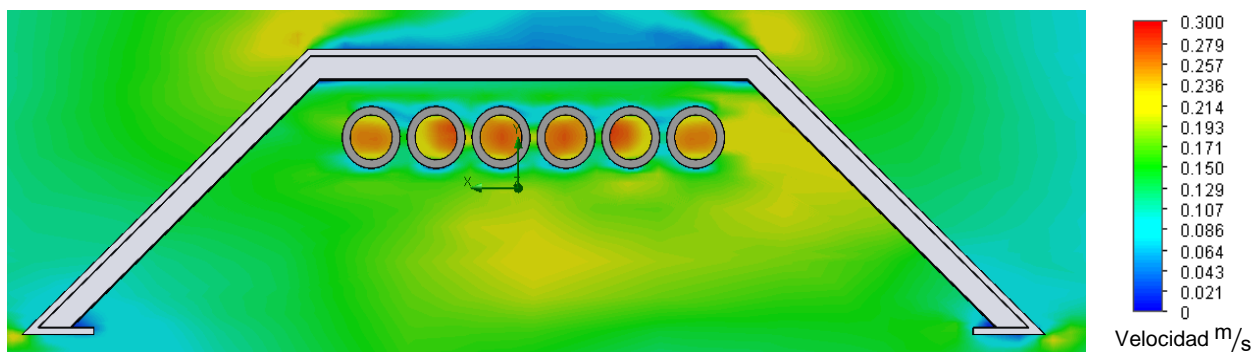


Figura 39. Contornos de la magnitud de velocidad de los fluidos en el interior y alrededores de la cavidad receptora en la salida.

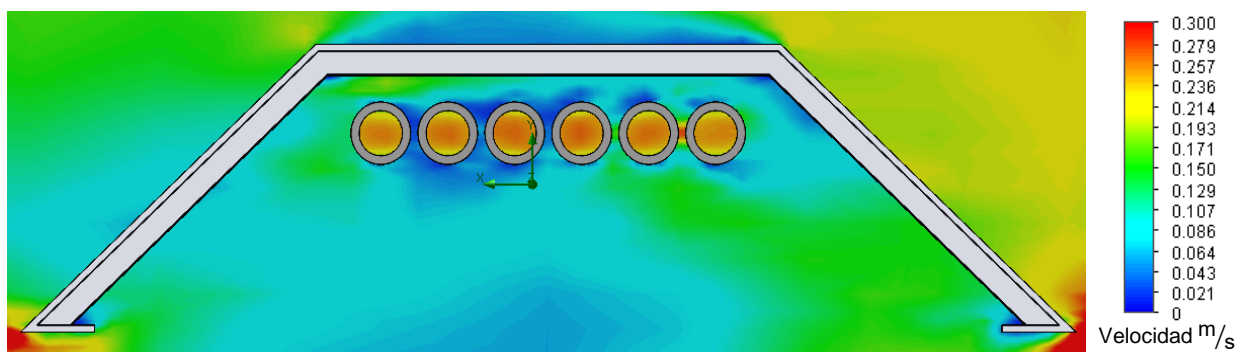


Figura 40. Contornos de la magnitud de velocidad de los fluidos en el interior y alrededores de la cavidad receptora en el plano medio.

En la situación de salida, se ve que hay mayor movimiento al interior de la cavidad, en comparación con el corte en el plano medio. Esto es porque la salida está más expuesta que el centro de la cavidad, y porque hay mayor diferencias de temperaturas entre los tubos, lo que implica mayor transferencia de calor entre los fluidos. Sin embargo, como se aprecia en la Figura 40, en el ambiente externo a la cavidad, hay un mayor movimiento del fluido, alcanzando valores máximos de 0.3 m/s en las esquinas laterales inferiores.

4.5.3 Análisis térmico de paredes interiores y exteriores de la cavidad

Se procede a analizar térmicamente las paredes de aluminio reflectante interiores de la cavidad, y las paredes de aluminio exteriores.

4.5.3.1 Análisis térmico de láminas de aluminio reflectante

Se presenta en la Figura 41 el contorno de temperaturas de superficie de las láminas de aluminio reflectante al interior de la cavidad. Como se ve en la imagen, alcanzan una temperatura máxima de $122.78 \text{ }^\circ\text{C}$ y una mínima de $54.18 \text{ }^\circ\text{C}$.

