



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE UN RECEPTOR TRAPEZOIDAL DE UN COLECTOR SOLAR LINEAL FRESNEL MEDIANTE OPENFOAM

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

LOAYZA VILLA RICARDO XAVIER
ricardo.loayza@epn.edu.ec

DIRECTOR:
DR. ORDÓÑEZ MALLA FREDDY
freddy.ordonez@epn.edu.ec

CODIRECTOR:
DR. ROJAS MOLINA ROBERTO CARLOS
roberto.rojas@epn.edu.ec

Quito, enero 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Ricardo Xavier Loayza Villa** bajo nuestra supervisión.

Dr. Freddy Ordóñez Malla
DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Roberto Carlos Rojas Molina
CODIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **RICARDO XAVIER LOAYZA VILLA**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Ricardo Xavier Loayza Villa

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos, mi guía y mi fortaleza a lo largo de toda mi vida.
A mis sobrinos, que son la fuente inagotable de luz y alegría de nuestra familia.

AGRADECIMIENTO

A todos quienes han sido, fueron y serán parte de esta travesía:

Sobre todo a mi familia, a quienes debo cada día de mi vida.

A los “Parceritos” con quienes compartimos innumerables experiencias, alegrías, y aprendizaje en todos estos años. Definitivamente, no se hubiera podido sin ustedes.

A mi directiva y todos mis amigos de ASME con quienes llevamos adelante tantos proyectos y cuya amistad ha sido el mejor premio que pude obtener.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	i
DECLARACIÓN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
GLOSARIO DE TÉRMINOS	xi
INTRODUCCIÓN	1
Pregunta de Investigación	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
Alcance.....	2
1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Situación energética mundial.....	4
1.2. El recurso solar en Ecuador.....	6
1.3. Aprovechamiento del recurso solar mediante colectores lineales Fresnel.	8
2. METODOLOGÍA	13
2.1. Descripción del receptor trapezoidal del colector solar Fresnel.....	13
2.2. Explicación de los mecanismos de transferencia de calor dentro del receptor trapezoidal.....	15
2.2.1. Radiación entre las superficies internas.....	17
2.2.2. Conducción a través de las paredes.....	17
2.2.3. Transferencia de calor por convección forzada y convección natural.....	18
2.3. Simulación mediante OpenFOAM.....	19
2.3.1. Ecuaciones de fluido.....	20
2.3.2. Ecuaciones para sólido.....	22
2.3.3. Acoplamiento entre fluido y sólido.....	22
2.3.4. Modelo de radiación <i>viewFactor</i>	22
2.4. Configuración para la simulación en OpenFOAM.....	23
2.4.1. Descripción del caso.....	24
2.4.2. Estructura del caso.....	24
2.4.3. Generación de la geometría: BlockMeshDict y topoSetDict.....	26
2.4.5. Propiedades de los materiales.....	30

2.4.6. Control, Solution & Schemes Dictionaries.....	35
2.4.7. Simulación del caso.....	39
2.4.8. Post Procesamiento.....	40
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
3.1. Estudio del mallado.....	41
3.1.1. Calidad del mallado.....	41
3.1.2. Convergencia y tiempo de simulación.....	42
3.2. Distribución de temperaturas en el receptor.....	45
3.3. Comportamiento del aire dentro de la cavidad del receptor.....	47
3.4. Tiempo de cálculo para la simulación.....	49
4. CONCLUSIONES.....	50
Referencias Bibliográficas.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Consumo de energía por fuente, en el período 1993-2018.	5
Figura 1.2 Mapa de insolación solar directa anual en Ecuador.	7
Figura 1.3. Capacidad instalada en sistemas de energías renovables en Ecuador.	8
Figura 1.4. Esquema de un colector lineal Fresnel.	9
Figura 1.5. Tipos de sistemas de concentración solar.....	9
Figura 1.6. Elementos de un LFC	11
Figura 2.1. a) Geometría del receptor trapezoidal, b) Elementos del receptor trapezoidal.	14
Figura 2.2. Mecanismos de transferencia de calor en el receptor.	17
Figura 2.3. Algoritmo de solución de las ecuaciones en las regiones de fluido.	20
Figura 2.4. Esctructura de trabajo en OpenFOAM	24
Figura 2.5. Esquema del caso de estudio.	24
Figura 2.8. Estructura del caso de estudio	25
Figura 2.9 Creación de la geometría con blockMesh.	26
Figura 2.10. Creación de las distintas regiones con topoSet.....	27
Figura 2.11. Propiedades termo físicas de la región de vidrio.....	31
Figura 2.12. Propiedades de radiación de la región de vidrio.....	31
Figura 2.13. Propiedades termo físicas de la región de material aislante.....	32
Figura 2.14 Propiedades de radiación de la región de material aislante.	32
Figura 2.15. Propiedades termo físicas de la región aire.	33
Figura 2.16. Propiedades de radiación de la región aire.	33
Figura 2.17. Propiedades de turbulencia de la región aire.	34
Figura 2.18. Comandos en la librería viewFactorDict de la región aire.....	34
Figura 2.19. Librería <i>g</i>	35
Figura 2.20. Especificación de regiones en <i>regionProperties</i>	35
Figura 2.21. fvSchemes para la región aire.....	36
Figura 2.22. fvSolution para la región aire.....	37
Figura 2.23. fvSchemes para las regiones sólidas.	38
Figura 2.24. fvSolution para las regiones sólidas.	38
Figura 2.25. Comandos del archivo Allclean.	39
Figura 2.26. Comandos del archivo Allrun.	40
Figura 3.1. Tiempo de simulación vs. N° de elementos del mallado.....	43
Figura 3.2. N° de iteraciones en la solución vs. N° de elementos del mallado.	43
Figura 3.3. Temperatura del vidrio vs. N° de iteraciones para cada caso de mallado.	44
Figura 3.4. Mallado del caso	44
Figura 3.5. Residuos en la región aire para la malla de 6060 elementos.	45
Figura 3.6. Contornos isotérmicos en el receptor Fresnel obtenidos mediante OpenFOAM.	46
Figura 3.7. Contornos isotérmicos en un receptor Fresnel presentado por Soroush Dabiri en Ansys Fluent.....	46
Figura 3.8. Líneas de flujo del aire dentro de la cavidad receptora.	48
Figura 3.9. Distribución de velocidades del aire dentro de la cavidad receptora.	48
Figura 3.10. Líneas de flujo del aire en el receptor presentado por Jaramillo D.	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Barreras clave en el desarrollo de tecnologías de energía renovable.....	5
Tabla 1.2. Sistemas de concentración solar.....	8
Tabla 2.1. Geometría del Receptor Fresnel.	13
Tabla 2.2 Propiedades de los materiales del receptor Fresnel.....	14
Tabla 2.5. Grupos de caras de las superficies del receptor Fresnel.....	28
Tabla 2.6. Condiciones de borde para la región aire.....	28
Tabla 2.7. Condiciones de borde para la región vidrio.....	29
Tabla 2.8. Condiciones de borde para la región aislamiento izquierdo.....	29
Tabla 2.9. Condiciones de borde para la región aislamiento derecho.....	29
Tabla 3.1. Parámetros de calidad de malla.....	42
Tabla 3.2. Temperaturas [K] en las superficies del receptor.....	47

RESUMEN

Los colectores lineales Fresnel son una alternativa viable para el aprovechamiento del recurso solar en países en vías de desarrollo como Ecuador. Su estudio y optimización representan una oportunidad para reducir la huella de carbono de procesos industriales que requieran una fuente de calor de media temperatura comúnmente satisfecha por calentadores de combustibles fósiles, como diésel o búnker, o en base a electricidad. Por ello, en el presente trabajo se expone el modelamiento térmico y simulación de un receptor de geometría trapezoidal de un colector lineal Fresnel. Las ecuaciones fundamentales que definen los fenómenos de transferencia de calor existentes en el receptor se resuelven numéricamente para determinar los procesos de conducción, convección y radiación en el receptor.

El caso de estudio es simulado mediante OpenFOAM, un software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de código abierto cuya principal ventaja es ser de carácter libre frente a los costosos softwares comerciales. Los resultados obtenidos se comparan con aquellos de autores con similares estudios para determinar la confiabilidad del modelo y las simulaciones. Los datos de entrada y la geometría del receptor objeto de este estudio se toman en base a estudios ópticos de autores previos.

Además, debido a la falta de documentación sobre casos de transferencia de calor conjugada en OpenFOAM, se presenta una guía detallada sobre la configuración del caso que podrá ser utilizada para la simulación de nuevos casos de estudio futuros.

Palabras clave: Modelamiento térmico, OpenFOAM, colector lineal Fresnel, transferencia de calor conjugada.

ABSTRACT

Linear Fresnel Collectors (LFC) are a viable alternative for the exploitation of solar energy in developing countries such as Ecuador. The study and optimization of LFC's represent an opportunity for reducing the carbon print caused by different industrial processes in which a source of medium temperature heat is needed, and that is usually satisfied by fossil fuels or electric heaters. Therefore, this work introduces the thermal modeling and simulation of a trapezoidal linear Fresnel receiver, by means of the fundamental equations governing the heat transfer phenomena present in the receiver. The simplified thermal model is validated with simulations carried out with OpenFOAM, a Computer Fluid Dynamics (CFD) software with the advantage of being free source versus the usually expensive commonly used CFD software. The results are compared with similar studies of different previous researchers. The input data for incident solar energy is taken from optical studies of previous authors.

In addition, due to lack of documentation on conjugate heat transfer cases in OpenFOAM, a detailed guide for setting the simulation case is presented, which will be useful for future studies on Linear Fresnel Collectors using OpenFOAM.

Keywords: Conjugate heat transfer, Linear Fresnel Collector, OpenFOAM, Thermal modeling.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Abreviaturas

HTF	Fluido de transferencia de calor (Heat transfer fluid)
LFC	Colector Lineal Fresnel (Linear Fresnel Collector)
CFD	Dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics)
DNI	Irradiación solar directa
W_g	Ancho de la cubierta de vidrio [mm]
e_g	Espesor de la cubierta de vidrio [mm]
H_{rec}	Altura del receptor [mm]
W_{abs}	Ancho de la placa absorbidora [mm]
θ	Ángulo de los reflectores secundarios [°]
e_{ins}	Espesor del aislante [mm]
L	Longitud del receptor [m]
N_T	Número de tuberías
D	Diámetro de las tuberías [mm]
M	Peso molecular [g/mol]
C_p	Calor específico [J/KgK]
C_f	Factor de concentración
n_{th}	Eficiencia térmica
Pr	Número de Prandtl
A	Área [m ²]
F	Factor de forma
T	Temperatura [K]
T_{amb}	Temperatura del aire ambiente [K]
T_f	Temperatura del HTF [K]
Q	Energía [W]
\dot{m}	Flujo másico del HTF [kg/s]
k	Coefficiente de transferencia de calor por conducción [W/mK]
h	Coefficiente de transferencia de calor por convección [W/m ² K]
q_{cond}	Flujo de calor por conducción [W/m ²]
q_{rad}	Flujo de calor por radiación [W/m ²]
q_{conv}	Flujo de calor por convección [W/m ²]
q_{in}	Flujo de calor incidente [W/m ²]
Nu	Número de Nusselt
Re	Número de Reynolds
Ra	Número de Rayleigh

Letras griegas

ε	Emisividad
α	Absortividad

τ	Transmitancia
k	Conductividad térmica
ρ	Densidad [Kg/m ³]
μ	Viscosidad Dinámica [Kg/ms]
θ	Ángulo de los reflectores secundarios
σ	Constante de Stefan Boltzmann [W/(m ² K ⁴)]

MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE UN RECEPTOR TRAPEZOIDAL DE UN COLECTOR SOLAR LINEAL FRESNEL MEDIANTE OPENFOAM

INTRODUCCIÓN

La energía es un recurso esencial para el bienestar humano y el desarrollo económico, ya que, hace posible la operación de establecimientos médicos y educativos, la innovación, la creación de industrias y empleos. Sin embargo, los sistemas de producción y consumo de energía tienen impactos ambientales significativos, debido a las emisiones de dióxido de carbono CO_2 y otros gases de invernadero provenientes del uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) [1].

El recurso solar se considera como una importante fuente de energía que, al ser convertida en energía térmica mediante tecnologías de concentración solar, puede ser utilizada en generación eléctrica o generación de calor de proceso para diversos campos como: calefacción, refrigeración, suministro de calor de proceso, tratamiento de agua, entre otros [2]. Lo que ofrece la posibilidad de disminuir el uso de combustibles fósiles que actualmente son la principal fuente de emisiones contaminantes [1].

Existen cuatro tecnologías de concentración solar térmica: torres solares, colectores de plato parabólico, colectores cilindro parabólico y colectores lineales Fresnel [3]. Estos últimos, en comparación con los colectores parabólicos, tienen una eficiencia 10% menor, pero con una disminución del 45% en su costo de implementación lo cual resulta en un costo nivelado de la energía muy similar para ambos sistemas [4], además, la fabricación de los colectores lineales involucra menores exigencias tecnológicas que los colectores parabólicos, por lo que se convierte en una alternativa atractiva para ser implementada en países como Ecuador.

Los colectores lineales Fresnel utilizan un arreglo de reflectores planos que siguen la luz solar del día, y la concentran en un receptor fijo de forma trapezoidal. Sobre este receptor existe un arreglo de tubos por donde circula un fluido de trabajo que se calienta absorbiendo energía solar, por esta razón, este se denomina fluido de transferencia de calor (HTF) [5]. El fluido caliente puede ser utilizado para generar electricidad mediante un ciclo de potencia termodinámico o puede ser utilizado para generar calor de proceso.

Sin embargo, el sistema está sometido a constantes pérdidas de calor que afectan su eficiencia, debido a fenómenos de radiación, convección y conducción. Para aprovechar la mayor cantidad de energía en el colector lineal de Fresnel es necesario disminuir

dichas pérdidas de calor. La interacción entre los tres mecanismos de transferencia de calor hace difícil llevar a cabo un modelo puramente analítico del sistema para su estudio [6]. Por ello, el uso de herramientas como la dinámica de fluidos computacional (CFD) se vuelve necesario para estudiar de manera precisa la transferencia de calor en el receptor. Existe diversos softwares comerciales empleados para este tipo de estudios, como ANSYS, COMSOL y Autodesk CFD. Desafortunadamente, sus licencias tienen un alto costo económico. Por ello en el presente trabajo se propone emplear OpenFOAM, un software CFD de código abierto que permite al usuario no solo emplear una serie de librerías predefinidas sino también modificarlas y crear nuevas aplicaciones [7]. Esto permite la implementación de nuevos métodos de solución para un problema definido y los resultados se pueden utilizar para el posterior desarrollo de modelos más exactos.

Pregunta de Investigación

¿Es posible estudiar con precisión aceptable el comportamiento térmico de un receptor de geometría trapezoidal de un colector lineal Fresnel mediante el uso de OpenFOAM?

Objetivo general

Modelar y simular un receptor trapezoidal de un colector solar lineal de Fresnel mediante OpenFOAM.

Objetivos específicos

- Establecer las ecuaciones y condiciones de borde que determinan el comportamiento térmico de un receptor trapezoidal de un concentrador solar Fresnel.
- Analizar la eficiencia térmica del receptor bajo las condiciones establecidas.
- Simular el comportamiento del receptor trapezoidal Fresnel mediante OpenFOAM.
- Estudiar la sensibilidad de los diferentes parámetros en el comportamiento térmico del receptor trapezoidal Fresnel.