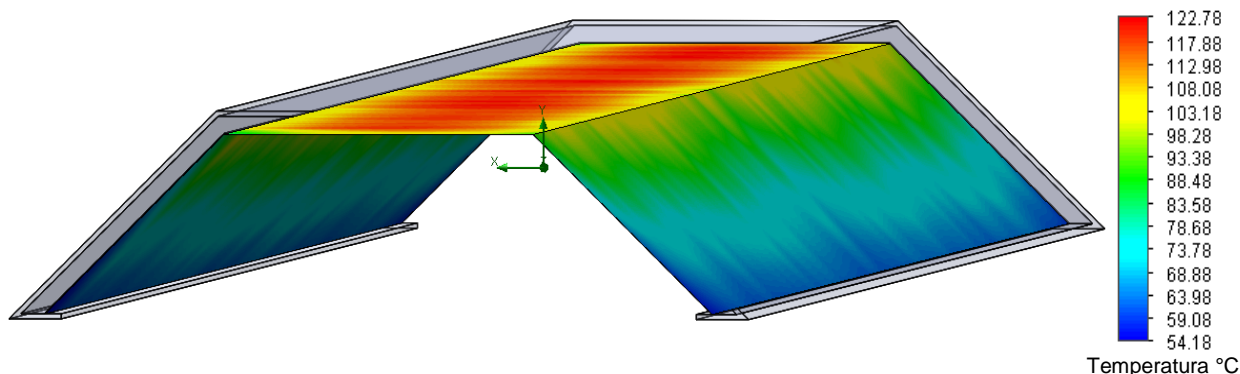


Figura 41. Contorno de temperaturas de superficie de paredes interiores de aluminio reflectante.

4.5.3.2 Análisis térmico de paredes exteriores de aluminio

Se presenta en la Figura 42 el contorno de temperaturas de superficie obtenidas para las paredes exteriores de aluminio de la cavidad. Como se ve en la imagen, se alcanza una temperatura máxima de 65.84 °C, y una mínima de 54.14 °C.

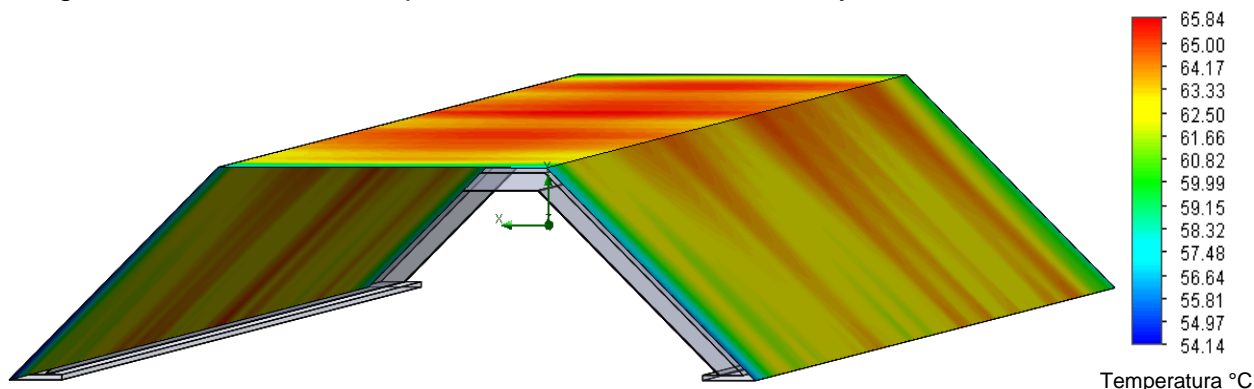


Figura 42. Contorno de temperaturas de superficie de capa de aluminio exterior de la cavidad receptora.

Las temperaturas máximas se alcanzan en la zona superior de la cavidad, debido a la transferencia de calor a través de la capa de lana mineral, debido a las altas temperaturas de la pared superior de aluminio reflectante al interior. Las temperaturas más bajas se presentan en los costados, zonas cercanas a la sección transversal.

4.5.4 Coeficiente de Pérdidas Térmicas Globales de la Cavidad Sin Ventana

Teniendo en cuenta las temperaturas de las paredes, ya se conocen las temperaturas de sólido de todas las secciones de la cavidad sin ventana, por lo que mediante la relación (1) (Ver Sección 4.4.5), se puede estimar el coeficiente de pérdidas térmicas globales de la cavidad receptora sin ventana, trabajando con los valores de temperatura de sólidos y aire promedio, y el área superficial total de la cavidad para este caso, presentados en la Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros para el cálculo de U_L de la cavidad sin ventana.

Parámetros	Valor [unidad]
A_c	43.77 m ²
q_{loss}	28329.65 W
$T_{c,av}$	98.68 °C
$T_{a,av}$	29.75 °C

Con estos valores, se obtiene que el coeficiente U_L de la cavidad receptora completa en estado estacionario es 9.41 W/m²K, valor que coincide con el entregado por el software SolidWorks tras realizar los análisis.

4.6 Análisis térmicos con ingreso del agua a los tubos por tomas centrales

En esta ocasión, se analiza el efecto térmico que se obtiene al ingresar el agua por las tomas centrales de la parrilla de tubos, caso contrario al analizado anteriormente en las secciones 4.4 y 4.5. Para esto, se presentará el análisis sólo de la parrilla de tubos expuesta al ambiente, sin considerar la cavidad receptora. Las condiciones de trabajo son exactamente las mismas consideradas en la sección 4.4.

A continuación, en la Figura 43 se presenta el contorno de temperaturas de la superficie de la parrilla de tubos, alcanzando un máximo de 207.21 °C. En la imagen se aprecia que los niveles mayores de temperatura se alcanzan en los tubos de los extremos, caso contrario a las situaciones anteriores donde eran las temperaturas más bajas.

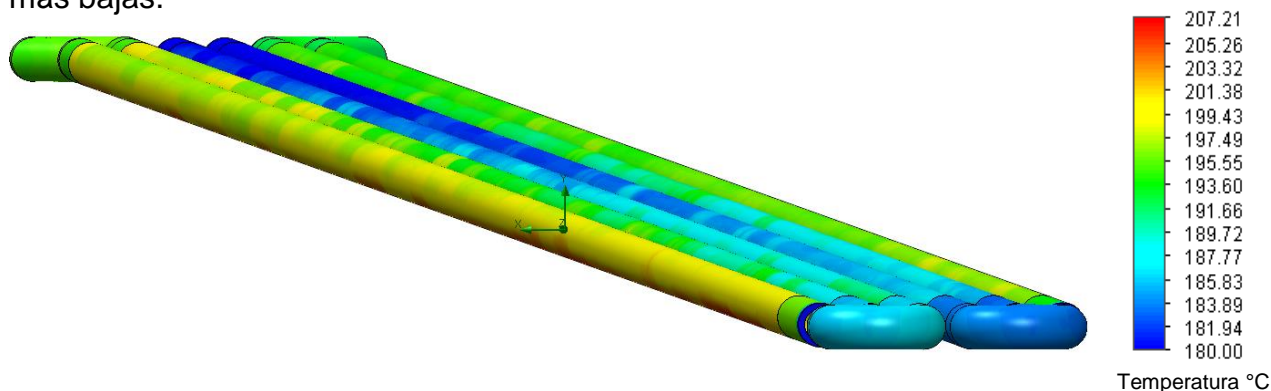
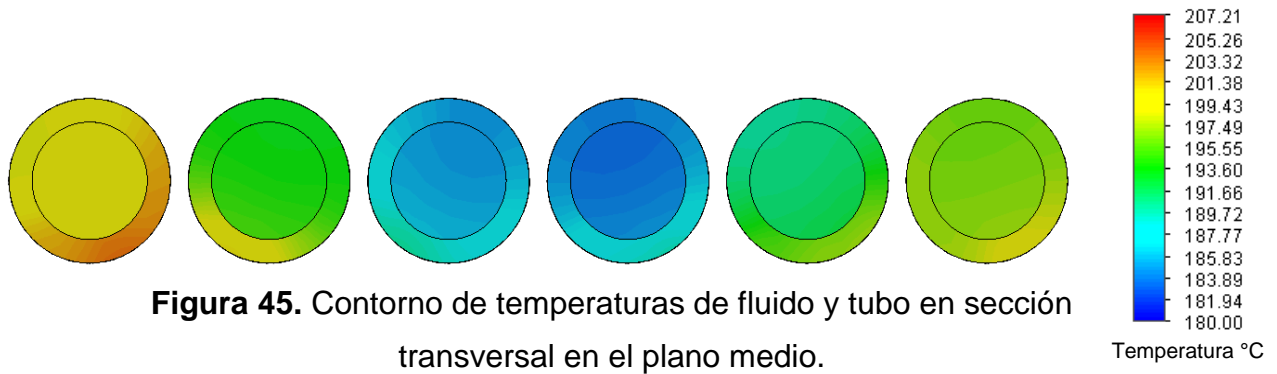
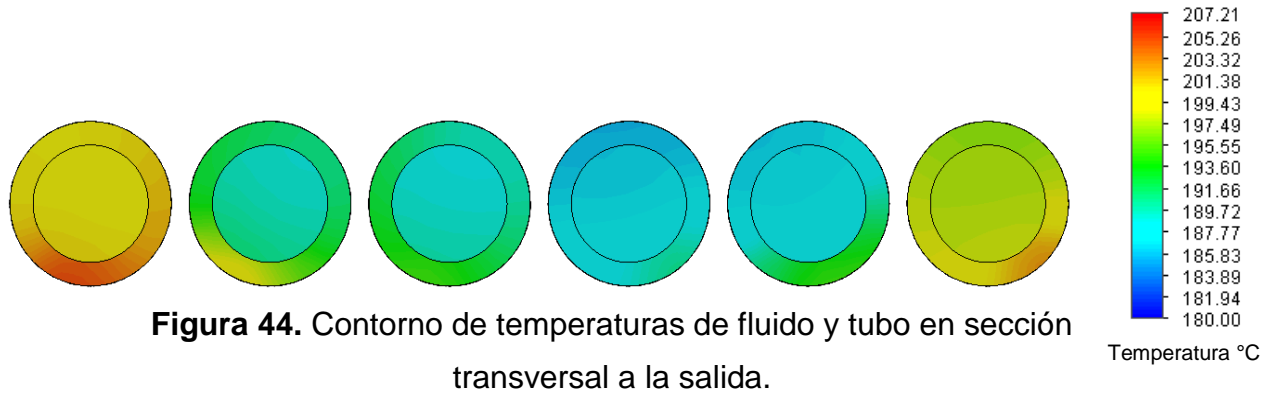