Alcance

En este proyecto se presenta un caso de simulación del comportamiento térmico de un receptor trapezoidal de un colector lineal Fresnel de media temperatura mediante

transferencia de calor conjugada en el software OpenFOAM, lo cual permite analizar los diferentes mecanismos de transferencia de calor que acontecen en el receptor y estudiar la influencia de los datos de entrada en el comportamiento térmico del mismo. Los resultados de las simulaciones se comparan con un modelo simplificado presentado en la bibliografía consultada. Dicho modelo hace posible conocer las temperaturas de las distintas superficies y los flujos de calor por conducción, convección y radiación en cada una de ellas, pudiendo así determinar la eficiencia térmica del receptor. Los diferentes parámetros y condiciones de borde del modelo se incluyen en un caso del software OpenFOAM para poder comparar los resultados del modelo simplificado con los resultados que ofrece el software y los resultados de otros autores que han llevado a cabo estudios similares. Además se presenta una guía detallada para la creación del caso en OpenFOAM para la simulación del comportamiento térmico del receptor. Dicha guía podrá ser de utilidad para futuros estudios en torno al comportamiento del receptor lineal Fresnel.

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se hace una reseña de la producción y uso de energía a nivel mundial y en el Ecuador. Se discute también el recurso solar disponible en Ecuador que puede aprovecharse haciendo uso de tecnologías de concentración solar, poniendo especial atención en los colectores lineales Fresnel que son objeto de este estudio. Además, se presenta algunos estudios realizados por varios autores en cuanto al comportamiento térmico de los colectores lineales Fresnel y, para finalizar, se introduce algunos conceptos en cuanto a la Dinámica de Fluidos Computacional, que serán útiles al momento de simular el receptor en OpenFOAM.

1.1. Situación energética mundial.

La cantidad de energía que requiere el mundo consume está en constante incremento, debido al desarrollo e industrialización de los países, crecimiento de la población y su acceso a la energía. La energía no es un producto final por sí mismo, sino que es un ingrediente fundamental en toda actividad económica, y la satisfacción de todas las necesidades humanas [8]. Sin embargo, los sistemas de producción y consumo de energía tienen también un impacto ambiental considerable, especialmente porque aquellos sistemas que funcionan mediante combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) son los sistemas predominantes, mientras que las energías renovables representan menos del 5% de la producción mundial de energía [1]. La sociedad enfrenta nuevos y desafiantes retos en la transición a sistemas de energía renovable y de bajas emisiones de carbono, requiriendo el entendimiento y juicio objetivo de la información disponible [9], de forma que sea posible dar paso al desarrollo de nuevas leyes y objetivos comunes que involucren compromisos de cooperación internacional para el desarrollo sostenible [8].

En el año 2018 el consumo de energía en el mundo incrementó en un 2.9% con respecto al año 2017, con un total de 13864.9 millones de toneladas de petróleo equivalente (Mtoe). De este consumo 33.6%, 23.9% y 24.3% corresponden a petróleo, gas natural y carbón, respectivamente; mientras las energías renovables ocupan un 4.1% [9]. En la Figura 1.1 se aprecia el aumento de la cantidad de energía consumida mundialmente proveniente de diferentes fuentes en millones de toneladas de petróleo equivalente desde el año 1993 hasta el 2018. El aumento en el consumo de energía proveniente de combustibles fósiles produjo también un incremento del 2% en las emisiones de CO₂ respecto al 2017. Estas emisiones, junto con los gases de invernadero, han sido identificadas como las principales causas del cambio climático [1].

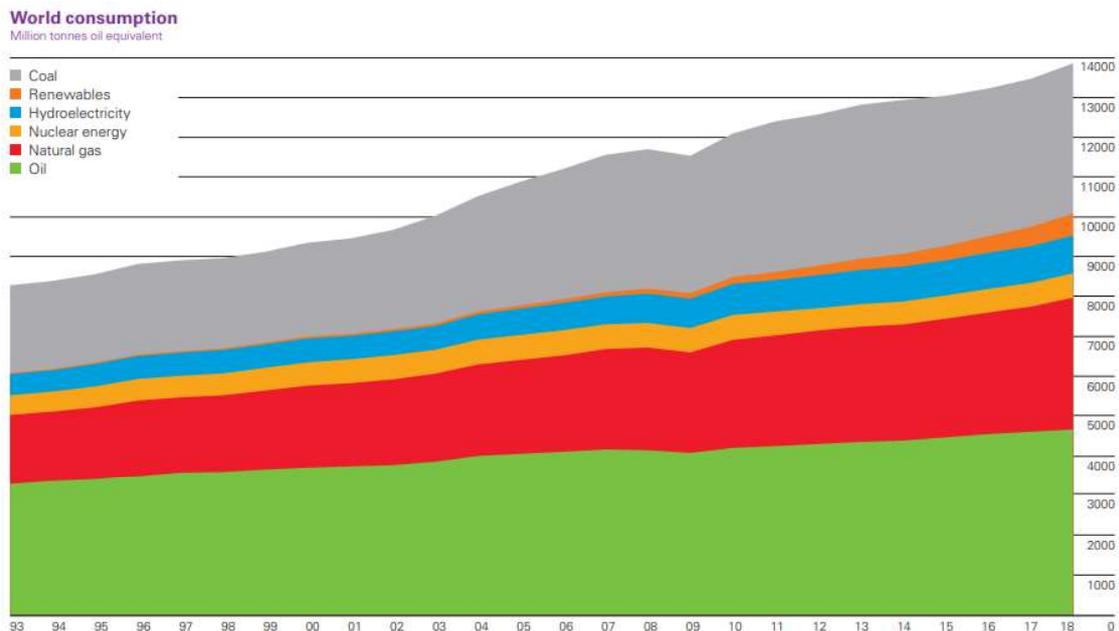


Figura 1.1. Consumo de energía por fuente, en el período 1993-2018.
(Fuente [9])

Debido al eminente riesgo asociado al cambio climático, varias iniciativas mundiales han surgido para confrontar este problema. En este sentido, en el año 2017 se registró 279.8 mil millones de dólares invertidos en proyectos de energía renovable alrededor del mundo, siendo la eólica y solar las que recibieron más del 95% de estas inversiones. Producto de esto se añadió aproximadamente una capacidad de 98 GW de energía solar (en su mayoría fotovoltaica) y cerca de 52 GW en energía eólica. Además, estas inversiones han provocado un desarrollo en los últimos años en las industrias y tecnologías en torno a los sistemas de producción de energía solar y eólica, reduciendo sus costos a niveles competitivos con la energía proveniente de combustibles fósiles [10]. Sin embargo, la Asociación Internacional de Energías Renovables (IRENA) explica que existen aún varias barreras para el desarrollo de tecnologías de energías renovables, estas barreras se resumen en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Barreras clave en el desarrollo de tecnologías de energía renovable.

Sector	Barreras de costos	Barreras en regulaciones	Barreras en el mercado	Barreras técnicas
Energía Eléctrica	Costos iniciales relativamente altos. Subsidios en combustibles fósiles.	Marcos de referencia legales inexistentes o no suficientes.	Falta de acceso a crédito. Mayores costos por falta de experiencia. Incertidumbre sobre el desempeño de equipos. Falta de información técnica y comercial.	Integración de porciones de energía renovable en redes eléctricas existentes.

Calor	Altos costos iniciales en comparación a sistemas convencionales. Subsidios a combustibles fósiles.	Arduos procesos de permisos.	Falta de incentivos financieros. Falta de habilidades técnicas. Desconocimiento de las tecnologías disponibles.	Integración de sistemas renovables en infraestructura existente.
Biocombustibles (Para transporte)	Costos más altos que los combustibles convencionales.	Falta de políticas para inclusión de nueva infraestructura	Falta de estaciones de carga.	Falta de madurez de la tecnología.
Vehículos Eléctricos	Alto costo de su uso en vehículos personales.	Falta de políticas para inclusión de nueva infraestructura	Falta de estaciones de carga.	Autonomía relativamente baja de los vehículos.

(Fuente: [8])

La Asamblea General de las Naciones Unidas en septiembre del 2015 adoptó 17 objetivos para el desarrollo sostenible, entre los cuales se incluye el aseguramiento del acceso a energía moderna, limpia, sustentable, confiable y asequible para todos. Este objetivo (denominado #7) está íntimamente relacionado con los otros 16, que en conjunto proveen un importante marco de referencia de cooperación internacional para cumplir una serie de metas en cuanto a la reducción de la pobreza, el aseguramiento de la prosperidad y la protección del planeta y sus habitantes [8].

1.2. El recurso solar en Ecuador.

En el Ecuador, la explotación de petróleo marcó un antes y un después en su economía e industria, y por lo tanto comenzó una creciente demanda de energía para satisfacer las actividades del país. Esta energía proviene fundamentalmente de tres fuentes que son: petróleo, hidroelectricidad y biomasa [11]. La energía solar y eólica, sin embargo, han crecido en los últimos años debido a las políticas públicas. El gobierno nacional a partir del año 2011 dentro del “plan del buen vivir” planteó la necesidad de diversificar la matriz energética nacional e incluir la utilización de sistemas que empleen recursos renovables como la energía eólica y solar [12].

Debido a su ubicación geográfica, Ecuador permite un aprovechamiento más confiable del recurso solar, ya que, al no contar con estaciones climáticas, se reducen los problemas por sobreproducción o subproducción de la energía [11]. En la Figura 1.2 se muestra un mapa de la irradiación solar directa (DNI) incidente en el territorio ecuatoriano

anualmente, donde se evidencia que existe los mayores índices de insolación directa en las provincias de Imbabura, Pichincha, Loja y las Islas Galápagos. Las provincias de Pichincha e Imbabura sugieren atención especial, ya que en estas provincias se sitúa gran parte de la población ecuatoriana y por ende gran parte de su industria, que podría beneficiarse del potencial solar disponible en estas zonas ($4,5 - 5,7 \text{ kWh/m}^2\text{día}$). También se evidencia que la provincia de Loja posee el mayor potencial de recurso solar en el Ecuador continental, mientras las Islas Galápagos por su ubicación excepcional en el Océano Pacífico alcanza valores anuales hasta $6,3 \text{ kWh/m}^2\text{día}$ [13].

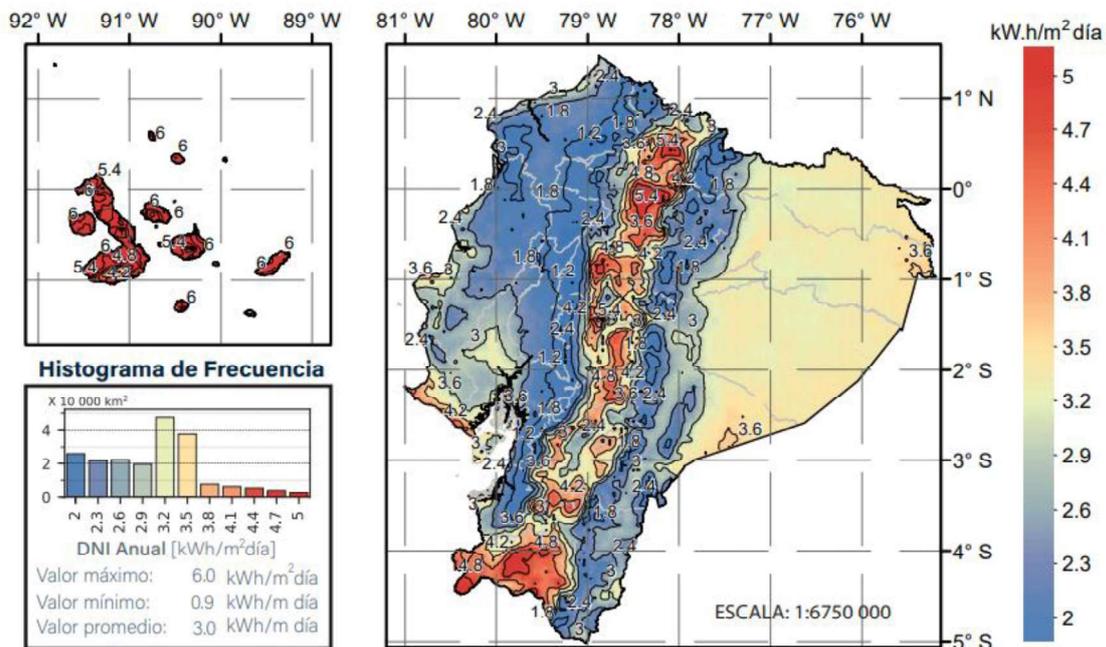


Figura 1.2 Mapa de insolación solar directa anual en Ecuador.
(Fuente: [13])

Según datos de IRENA del año 2018 [14], Ecuador cuenta con una capacidad instalada de 5164 MW total para generación eléctrica a partir de tecnologías renovables, de los cuales el 95% es hidroelectricidad, mientras el 5% restante es compartido entre energía eólica, solar fotovoltaica, biomasa y biogás, tal como se muestra en la Figura 1.3. La energía solar fotovoltaica aporta con 26 MW de capacidad instalada. Siendo el proyecto “Sistema híbrido Isla Isabela”, uno de los proyectos de energía renovable más emblemáticos del país, ubicado en la Isla Isabela en las Islas Galápagos, el cual cuenta con una planta fotovoltaica de 952 kW de capacidad junto a un sistema de generación en base a biocombustible con una capacidad de 1625 kW. Este sistema reducirá al menos en un 25% las emisiones de CO_2 en la Isla Isabela provocadas por el uso de combustibles fósiles en la isla, al mismo tiempo que se aumenta la capacidad para satisfacer la

demanda energética de sus habitantes [15]. No se evidencia aún en Ecuador la existencia de sistemas de concentración solar.

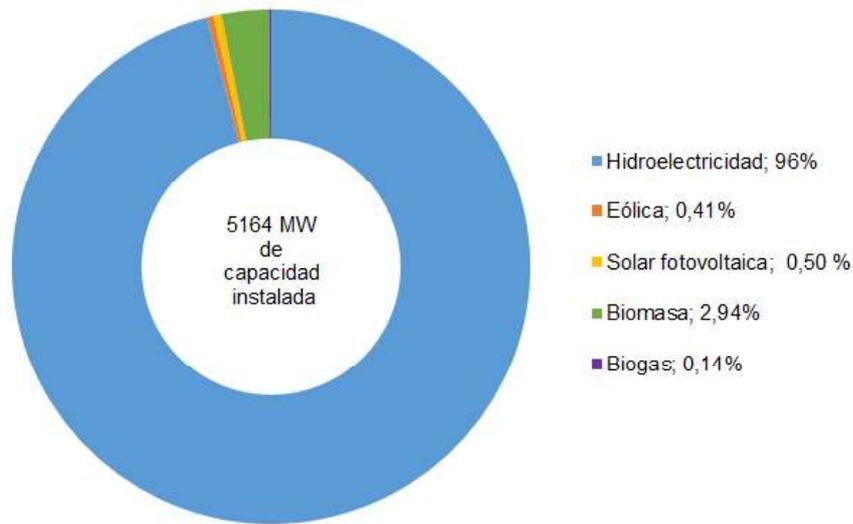


Figura 1.3. Capacidad instalada en sistemas de energías renovables en Ecuador. (Fuente: [14])

1.3. Aprovechamiento del recurso solar mediante colectores lineales Fresnel.

Los sistemas de concentración solar buscan aprovechar el recurso solar por medio de superficies reflectivas que concentran la radiación solar en un receptor, transfiriendo la energía a un fluido de transferencia de calor y provocando un aumento en su temperatura. Existe cuatro tipos de sistemas de concentración solar: colectores lineales Fresnel (LFC), torres solares, colectores de cilindro parabólico y discos parabólicos [3]. Las principales características de estos sistemas se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Sistemas de concentración solar.

Sistemas de Concentración Solar	Características comunes		
	Poseen superficies reflectivas que redirigen la radiación incidente hacia un receptor, en el cual la energía es transferida a un fluido de trabajo (HTF) aumentando su temperatura.		
	Tipo	Características	Ilustración
	Colector Lineal Fresnel	Emplean un arreglo de espejos planos que, mediante un sistema de seguimiento redirigen la radiación hacia un receptor, en el cual se encuentran las tuberías que transportan el HTF.	Figura 1.4

	Torre de concentración solar	Emplean un conjunto de espejos para reflejar la radiación a un receptor localizado en una torre.	Figura 1.5 a)
	Concentrador Parabólico	Utilizan reflectores de geometría parabólica para concentrar la radiación en un receptor ubicado en el foco de la parábola.	Figura 1.5 b)
	Disco Parabólico	Los reflectores tienen forma de discos parabólicos, que concentran la radiación en un punto focal.	Figura 1.5 c)

(Fuente: [3]. Elaboración: autor)

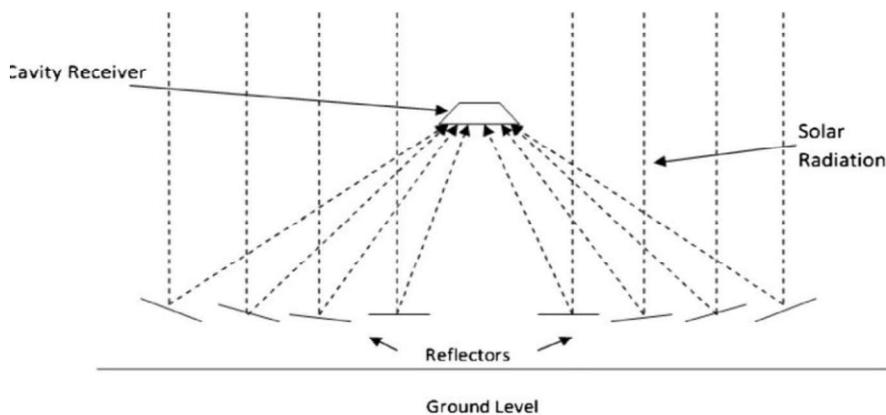


Figura 1.4. Esquema de un colector lineal Fresnel.
Fuente: [6]

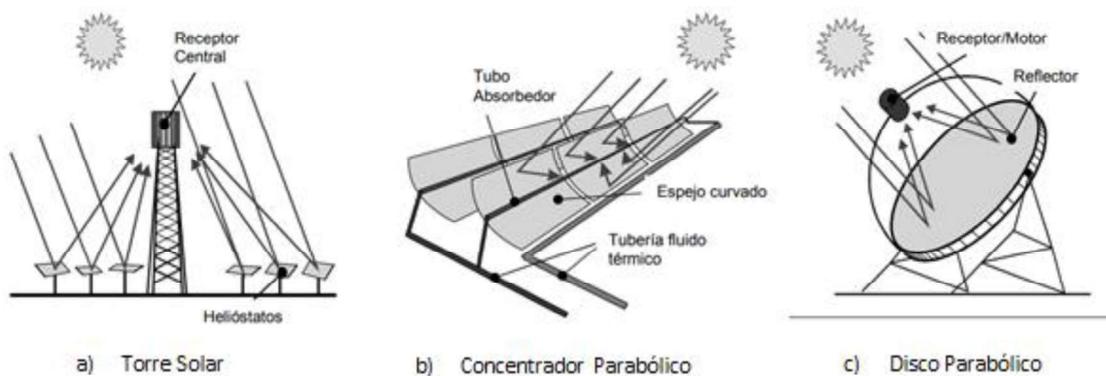


Figura 1.5. Tipos de sistemas de concentración solar.
(Fuente: [16])

Para la generación eléctrica a partir de sistemas de concentración solar, se requiere una insolación directa mínima de $5 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$, alcanzando una eficiencia entre 35% y 42%. Sin embargo, diversos factores climáticos, como la presencia de nubosidad pueden provocar intermitencia de la energía solar, esto se contrarresta con el uso de otras fuentes

de energía, o sistemas de almacenamiento de la misma. Así mismo, los avances tecnológicos en los sistemas de concentración solar han permitido aumentar la vida útil de los sistemas, alcanzar mayores temperaturas y disminuir notablemente sus costos de instalación [11].

El interés en el estudio de los colectores lineales Fresnel (LFC) radica en sus bajos costos de instalación, operación y mantenimiento. Además, las exigencias tecnológicas de su implementación están al alcance de un país en vías de desarrollo como Ecuador, siendo posible su construcción con la industria local, lo cual no sucede con sistemas como la torre solar o el disco parabólico [17]. Al ser comparados con los concentradores parabólicos (PTC), los LFC ofrecen una eficiencia 10% menor. Sin embargo, su implementación es 45% más económica, debido a la facilidad de construcción de los reflectores planos, menor área de terreno empleada, sistemas de seguimiento solar más sencillos y que exigen un menor mantenimiento, con lo cual el costo nivelado de la energía (LCOE) es muy comparable al de un sistema de PTC [4].

En términos generales, un LFC consta de un arreglo de espejos planos o ligeramente curvos (reflectores primarios) que concentran los rayos solares en una cavidad receptora que puede ser un tubo al vacío o un receptor trapezoidal y contiene un arreglo de tubos absorbedores. Dentro de estos tubos circula un fluido de trabajo o fluido de transferencia de calor (HTF) que absorbe la energía solar y aumenta su temperatura [5]. Adicionalmente, el receptor puede contener reflectores secundarios y material aislante para reducir las pérdidas de calor hacia el ambiente. También los reflectores primarios poseen un mecanismo de seguimiento para captar la mayor cantidad de radiación solar durante el día, mientras el receptor se mantiene fijo [18]. Los elementos descritos anteriormente pueden apreciarse en la Figura 1.6.

Para aprovechar la mayor cantidad de energía en el LFC es necesario disminuir las pérdidas de calor en el receptor. Estas pérdidas involucran procesos de radiación, convección y conducción, cuya interacción hace difícil llevar a cabo un modelo puramente analítico del sistema para su estudio [6]. Por ello, el uso de herramientas como la dinámica de fluidos computacional (CFD) se vuelve necesario para estudiar de manera precisa las pérdidas de calor en el receptor.

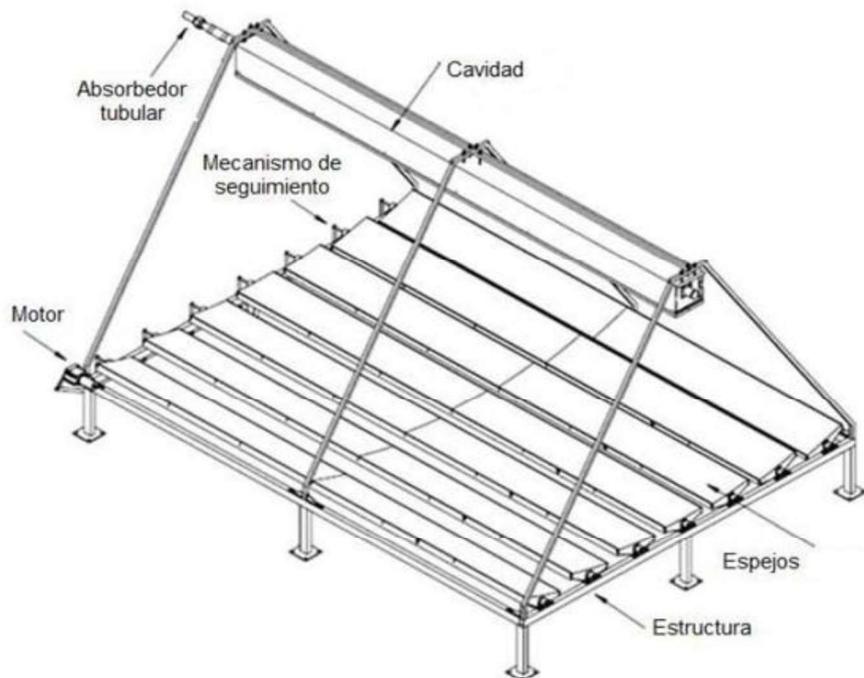


Figura 1.6. Elementos de un LFC
(Fuente: [19])

Existe una gran variedad de estudios realizados del comportamiento térmico y óptico del LFC. Puesto que en este trabajo el interés recae sobre el estudio térmico, se hará poca mención a los parámetros que influyen en el desempeño óptico del sistema. Pye et al. [20] desarrollan un modelo analítico del comportamiento de un receptor de geometría trapezoidal, en el cual encontraron que la radiación desde las superficies representa el 90% de las pérdidas de calor. Además empleando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) estudiaron pérdidas de calor por convección natural. Moghimi et al. [5] definen el comportamiento térmico del receptor en base a un análisis en dos dimensiones, con los procesos de transferencia de calor en estado estable y el aire dentro de la cavidad en régimen laminar, además este estudio considera constante a la temperatura de la superficie absorbente. En el mismo estudio, Moghimi et al. realizan una optimización matemática para determinar la geometría más apropiada para un receptor trapezoidal para reducir las pérdidas de calor y las cargas de viento laterales, además estudian cómo reducir los costos de construcción. Algunos estudios, como el de Lin et al., incluyen en sus modelos del receptor un aislamiento térmico de un determinado grosor de pared [21] mientras Sahoo et al. [6] simplemente modelan las paredes del receptor como adiabáticas. Jaramillo D. y Ordoñez F. [3] desarrollan un modelo simplificado del receptor mediante el método de resistencias térmicas equivalentes y comparan los resultados con simulaciones de CFD realizadas en FLUENT. Manikumar et al. [22] comparan el uso del

modelo Boussinesq y no Boussinesq para modelar el aire dentro del receptor, y concluye que el modelo no Boussinesq es el más apropiado para estudiar el comportamiento del aire dentro de la cavidad. Ordoñez F. y Flores E. [17], por su parte, presentan un modelo acoplado que incluye el análisis óptico y térmico del LFC en lenguaje Python y empleando datos meteorológicos reales de la ciudad de Quito.

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta las características geométricas y propiedades térmicas de los materiales que conforman el receptor del colector lineal Fresnel objeto de este estudio. Posteriormente, se explica el modelo simplificado del receptor en base a los fenómenos físicos que rigen en su comportamiento térmico. Para terminar, se expone los parámetros empleados para la creación de un caso mediante OpenFOAM que permite simular el comportamiento térmico del receptor.

2.1. Descripción del receptor trapezoidal del colector solar Fresnel.

En el presente estudio, se emplea la geometría del receptor trapezoidal con placa absorbadora estudiada por medio de simulaciones en Ansys FLUENT por Jaramillo D. [3] y estudiada también mediante modelos numéricos por Flores E. [17]. En el presente trabajo, no se realiza modificaciones a esta geometría para poder comparar los resultados de las simulaciones en OpenFOAM con los estudios previos. Ya que este trabajo no incluye el análisis óptico ni el estudio de factibilidad económica para la implementación del sistema, no se presenta las características de los reflectores primarios ni los costos de la construcción del sistema como tal, mas solo se presenta la geometría del receptor trapezoidal detallada en la Tabla 2.1, un esquema se presenta en la Figura 2.1 y las características termo físicas de los materiales que lo componen en la Tabla 2.2.

Tabla 2.1. Geometría del Receptor Fresnel.

	Símbolo	Unidad	Valor
Ancho de la cubierta de vidrio	W_g	mm	250
Espesor del vidrio	e_g	mm	5
Altura del receptor	H_{rec}	mm	61,12
Ancho de la placa absorbadora	W_{abs}	mm	179,4
Ángulo de los reflectores secundarios	θ	°	60
Espesor del aislante	e_{ins}	mm	100
Longitud del receptor	L	mm	2000
Número de tuberías	N_T	-	4
Diámetro de las tuberías	D	mm	37,5

(Fuente: [3], [17]. Elaboración: Autor)

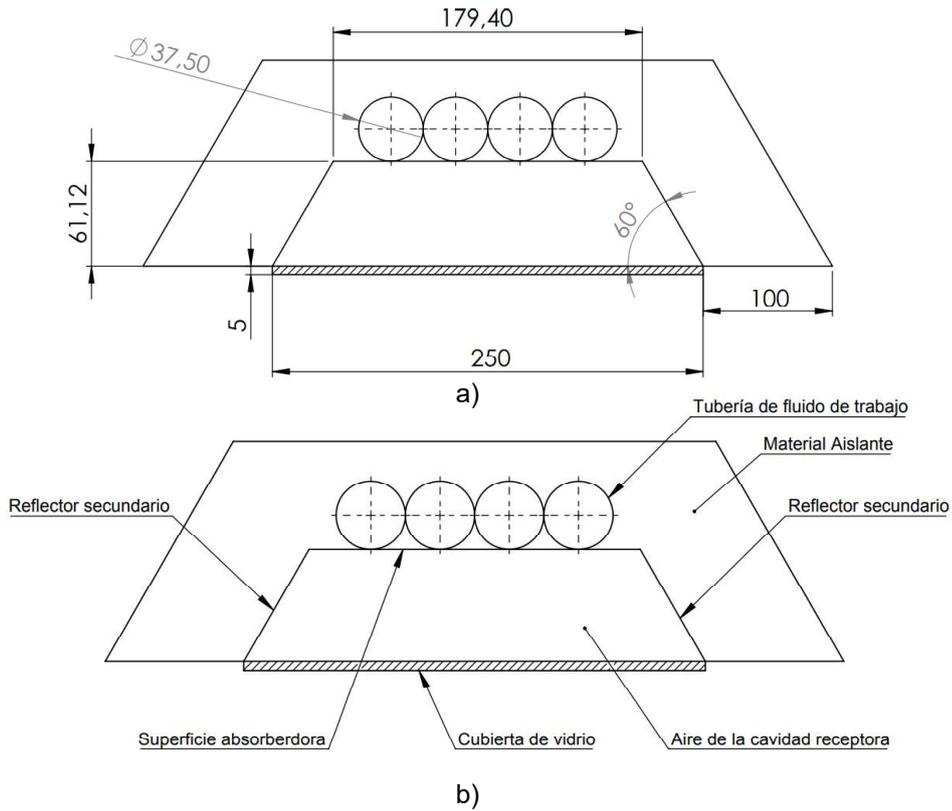


Figura 2.1. a) Geometría del receptor trapezoidal, b) Elementos del receptor trapezoidal.
(Fuente [3], [17]. Elaboración: Autor)

Tabla 2.2 Propiedades de los materiales del receptor Fresnel.