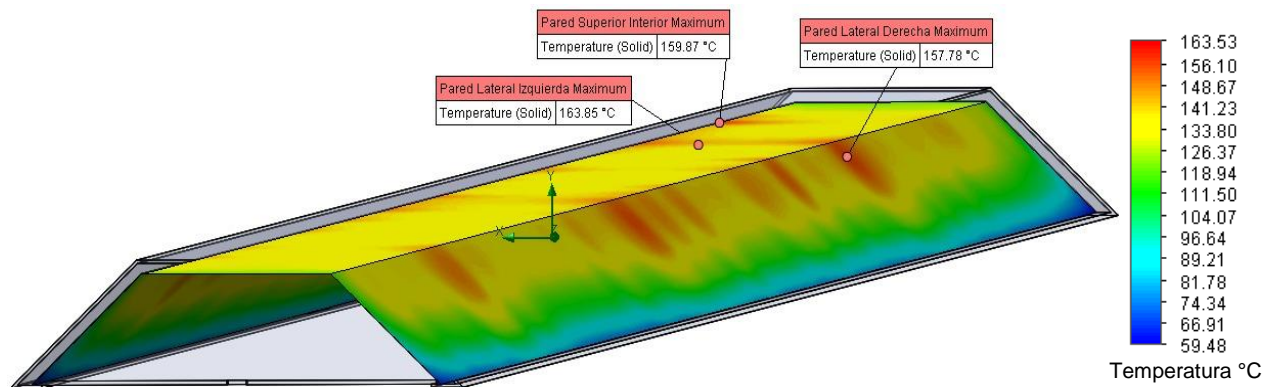
Figura 43. Contorno de temperaturas de la superficie de la parrilla de tubos expuestos al ambiente sin cavidad receptora.

En cuanto a la temperatura alcanzada por el agua circulante por el interior de los tubos, ésta alcanza una temperatura máxima de 200.85 °C a la salida, y una temperatura máxima de 199.87 °C en el plano medio. Ambos escenarios se presentan en las Figuras 44 y 45, respectivamente.



4.7 Análisis térmico de paredes laterales interiores de aluminio reflectante

En este escenario se realiza una simulación de la cavidad expuesta a radiación reflejada directamente hacia las caras laterales interiores. Esto es sin incidir en la parrilla de tubos, por lo que la temperatura de la cavidad se incrementaría respecto de los valores obtenidos en las simulaciones anteriores, presentadas en las secciones 4.4 y 4.5.. Los resultados obtenidos para este análisis se presentan en la Figura 46, donde se observa el contorno de temperaturas de las paredes interiores de la cavidad.



Como se ve en las temperaturas máximas por pared indicadas en la figura, la mayor de ellas se alcanza en la pared superior, aun siendo que la radiación incidente en la cavidad va 100 % en las paredes laterales. Esto se debe a la propiedades radiativas y mecánicas del material de la capa de aluminio, ya que como se indica anteriormente, presenta un coeficiente de reflectividad de 0.85, lo cual significa que refleja el 85% de la radiación incidente. Sumado a esto, está el coeficiente de

conductividad térmica de 200 W/mK. También al igual que en todas las simulaciones analizadas, las temperaturas mayores se concentran en la parte superior de la cavidad, correspondiente a la zona donde van los tubos. La temperatura mínima presente en ambas paredes laterales es de 59.48 °C.

4.7.1 Análisis térmico de paredes exteriores de aluminio

A continuación en la Figura 47 se presenta el contorno de temperaturas alcanzada por la capa de aluminio exterior de la cavidad, temperatura alcanzada particularmente por la conductividad entre los sólidos de ésta, pese a que la capa de lana mineral entremedia tiene un coeficiente de conductividad tan solo de 0.05 W/mK para reducir las pérdidas.