Elemento	Propiedad	Representación	Unidades	Valor
Cubierta de vidrio	Emisividad	ε_g	-	0,86
	Absortividad	α_g	-	0,02
	Transmitancia	τ_g	-	0,98
	Conductividad térmica	k_g	W/(m K)	1,1*
	Peso molecular	M_G	g/mol	60
	Calor específico	Cp_g	J/(kg K)	800*
	Densidad	ρ_g	$\frac{kg}{m^3}$	2500*
Aire	Peso molecular	M_a	g/mol	28,9*
	Calor específico	Cp_a	J/(kg K)	1007*
	Viscosidad Dinámica	μ	kg/(m s)	1,85e-5*

	Número de Prandtl	Pr	-	0,7*
	Conductividad Térmica	k_a	W/(m K)	0,02551*
	Densidad	ρ_a	$\frac{kg}{m^3}$	1,225*
Material aislante (poliestireno)	Conductividad térmica	k_{ins}	W/(m K)	0,035*
	Peso molecular	M_{ins}	g/mol	200 000
	Calor específico	Cp_{ins}	J/(kg K)	1673,6*
	Densidad	ρ_{ins}	$\frac{kg}{m^3}$	30*
Placa absorbedora (acero inoxidable con recubrimiento)	Emisividad	ε_{ins}	-	0,12
	Absortividad	α_{ins}	-	0,958
Reflectores secundarios (aluminio recubierto)	Emisividad	ε_{sr}	-	0,105
	Absortividad	α_{sr}	-	0,10
	Reflectividad	ρ_{sr}	-	0,90

(Fuente: [17], * [23]. Elaboración: Autor)

2.2. Explicación de los mecanismos de transferencia de calor dentro del receptor trapezoidal.

En esta sección se describe el comportamiento térmico del receptor y los mecanismos de transferencia de calor que ocurren en el mismo cuando recibe un flujo de calor de radiación concentrado proveniente del campo de espejos o reflectores primarios. La interdependencia entre los mecanismos de transferencia de calor, junto a la geometría y condiciones de borde relativamente complejas del receptor hacen que el problema sea complicado de investigar mediante modelos puramente analíticos [6]. Sin embargo, diversos autores han desarrollado modelos simplificados con resultados de precisión y exactitud aceptables [3], [6], [17], [24] [25] [26]. Estos modelos permiten conocer la cantidad de calor útil asociada al incremento de temperatura del fluido de trabajo o fluido de transferencia de calor (HTF) bajo una concentración de radiación definida y la influencia de diferentes parámetros geométricos en la eficiencia térmica y óptica del

receptor. Otros autores como Flores E. [17] han desarrollado modelos más detallados para estudiar los diferentes mecanismos de transferencia de calor en el receptor.

El objetivo principal de llevar a cabo el análisis térmico del receptor del colector lineal Fresnel es determinar la cantidad de energía útil captada en el sistema y la eficiencia térmica del mismo [25]. La energía provista por la concentración de radiación solar mediante el campo de espejos es una de las salidas de los estudios del comportamiento óptico del sistema. En términos generales, se puede conocer este flujo de energía en base a estudios ópticos de colectores similares al caso de interés.

La energía incidente, interactúa con las superficies internas del receptor y el aire en la cavidad, por lo cual una parte de esta energía será aprovechada por la superficie absorbedora mientras otra porción se transformará en pérdidas por convección con el aire, radiación entre las superficies a distintas temperaturas y conducción a través de las paredes de aislante. Y por lo tanto, la eficiencia térmica del receptor estará dada por la relación entre la cantidad de energía útil en la superficie absorbedora y la cantidad de energía total que ingresa al sistema.

La estimación de las pérdidas de calor por radiación, Q_{rad} , convección, Q_{conv} , y conducción, Q_{cond} , requieren de un análisis más detallado. Un ejemplo de ello es el modelo propuesto por Flores E. [17], que basándose en el esquema de la Figura 2.2 explica los mecanismos de transferencia de calor dentro del receptor y formula un sistema de ecuaciones mediante un balance energético en cada superficie del receptor, el cual permite calcular las temperaturas y los flujos de calor en cada una de las superficies del receptor. Finalmente, emplea estos flujos de calor para conocer la eficiencia térmica del receptor.

En las siguientes secciones se explica los mecanismos de transferencia de calor existentes en el receptor y las consideraciones que pueden ser tomadas para la determinación de los flujos de calor por radiación, conducción y convección en cada superficie.

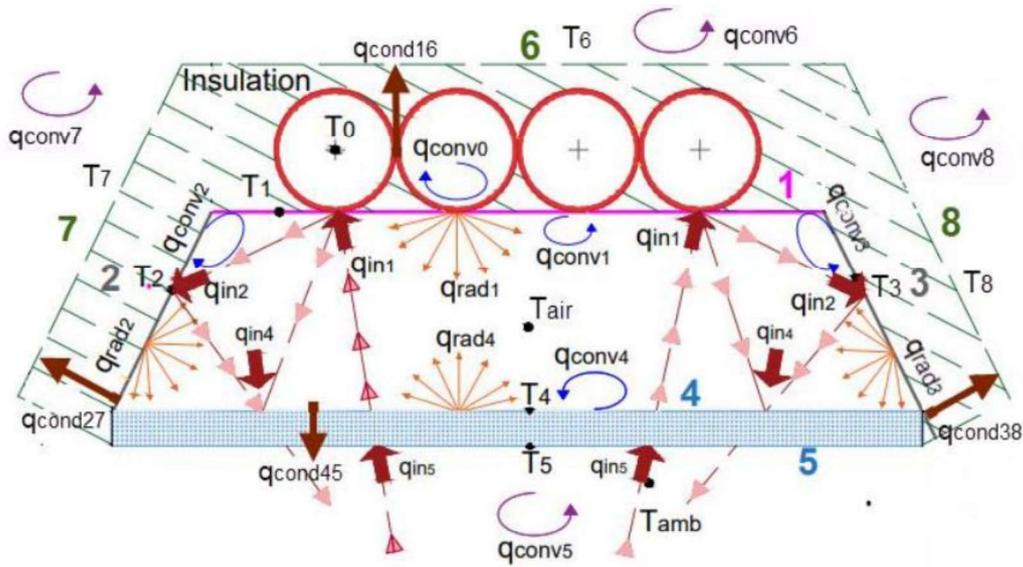


Figura 2.2. Mecanismos de transferencia de calor en el receptor.
(Fuente: [17])

2.2.1. Radiación entre las superficies internas.

La cubierta de vidrio se comporta como un material transparente para la radiación solar ya que posee una longitud de onda corta ($\lambda < 2.5 \mu\text{m}$). Cuando la radiación solar alcanza las superficies internas del receptor, provoca que estas aumenten su temperatura y por lo tanto existe radiación térmica, la cual posee una longitud de onda larga ($\lambda > 2.5 \mu\text{m}$) [3]. La cubierta de vidrio se comporta como un material opaco frente a la radiación de onda larga, y no permite que esta salga de la cavidad receptora, provocando que exista un constante intercambio de radiación térmica entre las superficies internas del receptor.

La transferencia de calor por radiación entre dos o más superficies depende de la geometría de dichas superficies y su orientación, además de sus respectivas propiedades radiativas y sus temperaturas [27]. En las aplicaciones de ingeniería, generalmente, se asume que las superficies están separadas por un medio no participativo, es decir que no emite, absorbe ni dispersa la radiación, y por lo tanto no tiene ningún efecto sobre la transferencia de radiación entre las superficies. Idealmente, este medio puede ser el vacío o a su vez la mayoría de gases a bajas y medias temperaturas [23], en este caso el aire dentro de la cavidad receptora.

2.2.2. Conducción a través de las paredes.

La energía absorbida por las diferentes superficies, se transmite a través de las paredes del receptor ocasionando pérdidas por conducción. El flujo de calor por conducción depende del coeficiente de conducción térmica de los materiales y de su espesor. Por

esta razón se emplea un material aislante con el fin de disminuir la cantidad de calor transferido a través del mismo y mantener la mayor cantidad de energía posible dentro del receptor para ser aprovechada por el fluido de trabajo.

2.2.3. Transferencia de calor por convección forzada y convección natural.

La interacción entre las distintas superficies del receptor trapezoidal y el aire del ambiente, el aire al interior de la cavidad y el HTF dan paso a diferentes procesos de transferencia de calor por convección. En esta sección se aborda los 3 tipos de convección presentes en el caso de estudio.

Las corrientes naturales de viento en el ambiente provocan el fenómeno de transferencia de calor por *convección externa forzada* entre las superficies externas del receptor y el aire del ambiente. En el desarrollo de un modelo simplificado, es posible considerar que el coeficiente de transferencia de calor entre las superficies externas y el aire se mantiene constante, a pesar de las posibles fluctuaciones de las corrientes de viento [17], [3]. También se asume que el aire externo se encuentra en régimen turbulento.

La segunda forma de transferencia de calor por convección en el sistema es por *convección interna forzada* entre el HTF y las tuberías que lo transportan a lo largo del receptor.

Por último, dentro de la cavidad del receptor Fresnel, las diferencias de temperatura provocan un gradiente en la densidad del aire existente dentro del receptor. Este gradiente ocasiona que el aire caliente, y por lo tanto menos denso, sea empujado hacia la parte superior originando corrientes naturales y dando paso a la transferencia de calor por *convección natural* entre el aire y las superficies internas del receptor.

Para el estudio de la transferencia de calor por convección, se emplea unos parámetros adimensionales que han sido desarrollados de manera empírica y se correlacionan definiendo el comportamiento del fluido en cada caso [23]. Estos números adimensionales se explican de manera resumida a continuación:

El *Número de Reynolds* es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas en el fluido, esta cantidad adimensional permite conocer si el flujo es laminar o turbulento [27], se representa con *Re*.

El *Número de Nusselt* se define como el coeficiente adimensional de transferencia de calor por convección, y relaciona la transferencia de calor por convección con la transferencia de calor por conducción a través de una capa de fluido [27]. Se representa con *Nu*. Un mayor número de Nusselt representa una convección más eficaz.

El *Número de Grashof* describe la relación entre flotabilidad y viscosidad dentro del fluido. Mientras el *Número de Prandtl* relaciona la difusividad de la cantidad de movimiento y la difusividad térmica.

El *Número de Rayleigh*, representado con Ra , es el producto de los números de Grashof y Prandtl, por lo tanto representa la razón de las fuerzas de flotabilidad y los productos de las difusividades térmicas y de cantidad de movimiento [27]. Este último es importante al momento de estudiar el fenómeno de convección natural.

2.3. Simulación mediante OpenFOAM.

OpenFOAM es un software de dinámica de fluidos computacional (CFD) de código libre que, hoy en día, compite con softwares comerciales como ANSYS Fluent y ha llegado a tener una gran base de usuarios en diversas áreas de ingeniería y ciencias con fines comerciales y académicos [28]. Este software ofrece una gran variedad de opciones que permiten resolver problemas complejos incluyendo reacciones químicas, estudios de flujo turbulento, transferencia de calor e incluso acústica, mecánica de sólidos y electromagnetismo [7] los diferentes tipos de problemas se agrupan en módulos denominados “*solver*”.

El “*solver*” utilizado es *chtMultiRegionFoam*, un “*solver*” disponible en OpenFOAM que permite estudiar transferencia de calor conjugada y mecánica de fluidos entre regiones de fluidos y sólidos, para estudios en estado estable o transitorio, con presencia o no de convección natural, turbulencia y radiación [7]. Este “*solver*” lleva a cabo una solución segregada, es decir que las ecuaciones que caracterizan el sistema para cada variable son solucionadas en secuencia, y la solución de cada ecuación precedente es utilizada para la siguiente ecuación. El acople entre las regiones de fluido y de sólido posee la misma estrategia, de forma que, se soluciona las ecuaciones para la parte de fluido utilizando la temperatura del sólido de la iteración precedente definida en las condiciones de borde, luego se soluciona la ecuación de la parte sólida empleando la temperatura del fluido obtenida en la última iteración y así sucesivamente hasta que el sistema alcanza la convergencia en estado estable [29].

Las ecuaciones que emplea el “*solver*” se clasifican en: ecuaciones de fluido, ecuaciones de sólido y acoplamiento entre sólido y fluido. Además se presenta el modelo de *factor de forma* o *viewFactor* empleado por OpenFOAM para determinar los flujos de calor por radiación entre las superficies.

2.3.1. Ecuaciones de fluido.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son resueltas en cada región de fluido, utilizando la ecuación de presión para establecer un vínculo entre las ecuaciones de momento y de continuidad, mediante el algoritmo denominado “PIMPLE” descrito en la Figura 2.3.

El algoritmo “PIMPLE” es un acoplamiento que emplea OpenFOAM entre los algoritmos “SIMPLE” (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) y “PISO” (Pressure-Implicit with Splitting of Operators). Estos algoritmos son procedimientos numéricos empleados en la dinámica de fluidos computacional para resolver las ecuaciones de Navier Stokes [30].

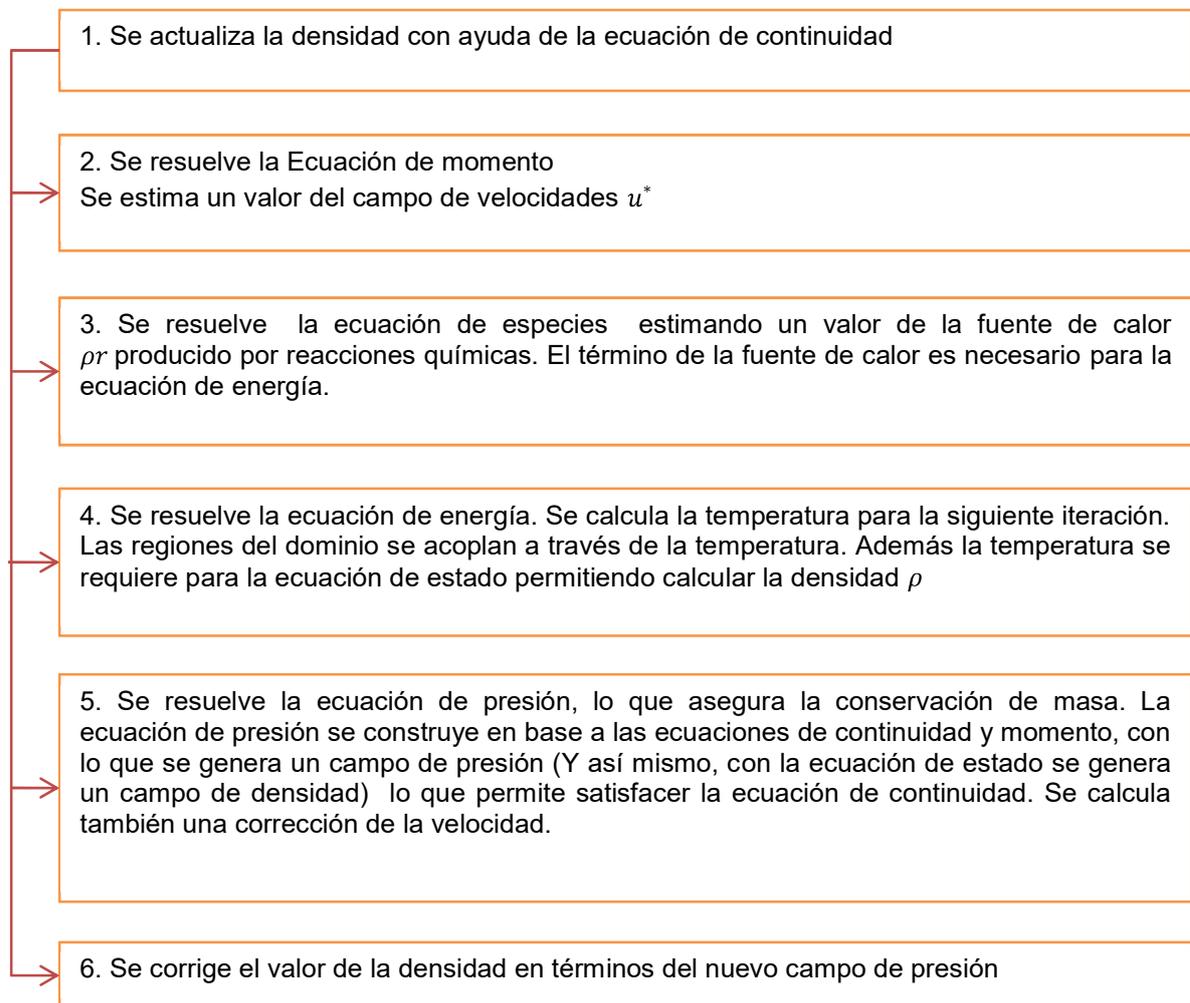


Figura 2.3. Algoritmo de solución de las ecuaciones en las regiones de fluido.
(Fuente: [29])

La ecuación de conservación de masa, o ecuación de continuidad es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{EC. 1})$$

La ecuación de momento es:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_r j u_i) + \rho \epsilon_{ijk} \omega_i u_j = \frac{\partial p_{rgh}}{\partial x_i} - \frac{\partial \rho g_i x_j}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{tij}) \quad (\text{EC. 2})$$

En donde u representa la velocidad, u_r la velocidad relativa, g_i la aceleración gravitacional, $p_{rgh} = p - \rho g_j x_j$ es la presión menos la presión hidrostática, τ_{ij} y τ_{tij} representan los esfuerzos debido a viscosidad y turbulencia.

La energía total en un fluido puede describirse como la suma de su energía cinética k y su energía interna e .

La tasa de cambio de la energía cinética k del fluido es el trabajo producido en el fluido por las fuerzas viscosas, la presión y la gravedad, esto se expresa mediante:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = -\frac{\partial p u_i}{\partial x_i} - \rho g_j u_j + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} u_j) \quad (\text{EC. 3})$$

Mientras que, la tasa de cambio de la energía interna e es el calor transferido al fluido por difusión y turbulencia $q_i + q_{ti}$ más el calor generado r y el calor de radiación Rad , como se observa en la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j e) = -\frac{\partial(q_i + q_{ti})}{\partial x_i} + \rho r + Rad \quad (\text{EC. 4})$$

Por lo tanto, la tasa de cambio de energía total en el fluido, resulta de la suma de las ecuaciones 3 y 4:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j e) + \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) \\ &= -\frac{\partial(q_i + q_{ti})}{\partial x_i} + \rho r + Rad - \frac{\partial p u_i}{\partial x_i} - \rho g_j u_j + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} u_j) \end{aligned} \quad (\text{EC. 5})$$

Además, es posible resolver la ecuación para la entalpía h en lugar de la energía interna e , sabiendo que $h = e + p/\rho$, con lo que se obtiene:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h) + \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) \\ &= -\frac{\partial(q_i + q_{ti})}{\partial x_i} + \rho r + Rad - \frac{\partial p u_i}{\partial x_i} - \rho g_j u_j + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} u_j) \end{aligned} \quad (\text{EC. 6})$$

Para tomar en cuenta las reacciones químicas que ocurren dentro del dominio, es necesario resolver una ecuación de conservación para cada especie k , a esta se denomina "ecuación de especies" y se indica a continuación:

$$\frac{\partial(\rho Y_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \mu_{eff} \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} + R_k \quad (\text{EC. 7})$$

Siendo R_k la tasa de reacción de la especie k.

La ecuación de corrección de presión empleada por OpenFOAM es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho^*}{\partial t} + \psi \frac{\partial Y'_{rgh}}{\partial t} \quad (\text{EC. 8})$$

2.3.2. Ecuaciones para sólido.

En las regiones de sólido, es necesario únicamente resolver la ecuación de energía, la cual señala que el cambio temporal de entalpía del sólido es igual a la divergencia del calor conducido a través del mismo:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} + \left(\alpha \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) \quad (\text{EC. 9})$$

2.3.3. Acoplamiento entre fluido y sólido.

El solver *chtMultiRegionFoam* realiza el acople entre las regiones de fluido y sólido empleando dos condiciones: la temperatura en la interfaz de sólido y fluido es la misma para ambos, y además, el flujo de calor que ingresa en una región a un lado de la interfaz es igual al flujo de calor que sale de la otra región. Esto se expresa mediante las siguientes ecuaciones:

$$T_{fluido} = T_{sólido} \quad (\text{EC. 10})$$

$$Q_{sólido} + Q_{radiación_{sólido}} = Q_{fluido} + Q_{radiación_{fluido}} \quad (\text{EC. 11})$$

2.3.4. Modelo de radiación *viewFactor*.

En el presente caso de estudio se emplea el modelo de factor de forma o *viewFactor* para tomar en consideración la transferencia de calor por radiación térmica entre las superficies internas del receptor. El sistema que resuelve OpenFOAM para el modelo de *viewFactor* es:

$$C_{ij} q = b \quad (\text{EC. 12})$$

En dónde:

$$C_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - F_{ij} \left(\frac{1}{\varepsilon_j} - 1 \right) \quad (\text{EC. 13})$$

$$b = A_{ij} e_b - H_o \quad (\text{EC. 14})$$

$$A_{ij} = \delta_{ij} - F_{ij} \quad (\text{EC. 15})$$

$$e_b = \sigma T^4 \quad (\text{EC. 16})$$

Siendo q el flujo de calor por radiación, F_{ij} la matriz de factor de forma, ε_j la emisividad de la superficie, σ la constante de Stefan Boltzmann y H_o la radiación externa que alcanza la superficie. Resultando:

$$\left[\frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - F_{ij} \left(\frac{1}{\varepsilon_j} - 1 \right) \right] q = (\delta_{ij} - F_{ij}) (\sigma T^4) - H_o \quad (\text{EC. 17})$$

2.4. Configuración para la simulación en OpenFOAM.

A pesar de ser un software libre, el software posee la desventaja de tener una curva de aprendizaje empinada además de la falta de una interfaz gráfica para el preprocesamiento como lo tienen la mayoría de softwares comerciales [28] [31]. Adicionalmente, es preciso mencionar algunos trabajos como los de M. Hermosilla [31], A. Vdovin [32], A. Singhal [33], M. Van Der Tempel [34] y S. Verdérico [35], quienes presentan algunas guías y ejemplos de casos de transferencia de calor conjugada en OpenFOAM y que han sido de gran utilidad para el desarrollo del presente estudio. Por esta razón, en las siguientes secciones se presenta una descripción detallada de los directorios y librerías empleadas para la creación y simulación del caso, de forma que este trabajo sirva de base para futuros estudios.

OpenFOAM posee una estructura de trabajo que consta de 3 etapas comunes en los softwares de CFD, tal como se muestra en la Figura 2.4, estas etapas son: Preprocesamiento, la Solución del caso y el Postprocesamiento. Las librerías empleadas en la simulación del comportamiento térmico del receptor lineal Fresnel se describen brevemente en las siguientes secciones, si se desea conocer más sobre el funcionamiento de cada librería o archivo empleado se recomienda revisar la guía de OpenFOAM [7] y la bibliografía consultada [31] [32] [33] [34].

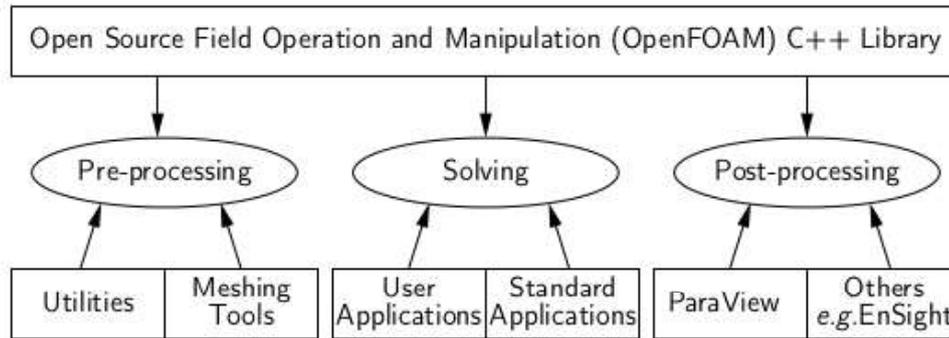


Figura 2.4. Estructura de trabajo en OpenFOAM
(Fuente: [7])

2.4.1. Descripción del caso.

El caso de estudio se construye en base a la geometría descrita en la Tabla 2.1 y con las propiedades de los materiales mencionados en la Tabla 2.2. Las condiciones de borde del sistema se determinan en base a los estudios llevados a cabo por Jaramillo [3] y Flores [17]. Un diagrama del caso se puede observar en la Figura 2.5. En donde se detalla las diferentes regiones consideradas para el estudio denominadas de la siguiente manera: *glass* para la región de vidrio, *air* para el aire dentro de la cavidad, *LeftInsulation* para el material aislante al lado izquierdo y *RightInsulation* para el aislante del lado derecho.

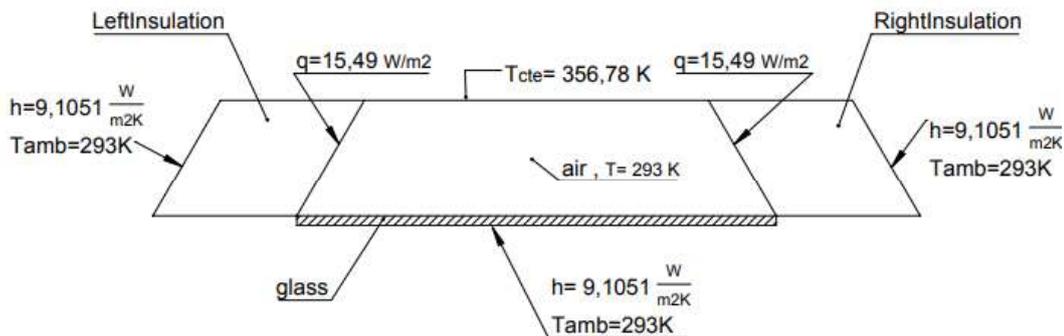


Figura 2.5. Esquema del caso de estudio.
(Fuente: Propia)

Para la creación del caso se asume las siguientes condiciones: estudio en estado estable, el aire dentro de la cavidad se comporta como un flujo bidimensional en régimen laminar y se lo considera un gas ideal. Existe radiación entre las superficies internas empleando el modelo de factor de forma (view factor) y el aire se considera un medio no participativo (no absorbe ni dispersa la radiación). Las superficies son grises, difusas con propiedades radiativas de emisión y absorción constante y uniforme.

2.4.2. Estructura del caso.

La estructura del caso de estudio se muestra en la Figura 2.6.

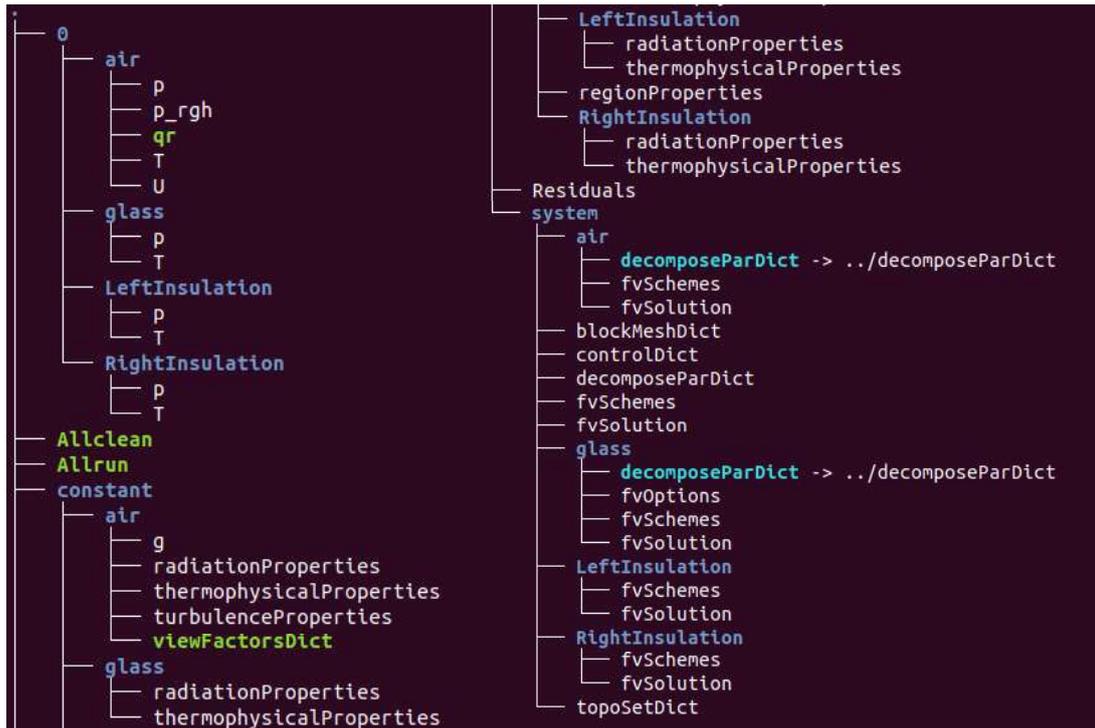


Figura 2.6. Estructura del caso de estudio
(Fuente: Propia)

En la estructura de cualquier caso de estudio en OpenFOAM, se destacan 3 directorios principales: *0*, *constant* y *system*:

- El directorio *0* contiene archivos individuales para diferentes campos, como velocidad, presión o temperatura. En estos archivos se especifica también las condiciones de borde y valores iniciales que definen el problema.
- En el directorio *constant* se almacena la información del mallado del caso y archivos que especifican las propiedades físicas de los materiales de acuerdo a la aplicación de interés.
- El directorio *system* contiene información asociada al procedimiento de solución en tres archivos principales: *controlDict* en donde se determina parámetros de control de la simulación, como tiempos de inicio y fin, y parámetros para el almacenamiento de los datos obtenidos; *fvSchemes* en donde se encuentra los esquemas de discretización empleados en la solución; y *fvSolution* en donde se puede especificar los distintos algoritmos y tolerancias para la resolución de las ecuaciones.

Puesto que en este trabajo se presenta un caso de transferencia de calor en distintas regiones, es necesario añadir directorios adicionales que contienen la información de cada región: *glass*, *air*, *LeftInsulation* y *RightInsulation*.