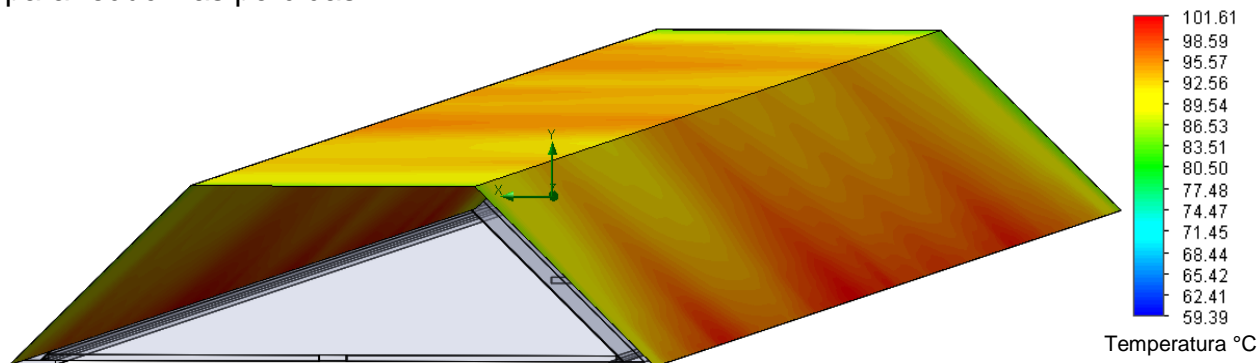


Figura 47. Contorno de temperaturas de superficie de aluminio exterior de la cavidad.

En esta ocasión se alcanza una temperatura mayor de 101.61 °C y una menor de 59.39 °C. Entonces, comparando las temperaturas máximas entre las superficies de aluminio interior y exterior, hay una diferencia de 61.92 °C. Esta disminución tan amplia en una pared tan delgada, es producto del aislante térmico situado entre medio, la capa de lana mineral.

Asumiendo que la temperatura máxima de cada aluminio es constante a lo largo de su sección transversal, se obtiene el calor transferido en la zona de máxima temperatura por conducción entre los sólidos con la ecuación (2):

$$q_{cond} = \frac{k_{lm}A(T_{in}-T_{ex})}{e_{lm}}, \quad (2)$$

donde k_{lm} es la conductividad térmica de la lana mineral, A es el área de la sección longitudinal de ésta, e_{lm} su espesor, T_{in} y T_{ex} las temperaturas de superficie del aluminio interior y exterior, respectivamente. Estos datos para mayor claridad se almacenan a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros para cálculo de conducción a través de la lana mineral.

Parámetros	Valor [unidad]
k_{lm}	0.05 W/mK
A	5.87 m ²
T_{in}	163.53 °C
T_{ex}	101.61 °C
e_{lm}	0.01 m



Reemplazando estos valores, se obtiene que el calor máximo transferido por conducción entre las capas de aluminio a través de la lana mineral es de 1817.35 W.

5. Análisis y Discusión de Resultados

Respecto a la hipótesis planteada en el comienzo de la investigación, cabe afirmar que ésta se cumple, ya que tras los resultados presentados en la sección 4, se ve claramente el efecto beneficioso que la cavidad receptora presenta en cuanto a las pérdidas térmicas al ambiente, reduciéndolas. Esto se analiza directamente comparando los resultados obtenidos para las simulaciones de la parrilla de tubos expuesta al ambiente, y para la parrilla de tubos al interior de la cavidad. En la Figura 48 se presenta una gráfica comparativa para todos los casos analizados anteriormente, respecto a la temperatura máxima por sección para el agua circulante en los tubos y la máxima de la superficie de los tubos.