2.4.3. Generación de la geometría: BlockMeshDict y topoSetDict.

BlockMesh es una utilidad que ofrece OpenFOAM para la creación de mallas simples en base a elementos con forma hexaédrica. La geometría deseada y el tamaño de los elementos se configuran en la librería denominada *blockMeshDict* especificando las coordenadas de los vértices de cada elemento hexaédrico deseado, y se agrupa dichos puntos para formar conjuntos que corresponden a las aristas y caras de cada bloque. La configuración realizada se muestra en la Figura 2.7. Los comandos empleados serán de fácil comprensión para cualquier usuario familiarizado con OpenFOAM.

```

1 /*-----*-- C++ --*-----*/
2 |=====|
3 | \ \ \ \ / F i e l d       | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4 | \ \ \ \ / O p e r a t i o n | Version: dev
5 | \ \ \ \ / A n d           | Web:      www.OpenFOAM.org
6 | \ \ \ \ / M a n i p u l a t i o n |
7 |-----*--*/
8 FoamFile
9 {
10  version      2.0;
11  format       ascii;
12  class        dictionary;
13  object       blockMeshDict;
14 }
15 // ***** //
16
17 convertToMeters 0.001; // las cantidades están en [mm]
18
19 vertices
20 (
21   (-125 -5 0) //0
22   (125 -5 0) //1
23   (125 0 0) //2
24   (89.7 61.12 0) //3
25   (-89.7 61.12 0) //4
26   (-125 0 0) //5
27   (-125 -5 10) //6
28   (125 -5 10) //7
29   (125 0 10) //8
30   (89.7 61.12 10) //9
31   (-89.7 61.12 10) //10
32   (-125 0 10) //11
33   (225 0 0) //12
34   (189.7 61.12 0) //13
35   (225 0 10) //14
36   (189.7 61.12 10) //15
37   (-189.7 61.12 0) //16
38   (-225 0 0) //17
39   (-189.7 61.12 10) //18
40   (-225 0 10) //19
41 );
42 );
43
44
45 blocks //se define los bloques que conforman la geometría
46 (
47   hex (0 1 2 5 6 7 8 11) (80 5 1) simpleGrading (1 1 1)
48   hex (5 2 3 4 11 8 9 10) (80 30 1) simpleGrading (1 1 1)
49   hex (2 12 13 3 8 14 15 9) (40 30 1) simpleGrading (1 1 1)
50   hex (17 5 4 16 19 11 10 18) (40 30 1) simpleGrading (1 1 1)
51 );
52
53 edges
54 (
55 );
56
57 boundary //se define grupos de las caras que conforman los bordes

```

```

58 (
59   FrontandBack
60   {
61     type empty;
62     faces
63     (
64       (0 1 2 5)
65       (5 2 3 4)
66       (6 7 8 11)
67       (11 8 9 10)
68       (2 12 13 3)
69       (8 14 15 9)
70       (17 5 4 16)
71       (19 11 10 18)
72     );
73   }
74
75   externalWalls
76   {
77     type wall;
78     faces
79     (
80       (6 0 5 11)
81       (1 7 8 2)
82       (19 11 5 17)
83       (8 14 12 2)
84       (12 14 15 13)
85       (19 17 16 18)
86       (3 13 15 9)
87       (16 4 10 18)
88     );
89   }
90
91   ceiling
92   {
93     type wall;
94     faces
95     (
96       (4 3 9 10)
97     );
98   }
99
100  floor
101  {
102    type wall;
103    faces
104    (
105      (6 7 1 0)
106    );
107  }
108
109  mergePatchPairs
110  (
111  );
112
113 // *****

```

Figura 2.7 Creación de la geometría con blockMesh.
(Fuente: Propia)

Adicionalmente, es necesario emplear una utilidad denominada *topoSet*, la cual permite crear grupos de celdas con facilidad lo cual resulta útil para definir las regiones de distintos materiales presentes en el caso. Los parámetros deseados se configuran en la librería *topoSetDict*, creando 4 grupos de celdas: *air*, para la región de aire interno del receptor; *glass*, para la cubierta de vidrio; *LeftInsulation* y *RightInsulation*, para el material aislante al lado izquierdo y derecho respectivamente. La Figura 2.8 expone los comandos utilizados para este fin en la librería *topoSetDict*.

```

1  /*----- C++ -----*/
2  |=====|
3  | \ / | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4  |  / \ | O peration | Version: dev
5  |  / \ | A n d | Web: www.OpenFOAM.org
6  |  / \ | M anipulation |
7  |-----*/
8  FoamFile
9  {
10     version      2.0;
11     format        ascii;
12     class         dictionary;
13     object        topoSetDict;
14 }
15
16 // *****
17
18 actions
19 (
20     // glass
21     {
22         name      glassCellSet;
23         type      cellSet;
24         action    new;
25         source    boxToCell;
26         sourceInfo
27         {
28             box (-0.125 -5 0)(0.125 0 10); // box1
29         }
30     }
31     {
32         name      glass;
33         type      cellZoneSet;
34         action    new;
35         source    setToCellZone;
36         sourceInfo
37         {
38             set glassCellSet;
39         }
40     }
41
42     // insulation
43     {
44         name      LeftInsulationCellSet;
45         type      cellSet;
46         action    new;
47         source    rotatedBoxToCell;
48         sourceInfo
49         {
50             origin (-0.225 0 0);
51             i (0.10 0 0);
52             j (0.0353 0.06112 0);
53             k (0 0 1); // box1
54         }
55     }
56     {
57         name      RightInsulationCellSet;
58         type      cellSet;
59         action    new;
60         source    rotatedBoxToCell;
61         sourceInfo
62         {
63             origin (0.125 0 0);
64             i (0.10 0 0);
65             j (-0.0353 0.06112 0);
66             k (0 0 1); // box1
67         }
68     }
69     {
70         name      LeftInsulation;
71         type      cellZoneSet;
72         action    new;
73         source    setToCellZone;
74         sourceInfo
75         {
76             set LeftInsulationCellSet;
77         }
78     }
79     {
80         name      RightInsulation;
81         type      cellZoneSet;
82         action    new;
83         source    setToCellZone;
84         sourceInfo
85         {
86             set RightInsulationCellSet;
87         }
88     }
89     //Solid
90     {
91         name      solidCellSet;
92         type      cellSet;
93         action    new;
94         source    cellToCell;
95         sourceInfo
96         {
97             set LeftInsulationCellSet;
98         }
99     }
100    {
101        name      solidCellSet;
102        type      cellSet;
103        action    add;
104        source    cellToCell;
105        sourceInfo
106        {
107            set RightInsulationCellSet;
108        }
109    }
110    {
111        name      solidCellSet;
112        type      cellSet;
113        action    add;
114        source    cellToCell;
115        sourceInfo
116        {
117            set glassCellSet;
118        }
119    }
120
121    //Air
122    {
123        name      solidCellSet;
124        type      cellSet;
125        action    invert;
126    }
127
128    {
129        name      air;
130        type      cellZoneSet;
131        action    new;
132        source    setToCellZone;
133        sourceInfo
134        {
135            set solidCellSet;
136        }
137    }
138
139 );
140
141
142 // *****

```

Figura 2.8. Creación de las distintas regiones con topoSet.
(Fuente: Propia)

En la creación de la geometría es necesario crear también varios grupos de caras de las celdas que pertenecen a las distintas superficies e interfaces del modelo a estudiar.

Adicionalmente, al tratarse de un caso multi-región, el solver crea las superficies de interfaces entre las distintas regiones y les asigna un nombre. Estas superficies se indican en la Tabla 2.3 y su comprensión es fundamental para definir las condiciones de borde indicadas la siguiente sección.

Tabla 2.3. Grupos de caras de las superficies del receptor Fresnel.

Nombre asignado al grupo	Descripción
<i>externalWalls</i>	Paredes externas del receptor en contacto con el ambiente.
<i>floor</i>	Superficie externa de la cubierta de vidrio.
<i>ceiling</i>	Superficie absorbadora.
<i>FrontandBack</i>	Asignado a las caras normales al eje Z.
<i>air_to_glass</i> <i>glass_to_air</i>	Superficie interna del vidrio en contacto con el aire del receptor.
<i>air_to_LeftInsulation</i> <i>LeftInsulation_to_air</i>	Superficie interna del material aislante en contacto con el aire del receptor.
<i>air_to_RightInsulation</i> <i>RightInsulation_to_air</i>	Superficie interna del material aislante en contacto con el aire del receptor.

(Fuente: Propia)

2.4.4. Condiciones iniciales y de borde.

Las condiciones iniciales y de borde empleadas en el problema se indican en la Tabla 2.4, Tabla 2.5 Tabla 2.6 y Tabla 2.7.

Tabla 2.4. Condiciones de borde para la región aire.

Borde	p	p_rgh	qr	T	U
internalField	10e5 Pa	10e5 Pa	0	293 K	(0 0 0)
ceiling	calculated	fixedFluxPressure	greyDiffusiveRadiati onViewFactor	fixedValue 356.78 K	noSlip
air_to_LeftInsulation				compressible::turbulentTemperat ureRadCoupledMixed	
air_to_RightInsulation					

air_to_glass					
FrontandBack	empty				

(Fuente: Propia)

Tabla 2.5. Condiciones de borde para la región vidrio

Borde	p	T
internalField	0	293 K
externalWalls	calculated	externalWallHeatFluxTemperature
floor		
glass_to_air		compressible::turbulentTemperatureRadCoupledMixed
FrontandBack	empty	

(Fuente: Propia)

Tabla 2.6. Condiciones de borde para la región aislamiento izquierdo

Borde	p	T
internalField	0	293 K
externalWalls	calculated	externalWallHeatFluxTemperature
LeftInsulation_to_air		compressible::turbulentTemperatureRadCoupledMixed
FrontandBack	empty	

(Fuente: Propia)

Tabla 2.7. Condiciones de borde para la región aislamiento derecho

Borde	p	T
internalField	0	293 K
externalWalls	calculated	externalWallHeatFluxTemperature
RightInsulation_to_air		compressible::turbulentTemperatureRadCoupledMixed
FrontandBack	empty	

(Fuente: Propia)

Las condiciones de borde empleadas se explican a continuación:

compressible::turbulentTemperatureRadCoupledMixed.- Condición de borde mixta para temperatura y transferencia de calor por radiación empleada en casos multiregión.

externalWallHeatFluxTemperature.- Aplica una condición de flujo de calor en una superficie externa ya sea por potencia impuesta [W], flujo de calor [W/m²] o con un coeficiente de transferencia de calor, en base a un h y una temperatura externa.

greyDiffusiveRadiationViewFactor.- Provee una condición gris-difusa a la superficie para flujo de calor por radiación, se emplea con el modelo de factor de forma para transferencia de calor por radiación.

empty.- Se utiliza en las caras normales al eje Z para las cuales no se requiere una solución, puesto que el caso es bidimensional.

2.4.5. Propiedades de los materiales.

Dependiendo del caso de estudio, es necesario especificar varias propiedades físicas de los materiales, estos archivos se encuentran en el directorio *constant*, dentro de directorios con el nombre de cada región. Las propiedades utilizadas corresponden a las especificadas en la Tabla 2.2 y se describen en las librerías del caso de acuerdo a las Figuras (Figura 2.9 -Figura 2.15).

La Figura 2.9 y Figura 2.10 corresponden a las librerías *thermoPhysicalProperties* y *radiationProperties* de la región de vidrio, en donde es necesario especificar las propiedades termofísicas y radiativas de la región respectivamente.

La Figura 2.11 y Figura 2.12 corresponden a las librerías *thermoPhysicalProperties* y *radiationProperties* de las regiones de material aislante.

La Figura 2.13 y Figura 2.14 corresponden a las librerías *thermoPhysicalProperties* y *radiationProperties* de la región del aire dentro del receptor. En las regiones de fluido es necesario también especificar sus propiedades de turbulencia en una librería denominada *turbulenceProperties*, sin embargo en este caso se considera que el aire se encuentra en régimen laminar, por lo que únicamente se necesita especificar con el comando *laminar* tal como se muestra en la Figura 2.15.

Es necesario prestar especial atención a la librería *radiationProperties* de la región aire, puesto que aquí se especifica el modelo de radiación que se desea emplear, en este caso el modelo *viewFactor*.

```

1 /*----- C++ -----*/
2 |=====|
3 | \ \ / / | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4 | \ \ / / | O p e r a t i o n | Version: dev
5 | \ \ / / | A n d | Web: www.OpenFOAM.org
6 | \ \ / / | M a n i p u l a t i o n |
7 /*-----*/
8 FoamFile
9 {
10  version      2.0;
11  format       ascii;
12  class        dictionary;
13  object       thermophysicalProperties;
14 }
15 // ***** //
16
17 thermoType
18 {
19  type          heSolidThermo;
20  mixture       pureMixture;
21  transport     constIso;
22  thermo        hConst;
23  equationOfState rhoConst;
24  specie        specie;
25  energy        sensibleEnthalpy;
26 }
27
28 mixture
29 {
30  specie
31  {
32    nMoles 1;
33    molWeight 60;
34  }
35 }
36  transport
37  {
38    kappa 1.1; //thermal conductivity
39  }
40
41  thermodynamics
42  {
43    Hf 0; //calor latente de fusion
44    Cp 800; // calor especifico
45  }
46
47  equationOfState
48  {
49    rho 2500; //densidad
50  }
51 }
52
53 // ***** //

```

Figura 2.9. Propiedades termo físicas de la región de vidrio.
(Fuente: Propia)

```

1 /*----- C++ -----*/
2 |=====|
3 | \ \ / / | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4 | \ \ / / | O p e r a t i o n | Version: dev
5 | \ \ / / | A n d | Web: www.OpenFOAM.org
6 | \ \ / / | M a n i p u l a t i o n |
7 /*-----*/
8
9 FoamFile
10 {
11  version      2.0;
12  format       ascii;
13  class        dictionary;
14  location     "constant";
15  object       radiationProperties;
16 }
17 // ***** //
18
19 radiation on;
20
21 radiationModel opaqueSolid;
22
23 absorptionEmissionModel constant;
24
25 constantCoeffs
26 {
27  absorptivity 0.02; //opaque
28  emissivity   0.86;
29  E            0; // Potencia emisiva del cuerpo
30 }
31
32 scatterModel none;
33
34 sootModel none;
35
36 // ***** //

```

Figura 2.10. Propiedades de radiación de la región de vidrio.
(Fuente: Propia)

```

1 /*-----* C++ -*-----*/
2 |=====|
3 | \ \ \ / | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4 | \ \ \ / | O p e r a t i o n | Version: dev
5 | \ \ \ / | A n d | Web: www.OpenFOAM.org
6 | \ \ \ / | M a n i p u l a t i o n |
7 /*-----*
8 FoamFile
9 {
10     version      2.0;
11     format        ascii;
12     class         dictionary;
13     object        thermophysicalProperties;
14 }
15 // *****
16
17 thermoType                35
18 {
19     type              heSolidThermo; 36     transport
20     mixture           pureMixture;   37     {
21     transport         constIso;      38         kappa 0.035; //thermal conductivity
22     thermo            hConst;        39     }
23     equationOfState   rhoConst;      40
24     specie            specie;        41     thermodynamics
25     energy            sensibleEnthalpy; 42     {
26 }                               43         Hf 0; //calor latente de fusion
27                               44         Cp 1673.6; // calor especifico
28 mixture              45     }
29 {                               46
30     specie            47     equationOfState
31     {                 48     {
32         nMoles 1;     49         rho 30; //densidad
33         molWeight 200000; 50     }
34     }                 51 }
35                               52
36 // *****

```

Figura 2.11. Propiedades termo físicas de la región de material aislante.
(Fuente: Propia)

```

1 /*-----* C++ -*-----*/
2 |=====|
3 | \ \ \ / | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4 | \ \ \ / | O p e r a t i o n | Version: dev
5 | \ \ \ / | A n d | Web: www.OpenFOAM.org
6 | \ \ \ / | M a n i p u l a t i o n |
7 /*-----*
8
9 FoamFile
10 {
11     version      2.0;
12     format        ascii;
13     class         dictionary;
14     location      "constant";
15     object        radiationProperties;
16 }
17 // *****
18
19 radiation off;
20
21 radiationModel  opaqueSolid;
22
23 absorptionEmissionModel constant;
24
25 constantCoeffs
26 {
27     absorptivity  0.0; //opaque
28     emissivity    0.1;
29     E             0; // Potencia emisiva del cuerpo
30 }
31
32 scatterModel    none;
33
34 sootModel       none;
35
36 // *****

```

Figura 2.12 Propiedades de radiación de la región de material aislante.
(Fuente: Propia)

```

1 /*-----* C++ -*-----*\
2 =====
3 \ \ / / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4 \ \ / / O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
5 \ \ / / A n d | Version: dev
6 \ \ / / M a n i p u l a t i o n |
7 /*-----*\
8 FoamFile
9 {
10     version      2.0;
11     format        ascii;
12     class         dictionary;
13     location      "constant";
14     object        thermophysicalProperties;
15 }
16 // *****
17 thermoType
18 {
19     type          heRhoThermo;
20     mixture       pureMixture;
21     transport     const;
22     thermo        hConst;
23     equationOfState perfectGas;
24     specie        specie;
25     energy        sensibleEnthalpy;
26 }
27 pRef            100000;
28 mixture
29 {
30     specie
31     {
32         molWeight  28.9; // g/mol
33     }
34     thermodynamics
35     {
36         Cp          1007; // J/KgK @ 293 K
37         Hf          0;
38     }
39     transport
40     {
41         mu          1.85e-05; // Kg/ms @ 293 K
42         Pr          0.7;
43         kappa       0.02551;
44     }
45     equationOfState
46     {
47         rho         1.225; //densidad Kg/m3
48     }
49 }
50 // *****

```

Figura 2.13. Propiedades termo físicas de la región aire.
(Fuente: Propia)

```

1 /*-----* C++ -*-----*\
2 =====
3 \ \ / / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4 \ \ / / O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
5 \ \ / / A n d | Version: dev
6 \ \ / / M a n i p u l a t i o n |
7 /*-----*\
8 FoamFile
9 {
10     version      2.0;
11     format        ascii;
12     class         dictionary;
13     location      "constant";
14     object        radiationProperties;
15 }
16 // *****
17
18 radiation on;
19 radiationModel  viewFactor;
20
21 // Number of flow iterations per radiation iteration
22 solverFreq 1;
23
24 viewFactorCoeffs
25 {
26     smoothing true; //use when in a close surface to force Sum(Fij = 1)
27     constantEmissivity true; //constant emissivity on surfaces.
28 }
29
30 absorptionEmissionModel none;
31
32 scatterModel none;
33
34 sootModel none;
35
36 // *****

```

Figura 2.14. Propiedades de radiación de la región aire.
(Fuente: Propia)

```

1 /*----- C++ -----*/
2 |=====|
3 | \ \ / / | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4 | \ \ / / | O p e r a t i o n | Version: dev
5 | \ \ / / | A n d | Web: www.OpenFOAM.org
6 | \ \ / / | M a n i p u l a t i o n |
7 /*-----*/
8 FoamFile
9 {
10     version      2.0;
11     format        ascii;
12     class         dictionary;
13     object        turbulenceProperties;
14 }
15 // ***** //
16
17 simulationType laminar;
18
19 // ***** //

```

Figura 2.15. Propiedades de turbulencia de la región aire.
(Fuente: Propia)

Para el modelo de radiación *viewFactor* es necesario crear una librería adicional en la región aire que se denomina *viewFactorDict*, los valores especificados en esta librería se seleccionaron de acuerdo a las recomendaciones de la bibliografía consultada y se detallan en la Figura 2.16.

```

1 /*----- C++ -----*/
2 |=====|
3 | \ \ / / | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4 | \ \ / / | O p e r a t i o n | Version: 2.4.0
5 | \ \ / / | A n d | Web: www.OpenFOAM.org
6 | \ \ / / | M a n i p u l a t i o n |
7 /*-----*/
8 FoamFile
9 {
10     version      2.0;
11     format        ascii;
12     class         dictionary;
13     object        viewFactorsDict;
14 }
15 // ***** //
16
17 writeViewFactorMatrix      true;
18 //- Write agglomeration as a volScalarField with calculated boundary values
19 writeFacesAgglomeration    true;
20 //writePatchViewFactors    false; //- currently unused in OF
21
22 //- Debug option
23 debug                      1;
24 //- Dump connectivity rays
25 dumpRays                   false;
26
27 ".*"
28 {
29     nFacesInCoarsestLevel 1000; // increase to get more radiation patches (coarse faces)
30     featureAngle          30; // 0: one radiation patch (coarse face) over one cell face
31 }
32
33 //- Maximum length for dynamicList. See /applications/utilities/preProcessing/viewFactorsGen/shootRays.H
34 maxDynListLength          1000000000;
35
36 // ***** //

```

Figura 2.16. Comandos en la librería *viewFactorDict* de la región aire.
(Fuente: Propia)

Finalmente, es necesario también especificar también la gravedad en una librería denominada *g*, en donde se detalla la magnitud y la dirección de la fuerza gravitatoria, tal como se muestra en la Figura 2.17. Y se debe especificar qué regiones corresponden a fluido y a sólido en *regionProperties* como se indica en la Figura 2.18.

```

1 /*-----*- C++ -*-----*/
2 |=====|
3 | \ \ / / | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4 | \ \ / / | O p e r a t i o n | Version: dev
5 | \ \ / / | A n d | Web: www.OpenFOAM.org
6 | \ \ / / | M a n i p u l a t i o n |
7 /*-----*/
8 FoamFile
9 {
10  version      2.0;
11  format       ascii;
12  class        uniformDimensionedVectorField;
13  object       g;
14 }
15 // ***** //
16
17 dimensions    [0 1 -2 0 0 0 0];
18 value         (0 -9.81 0);
19
20 // ***** //

```

Figura 2.17. Librería *g*.
(Fuente: Propia)

```

1 /*-----*- C++ -*-----*/
2 |=====|
3 | \ \ / / | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4 | \ \ / / | O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
5 | \ \ / / | A n d | Version: dev
6 | \ \ / / | M a n i p u l a t i o n |
7 /*-----*/
8 FoamFile
9 {
10  version      2.0;
11  format       ascii;
12  class        dictionary;
13  location     "constant";
14  object       regionProperties;
15 }
16 // ***** //
17
18 regions
19 (
20  fluid        (air)
21  solid        (glass LeftInsulation RightInsulation)
22 );
23
24 // ***** //

```

Figura 2.18. Especificación de regiones en *regionProperties*.
(Fuente: Propia)

2.4.6. Control, Solution & Schemes Dictionaries.

La elección de esquemas numéricos y algoritmos adecuados para el problema tiene relación directa con la convergencia de la solución y el tiempo requerido para la simulación. No hay un método que especifique cómo escoger los esquemas adecuados para un caso en particular, sino que, ciertos esquemas y algoritmos pueden ser más eficientes en unos problemas que en otros. Para la elección de los esquemas y algoritmos

del presente caso de estudio, se emplea aquellos recomendados por la bibliografía consultada [31] [32] [33] [34] [35] y aquellos indicados en los casos de ejemplo de transferencia de calor multiregión que ofrece OpenFOAM.

En la estructura del caso (Figura 2.6), se puede observar que cada región debe poseer sus propios archivos *fvSchemes* y *fvSolution*, los esquemas empleados se muestran a continuación en la Figura 2.19 y Figura 2.20 para la región aire y Figura 2.21 y Figura 2.22 para las regiones de sólido (vidrio y material aislante).

```

1 /*-----* C++ *-----*/
2
3 =====
4 \ \ \ \ \ Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
5 \ \ \ \ \ O peration | Website: https://openfoam.org
6 \ \ \ \ \ A nd | Version: dev
7 \ \ \ \ \ M anipulation |
8 /*-----*/
9 FoamFile
10 {
11   version      2.0;
12   format       ascii;
13   class        dictionary;
14   location     "system";
15   object       fvSchemes;
16 }
17 // *****
18 ddtSchemes
19 {
20   default      steadyState;
21 }
22
23 gradSchemes
24 {
25   default      Gauss linear;
26   grad(U)      cellLimited Gauss linear 1;
27 }
28
29 divSchemes
30 {
31   default      none;
32   div(phi,U)   bounded Gauss upwind;
33   div(phi,h)   bounded Gauss upwind;
34   div(phi,e)   bounded Gauss upwind;
35   div(phi,K)   bounded Gauss upwind;
36   div(phi,v,p) Gauss upwind;
37   div(phi,k)   bounded Gauss upwind;
38   div(phi,epsilon) bounded Gauss upwind;
39   div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U)))))) Gauss linear;
40 }
41
42 laplacianSchemes
43 {
44   default      Gauss linear limited corrected 0.33;
45 }
46
47 interpolationSchemes
48 {
49   default      linear;
50 }
51
52 snGradSchemes
53 {
54   default      limited corrected 0.33;
55 }
56
57
58 // *****

```

Figura 2.19. fvSchemes para la región aire.
(Fuente: Propia)

```

1 /*----- C++ -----*\
2 =====
3 // \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4 // \ / O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
5 // \ / A n d | Version: dev
6 // \ / M a n i p u l a t i o n |
7 /*-----*\
8 FoamFile
9 {
10     version      2.0;
11     format       ascii;
12     class        dictionary;
13     location     "system/air";
14     object       fvSolution;
15 }
16 // *****
17
18 solvers
19 {
20     rho
21     {
22         solver      PCG;
23         preconditioner DIC;
24         tolerance   1e-7;
25         relTol      0.1;
26     }
27     "p_rgh.*"
28     {
29         solver      GAMG;
30         tolerance   1e-7;
31         relTol      0.01;
32         smoother    DIC;
33         maxIter     100;
34     }
35     "(U|e).*"
36     {
37         solver      PBICGStab;
38         preconditioner DILU;
39         tolerance   1e-6;
40         relTol      0.1;
41     }
42 }
43
44 h
45 {
46     solver      GAMG;
47     smoother    GaussSeidel;
48     nCellsInCoarsestLevel 10;
49     agglomerator faceAreaPair;
50     mergeLevels 3;
51     cacheAgglomeration true;
52     tolerance   1e-6;
53     relTol      0.1;
54     maxIter     50;
55 }
56
57 hFinal
58 {
59     $h;
60     relTol 0;
61 }
62
63 PIMPLE
64 {
65     nNonOrthogonalCorrectors 0;
66     residualcontrol
67     {
68         rho 1e-4;
69         U 1e-4;
70         G 1e-4;
71         h 1e-4;
72     }
73 }
74
75 relaxationFactors
76 {
77     fields
78     {
79         rho 0.5;
80         p_rgh 0.3;
81     }
82     equations
83     {
84         U 0.20;
85         h 0.20;
86         qr 0.7;
87     }
88 }
89
90 *****
91

```

Figura 2.20. fvSolution para la región aire.
(Fuente: Propia)

```

FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  object       fvSchemes;
}
// *****

ddtSchemes
{
  default      steadyState;
}
gradSchemes
{
  default      Gauss linear;
}
divSchemes
{
  default      none;
}
laplacianSchemes
{
  default      Gauss linear uncorrected;
}
interpolationSchemes
{
  default      linear;
}
snGradSchemes
{
  default      uncorrected;
}

```

Figura 2.21. fvSchemes para las regiones sólidas.
(Fuente: Propia)

```

8 FoamFile
9 {
10  version      2.0;
11  format       ascii;
12  class        dictionary;
13  object       fvSolution;
14 }
15 // *****
16 solvers
17 {
18  "(h|e)"
19  {
20    solver          PCG;
21    preconditioner  DIC;
22    tolerance       1e-06;
23    relTol          0.1;
24  }
25
26  "(h|e)Final"
27  {
28    $h;
29    relTol          0;
30  }
31 }
32 PIMPLE
33 {
34   nNonOrthogonalCorrectors 0;
35 }
36
37 relaxationFactors
38 {
39   equations
40   {
41     "." 1;
42   }
43 }

```

Figura 2.22. fvSolution para las regiones sólidas.
(Fuente: Propia)

2.4.7. Simulación del caso.

Una vez que se ha definido todos los parámetros requeridos, se procede a simular el caso. Para ello se ha desarrollado dos scripts que permiten introducir los comandos necesarios ahorrando así gran cantidad de tiempo. Estos scripts tienen el nombre de *Allclean* y *Allrun*, los cuales se muestran en la Figura 2.23 y Figura 2.24 respectivamente. *Allclean* ejecuta una limpieza del caso, es decir que elimina todos los directorios de los cálculos realizados por el programa, es útil cuando se obtiene un error durante la ejecución del caso y es necesario corregir algún parámetro para volver a correr la simulación. También es útil cuando se desea cambiar las condiciones de borde o condiciones iniciales y correr un nuevo caso en base a otro previamente resuelto.

Allrun introduce los comandos necesarios para correr el caso, los cuales se explican a continuación:

Los comandos “blockMesh” y “topoSet” crean la geometría de acuerdo a la configuración especificada.

La orden “SplitMeshRegions” separa los grupos de celdas especificados para cada región de sólidos y fluidos para que puedan ser estudiados de acuerdo a las ecuaciones que definen el comportamiento de cada región.

Los comandos “faceAgglomerate” y “viewFactorsGen” crean las matrices de factor de forma para el modelo *viewFactor* que permite incluir la transferencia de calor por radiación entre las superficies internas.

Finalmente la orden “\$(get Application)” busca el *solver* especificado para la simulación del problema que en este caso es mediante “*chtMultiregionFoam*”. Adicionalmente, en los casos multi-Región, se puede emplear el comando “-touchAll” para crear distintos archivos con la extensión .FOAM para cada región, esto es útil en el post procesamiento ya que permite visualizar cada región por separado.

```
1 #!/bin/sh
2
3 cd ${0%/*} || exit 1
4
5 . $WM_PROJECT_DIR/bin/tools/CleanFunctions
6
7 cleanCase
8
9 rm -rf constant/*/polyMesh 0/cellToRegion 0/*/cellToRegion
```

Figura 2.23. Comandos del archivo Allclean.

(Fuente: Propia)

```

1 #!/bin/sh
2
3 cd ${0%/*} || exit 1
4
5 . $WM_PROJECT_DIR/bin/tools/RunFunctions
6
7 rm -rf constant/polyMesh/sets
8
9 runApplication blockMesh
10 runApplication topoSet
11 runApplication splitMeshRegions -cellZones -overwrite
12 runApplication faceAgglomerate -region air
13 runApplication viewFactorsGen -region air
14 runApplication $(getApplication)
15 paraFoam -touchAll

```

Figura 2.24. Comandos del archivo Allrun.
(Fuente: Propia)

2.4.8. Post Procesamiento.

Para visualización de los resultados y análisis de información se emplea ParaView. ParaView es una herramienta multiplataforma de código abierto que permite transformar extensos conjuntos de datos en forma de texto a imágenes. Además, para el análisis de resultados es posible crear y aplicar una gran variedad de filtros para extraer la información que sea relevante para el estudio. La guía de usuario de ParaView [36] es una útil herramienta para aquellos usuarios que no están familiarizados con el software.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presenta el estudio del mallado realizado para determinar una cantidad de elementos adecuada para el caso de estudio, que otorgue una precisión adecuada en los resultados y optimice el uso de los recursos computacionales. Posteriormente se presenta los resultados obtenidos mediante las simulaciones del comportamiento térmico del receptor trapezoidal en OpenFOAM y se comprara las temperaturas de las superficies con los resultados obtenidos por otros autores que han llevado a cabo similates simulaciones en Ansys FLUENT [3] [37] y mediante modelos numéricos [17]. Además se expone las líneas de flujo del aire dentro de la cavidad del receptor y se compara los tiempos empleados de la simulación en OpenFOAM con el tiempo requerido de un estudio similar en Ansys FLUENT llevado a cabo por Jaramillo D. [3].