Temperaturas máximas por sección y superficie analizadas

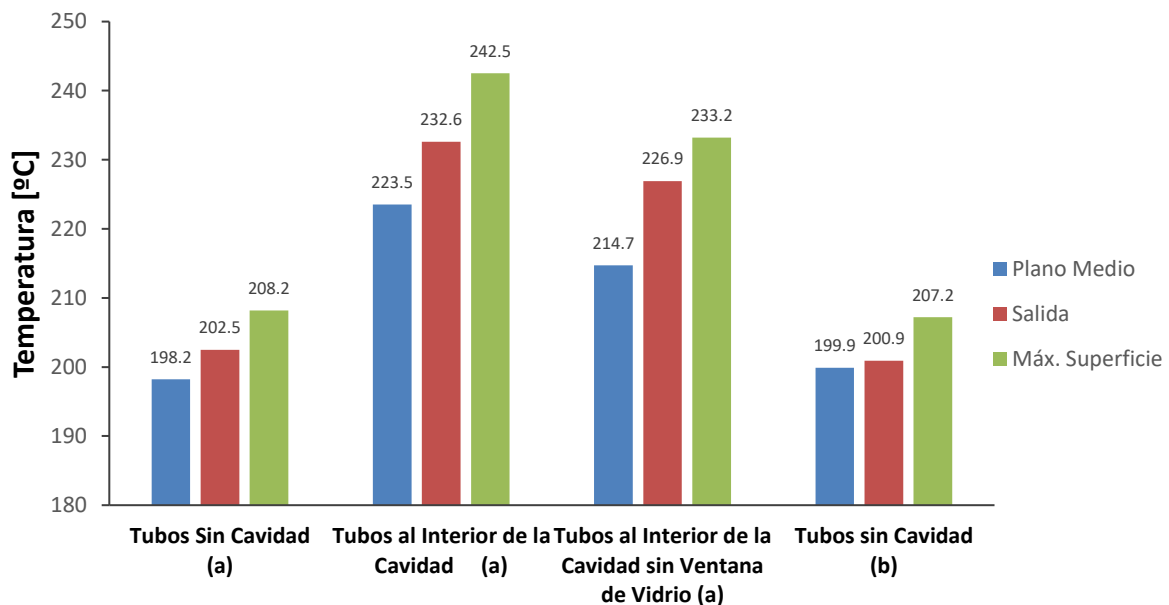


Figura 48. Temperaturas máximas del agua por secciones analizadas y de superficie de los tubos: (a) entrada del agua por tomas laterales, (b) entrada del agua por las tomas centrales.

Comparando los resultados obtenidos para las simulaciones de la parrilla de tubos expuesta al ambiente, en ambos casos (a) y (b), se deduce que para las condiciones ambientales evaluadas, con la posición solar considerada, la entrada de agua por las tomas laterales es más efectiva que por las tomas centrales. Se logra una mayor temperatura de fluido en la salida, pese a que se alcanza una mayor temperatura del fluido en el plano medio en la entrada por los tubos centrales. Esta particularidad se explica debido al perfil de radiación incidente sobre la parrilla de tubos, que hace que el fluido adquiera un mayor salto de temperatura en el tramo final de las tomas centrales, presentándose una diferencia de temperatura a la salida de los tubos de 1.62 °C.

En cuanto al efecto de la ventana de vidrio en la temperatura alcanzada por los tubos al interior de la cavidad, se logra una diferencia de 5.78 °C a la salida a favor de

la cavidad con ventana; por lo que tiene un efecto notorio en disminuir las pérdidas térmicas, lo que se ve reflejado en la gráfica comparativa de la Figura 49.

Comparativa de Coeficiente de Pérdidas Térmicas Globales y Calor cedido al Ambiente

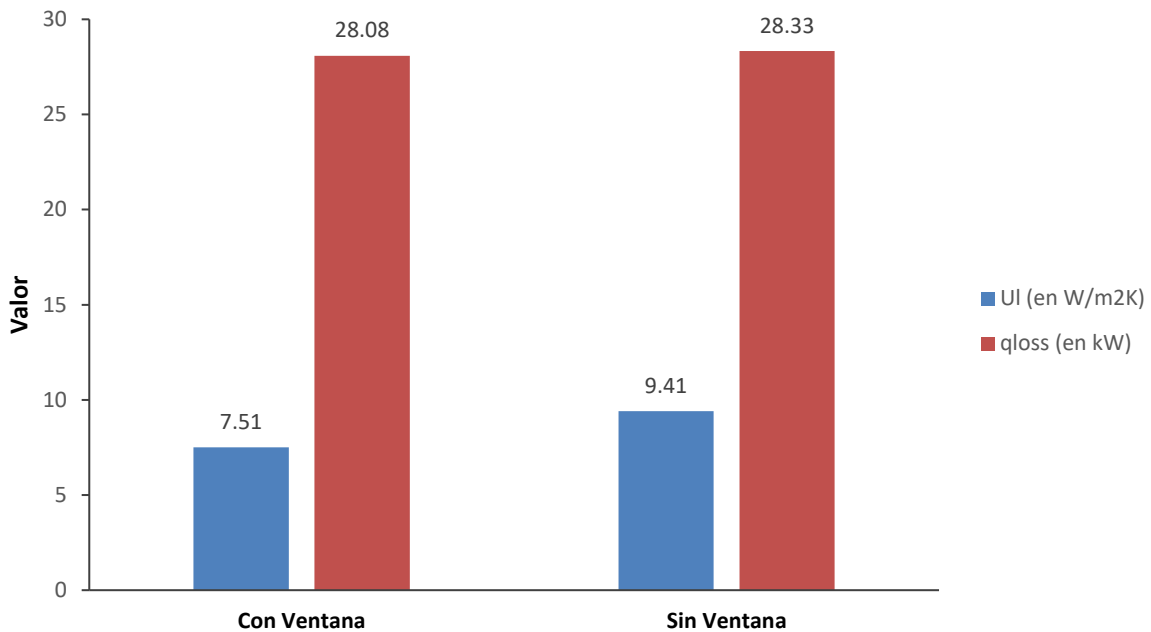


Figura 49. Coeficiente de pérdidas térmicas de la cavidad receptora frente a la temperatura ambiente.

De la gráfica se observa una notoria diferencia en el comportamiento térmico de la cavidad frente a la presencia de la ventana, presentando una diferencia de 1.9 W/m²K, para la condición de temperatura ambiente analizada. También, para estos análisis, comparando el calor cedido al ambiente en ambas condiciones, se tiene que la cavidad con ventana tiene aproximadamente 250 W menos de pérdidas.

También se aprecia la diferencia en las temperaturas del aire al interior de la cavidad, comparando las Figuras 24 y 25 (con ventana) a las Figuras 36 y 37 (sin ventana), se tiene que la temperatura del aire en la sección correspondiente al plano medio es más elevada en la presencia de la ventana, la cual disminuye las pérdidas por convección hacia el ambiente.

6. Conclusiones y Perspectivas de la Investigación

Se ha analizado el comportamiento térmico del conjunto receptor formado por una parrilla de tubos y una cavidad diseñada para un captador solar lineal Fresnel (CLF). Para realizar el estudio se ha utilizado la herramienta software SolidWorks, para análisis mecánico y térmico del sistema.

Primero, hay que destacar que es crucial para el correcto funcionamiento del CLF, que en las simulaciones se obtenga una temperatura del fluido de trabajo por encima de los 200 °C, ya que es la temperatura a la cual se desea operar el fluido, y en todos los casos analizados no se ha considerado el efecto que tendría el viento sobre los tubos, situación que podría incrementar las pérdidas térmicas debido a la convección forzada.

También es importante destacar el hecho de que los coeficientes de pérdidas térmicas globales para la cavidad, fueron obtenidos mediante el calor cedido al ambiente por la cavidad calculado por SolidWorks tras las simulaciones, aproximando el resultado del coeficiente mediante la ecuación definida en la sección 4 para éste. Debido a la extensión del proyecto, no se entra tan en detalle en realizar un análisis de los flujos térmicos por separado (conducción, convección y radiación) entre los fluidos y superficies correspondientes, lo cual al momento de buscar la mayor precisión posible sería importante realizar.

De los resultados obtenidos, como se presenta anteriormente en la sección 5, se pueden dar como cumplidos los objetivos del proyecto, dado que se ha cumplido la hipótesis planteada, y se han realizado las respectivas simulaciones para los casos requeridos. Queda claro la importancia de aislar debidamente la cavidad, y el efecto de la ventana de vidrio si se quiere minimizar las pérdidas térmicas al ambiente, con el fin de lograr la temperatura deseada del fluido de trabajo.

En cuanto a las perspectivas del trabajo, sería interesante realizar un análisis a las dimensiones de la cavidad, para poder realizar una comparativa entre los coeficientes de pérdidas térmicas para diferentes dimensiones de ésta, y llegar al tamaño más adecuado. En esta ocasión, las dimensiones de la cavidad se han establecido de manera que los rayos incidentes en las simulaciones del software Tonatiuh, fueran reflejados lo máximo posible en la parrilla de tubos para la posición de sol analizada, evitando que se pierdan fuera de la cavidad. Sumado a esto, se podría añadir una comparativa entre los flujos térmicos salientes a través de las paredes laterales y superior de la cavidad, y los salientes a través de la ventana, para ver como optimizar el diseño. Todo esto es muy importante a tener en cuenta a la hora del diseño de un equipo, para encontrar la alternativa más eficiente y adecuada.

También es necesario realizar simulaciones con distintas posiciones solares, con el fin de ver el comportamiento del receptor frente a distintos perfiles de radiación, y frente a diferentes condiciones de temperatura ambiente, con el fin de obtener una variación del coeficiente de pérdidas globales de la cavidad más realista frente a cambios en la temperatura ambiente.

Sumado a esto, se podría haber trabajado con flujos de radiación simétricos respecto a la parrilla de tubos, obteniendo perfiles de temperaturas simétricos en los resultados, para lo cual sería necesario realizar un mayor número de simulaciones en el software de trazado de rayos Tonatiuh y trabajar con un mayor número de rayos.



Sin embargo, los resultados que se obtienen son válidos, y con una diferencia respecto al eje de simetría de la cavidad muy pequeña, no interfiriendo en el objetivo de este trabajo fin de master.

7. Bibliografía básica

- [1] IEA, Key world energy statistics 2016, Statistics 80 (2016), <https://doi.org/10.1787/9789264039537-en>.
- [2] Sven Werner, Norela Constantinescu, N. ECOHEATCOOL, the European Heat Market, 2006.
- [3] Jing Dai, Hongfei Zheng, Yuehong Su, Zehui Chang, Energy Procedia the Motional Design and Analysis for Linear Fresnel Reflector System Combined Three-movement, vol. 14, 2012, pp. 971e976, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.1041>
- [4] Yanqing Zhu, Jifu Shi, Yujian Li, Leilei Wang, Qizhang Huang, Gang Xu, Design and thermal performances of a scalable linear Fresnel reflector solar system, Energy Convers. Manag. 146 (2017) 174e181, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.031>.
- [5] Zhu Yanqing, Shi Jifu, Li Yujian, Wang Leilei, Huang Qizhang, Xu Gang, Design and experimental investigation of a stretched parabolic linear Fresnel reflector collecting system, Energy Convers. Manag. 126 (2016) 89e98, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.073>.
- [6] J.D. Nixon, P.A. Davies, Construction and experimental study of an elevation linear Fresnel reflector, J. Sol. Energy Eng. 138 (3) (2016) 031001, <https://doi.org/10.1115/1.4032682>.
- [7] D. Pulido – Iparraguirre, L. Valenzuela, J.J. Serrano – Aguilera, A. Fernández – García, Optimized design of a Linear Fresnel reflector for solar process heat applications, Renewable Energy 131 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.018>.
- [8] Yanhua Lai, Tao Wu, Shuping Che, Zhen Dong, Mingxin Lyu, Thermal Performance Prediction of a Trapezoidal Cavity Absorber for a Linear Fresnel Reflector, School of Energy and Power Engineering, Shandong University (2013). <http://dx.doi.org/10.1155/2013/615742>.
- [9] Dassault Systems, SolidWorks 2019, SolidWorks Flow Simulation, <https://www.solidworks.com/es/product/solidworks-flow-simulation>.

El desarrollo de tecnología solar térmica concentrada juega un papel clave en la implementación de la energía solar como fuente de energía primaria tanto a nivel de generación de calor de proceso, como generación de electricidad. Respecto a la generación de calor de proceso, es que se trabaja en este trabajo fin de master con un Captador Solar Fresnel Lineal (CLF) diseñado en la Plataforma Solar de Almería, con una temperatura deseada de 200 °C para el fluido de trabajo a la salida. Se realizan simulaciones del comportamiento térmico del captador mediante el software SolidWorks con la aplicación de la herramienta Flow Simulation para un análisis de dinámica de fluidos computacionales (CFD). Todos los análisis se realizan en condiciones de estado estacionario, considerando transferencia de calor al ambiente sólo por radiación y convección natural, y transferencia de calor por conducción entre los sólidos que componen la cavidad receptora del captador.

Se evalúa la efectividad de la cavidad receptora frente a las pérdidas térmicas que se generan para condiciones de aire ambiente a 25 °C, para lo cual se hacen pruebas de la parrilla de tubos sin cavidad, con la cavidad completa, y con la cavidad sin la ventana de vidrio. De todos los análisis, los resultados con menores pérdidas térmicas y menor coeficiente de pérdidas térmicas globales (HTC) corresponde al de la cavidad completa, alcanzando una temperatura de 232.63 °C del fluido de trabajo (agua) a la salida y un HTC de 7.51 W/m²K, frente a 226.85 °C y 9.41 W/m²K para la cavidad sin ventana.

The development of concentrated solar thermal technology plays a key role in the implementation of solar energy as a primary source of energy. Both at the level of heat generation and generation of electricity. Regarding process heat generation, a 10.4 m long Linear Fresnel Solar Collector (CLF) designed at “Plataforma Solar de Almería”, with a desired temperature of 200 °C for the working fluid is analyzed. Simulations of the thermal behavior of the collector are made using SolidWorks software with the application of the Flow Simulation tool for a computational fluid dynamics (CFD) analysis. All analyzes are performed under steady – state conditions, considering heat transfer to the environment only by radiation and natural convection, and heat transfer by conduction between the solids from the cavity receiver.

The effectiveness of the cavity receiver is evaluated within the thermal losses that are generated for air conditions at 25 °C, for which simulations are made on the collector without the cavity, with the cavity and with the cavity without its glass window. From all analyzes, the results with the lower thermal losses and lower heat transfer coefficient (HTC) correspond to the complete cavity, reaching temperatures of 232.63 °C at the tubes exit for the working fluid (water) and a HTC of 7.51 W/m²K, against 226.85 °C and 9.41 W/m²K for the cavity without the glass window cover.