3.1. Estudio del mallado.

Un mallado adecuado juega un rol importante en la precisión y estabilidad de la solución numérica, mientras que una malla de baja calidad puede causar resultados erróneos y afectar los cálculos negativamente. Por esta razón, realizar un estudio del mallado y comprobar la calidad de malla son pasos esenciales en cualquier estudio de CFD [38]. Para la simulación del comportamiento térmico del receptor de geometría trapezoidal se realizó cuatro mallados de 2800, 6060, 15750 y 25000 elementos hexaédricos, que corresponden a un tamaño de cada elemento aproximado de 5mm., 2mm., 1,5mm y 1mm. de arista respectivamente. Los mallados contienen las regiones de: cubierta de vidrio, aire interno y material aislante a los costados.

3.1.1. Calidad del mallado.

La calidad del mallado puede conocerse en base a tres parámetros importantes que son:

Razón de aspecto de celda (cell aspect ratio): Es la razón entre el lado más largo y el más corto de una celda. El valor de la razón de aspecto en una malla ideal es 1. [38]

Falta de simetría (skewness): Es la diferencia entre la forma de una celda y la forma de una celda equilátera de volumen equivalente. Las celdas altamente asimétricas decrecen la calidad de la malla y pueden desestabilizar la solución. Para celdas hexaédricas este valor no debe exceder 0,85. [38]

No-ortogonalidad (Non-orthogonality): La ortogonalidad de una celda se caracteriza por el ángulo que forma la intersección de sus aristas. Si sus aristas forman ángulos rectos se dice que es ortogonal y una malla ideal está formada de celdas ortogonales. Sin embargo

esta condición no siempre se cumple dependiendo de la geometría en cada caso de estudio. [38] El valor de ortogonalidad adecuado puede variar para los diferentes softwares. En OpenFOAM se recomienda emplear mallas de no-ortogonalidad menor a 65 [7].

Para determinar si las mallas obtenidas son de calidad aceptable, en la Tabla 3.1 se compara los parámetros que las definen con los valores ideales. Ya que la geometría del caso de estudio no posee formas complejas, resulta relativamente sencillo manipular el tamaño de los elementos para que tengan una forma simétrica y así generar una malla de calidad adecuada.

Tabla 3.1. Parámetros de calidad de malla.

N° de elementos	Parámetro	Mallado realizado		Valores recomendados	Evaluación
2800	Razón de aspecto	Máximo: 3,03174		Ideal = 1	Aceptable
	Falta de Simetría	Máximo: 1,06288		<0,85	No recomendable
	No-Ortogonalidad	Máximo: 30,008	Promedio: 24,065	<65	Aceptable
6060	Razón de aspecto	Máximo: 2,22		Ideal = 1	Aceptable
	Falta de Simetría	Máximo: 0,588333		<0,85	Aceptable
	No-Ortogonalidad	Máximo: 30,008	Promedio: 24,065	<65	Aceptable
15750	Razón de aspecto	Máximo: 1.93329		Ideal = 1	Aceptable
	Falta de Simetría	Máximo: 0,58713		<0,85	Aceptable
	No-Ortogonalidad	Máximo: 30,008	Promedio: 24,065	<65	Aceptable
25000	Razón de aspecto	Máximo: 1,79887		Ideal = 1	Aceptable
	Falta de Simetría	Máximo: 0,653322		<0,85	Aceptable
	No-Ortogonalidad	Máximo: 30,008	Promedio: 24,065	<65	Aceptable

(Fuente: Propia)

3.1.2. Convergencia y tiempo de simulación.

En la Figura 3.1 se observa cómo el tiempo de simulación aumenta considerablemente al incrementar el número de elementos del mallado, alcanzando los 1200 segundos (20 minutos) de simulación para el caso de 25000 elementos, mientras que, para el caso de 6060 elementos que toma únicamente 141 segundos (2,3 minutos). La Figura 3.2 muestra el número de iteraciones necesarias para alcanzar la convergencia de la simulación en

cada caso. Se observa cómo ambas curvas poseen similar tendencia, mientras mayor es el número de elementos, el programa requiere más iteraciones para alcanzar la solución y por lo tanto toma mayor tiempo en hacerlo.

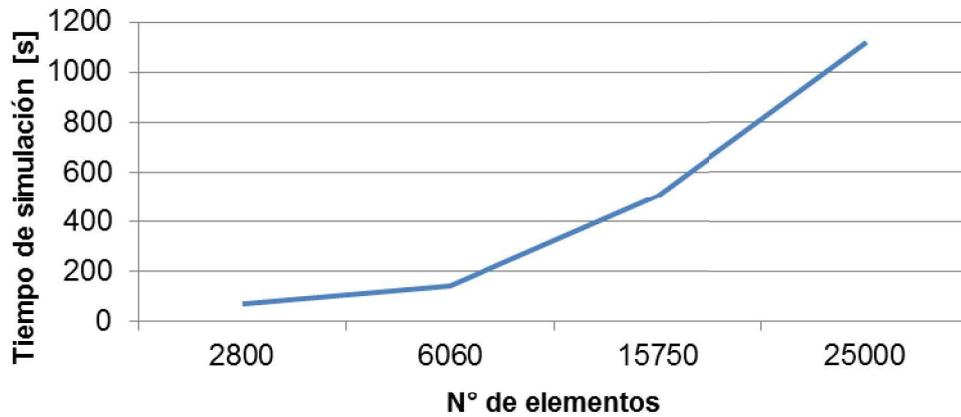


Figura 3.1. Tiempo de simulación vs. N° de elementos del mallado.
(Fuente: Propia)

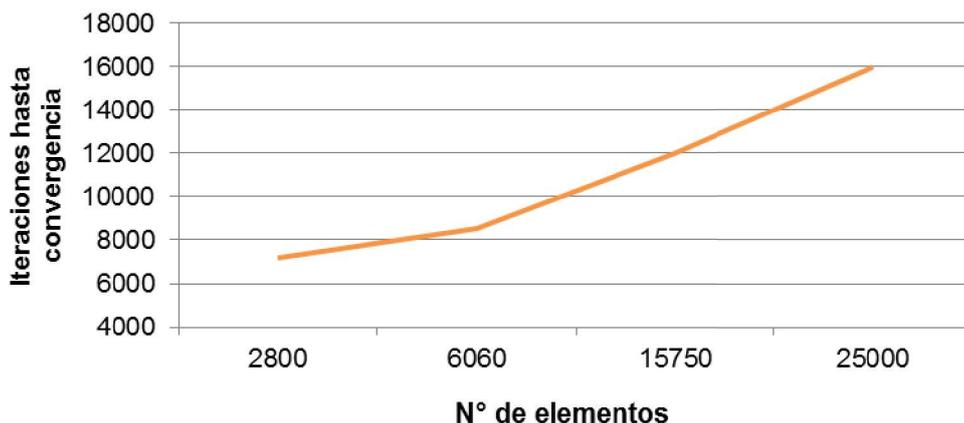


Figura 3.2. N° de iteraciones en la solución vs. N° de elementos del mallado.
(Fuente: Propia)

Por último, se hace una comparación entre la convergencia de las variables del problema para los diferentes casos de mallado, a manera de ejemplo se muestra en la Figura 3.3 la convergencia de la máxima temperatura de la superficie interna de la cubierta de vidrio para las 4 mallas analizadas en relación al número de iteraciones requeridas. De esta gráfica se puede concluir que: el uso de las mallas de mayor número de elementos emplean relativamente una gran cantidad de tiempo computacional para alcanzar la convergencia, mientras la malla de 6060 elementos permite al sistema llegar a una solución suficientemente precisa y aceptable en un tiempo muy corto de simulación. Por lo tanto, la malla de 6060 elementos es seleccionada como óptima para el caso de estudio. El mallado seleccionado puede observarse en la Figura 3.4

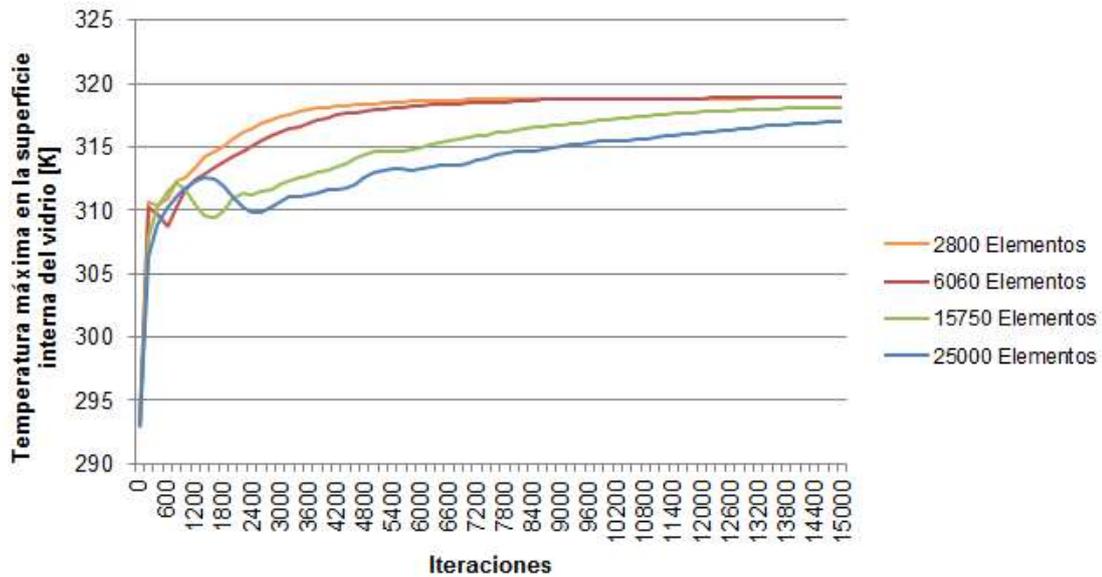


Figura 3.3. Temperatura del vidrio vs. N° de iteraciones para cada caso de mallado. (Fuente: Propia)

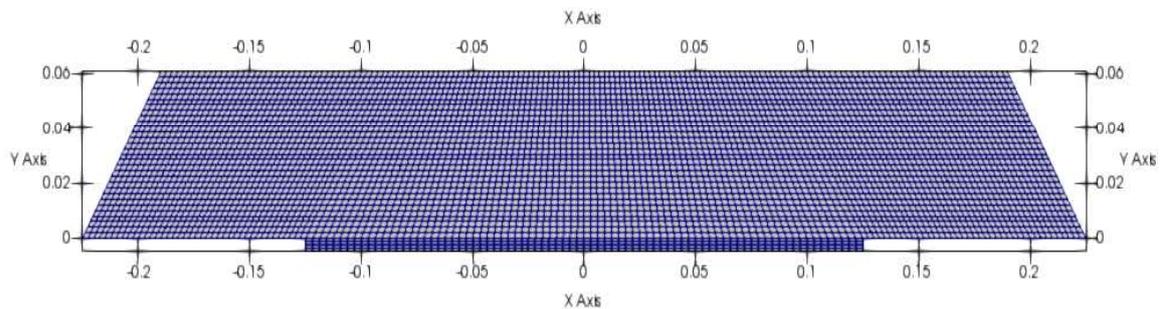


Figura 3.4. Mallado del caso (Fuente: Propia)

El comportamiento de los residuos de las diferentes variables es un indicador de la convergencia de la solución. Como ya se ha mencionado, la convergencia depende de la calidad del mallado, del número de elementos en la malla y además de los algoritmos de solución configurados para las diferentes variables. Puesto que el caso de estudio se encuentra en estado estable, la convergencia del problema se refiere a la estabilización de la solución numérica mediante los procesos iterativos que realiza el software y que permiten encontrar la solución a las diferentes ecuaciones. Los residuos son el error del resultado en una iteración con respecto a la solución exacta. Cuando no se conoce el valor exacto de la solución, se busca encontrar un valor aproximado con el residuo más bajo.

El monitoreo de los residuos durante las simulaciones resulta útil para advertir si el sistema llegará a la convergencia. Si se observa que los residuos toman valores cada vez

más pequeños, es un comportamiento favorable para la simulación, caso contrario puede que el sistema no alcance una solución debido a diversos factores como: una malla inadecuada, condiciones de borde incorrectamente configuradas o algoritmos de solución inoportunos para el caso de estudio. En la Figura 3.5 se expone los residuos de la velocidad “Ux”, “Uy” y presión “p” en la región aire para la malla seleccionada, se puede apreciar una tendencia favorable en el comportamiento estos residuos.

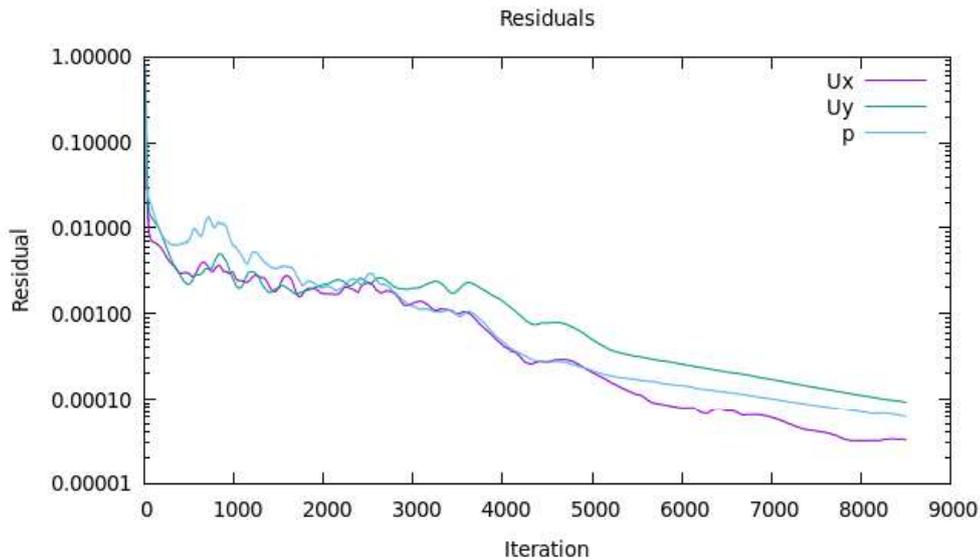


Figura 3.5. Residuos en la región aire para la malla de 6060 elementos.
(Fuente: Propia)

3.2. Distribución de temperaturas en el receptor.

Los datos de mayor relevancia en el estudio del comportamiento del receptor trapezoidal Fresnel son las temperaturas en las diferentes superficies del mismo. Ya que en base a ellas es posible calcular los flujos de calor y por lo tanto el calor útil y la eficiencia térmica del sistema. En la

Figura 3.6 se aprecia los contornos isotérmicos obtenidos en la simulación. Se observa que la temperatura es más alta en la parte superior del receptor en donde se encuentra la placa absorbedora, y disminuye conforme se aleja de esta superficie hacia la cubierta vidrio en la parte inferior. Se observa también el aumento en la temperatura del material aislante a ambos costados de la cavidad receptora. La curvatura de los contornos isotérmicos es similar a los resultados presentados por otros autores quienes emplean geometrías y condiciones iniciales similares para el estudio de receptores lineales Fresnel en ANSYS Fluent. [37] [6] [22]. Adicionalmente para comparación, la Figura 3.7 presenta la distribución de temperatura en un colector Fresnel obtenido por Soroush D. et al. [37] a pesar que Soroush realiza un estudio del receptor empleando una superficie absorbedora

con perfil de contorno de tuberías en lugar de una placa plana, se observa que los contornos isotérmicos se comportan de igual manera.

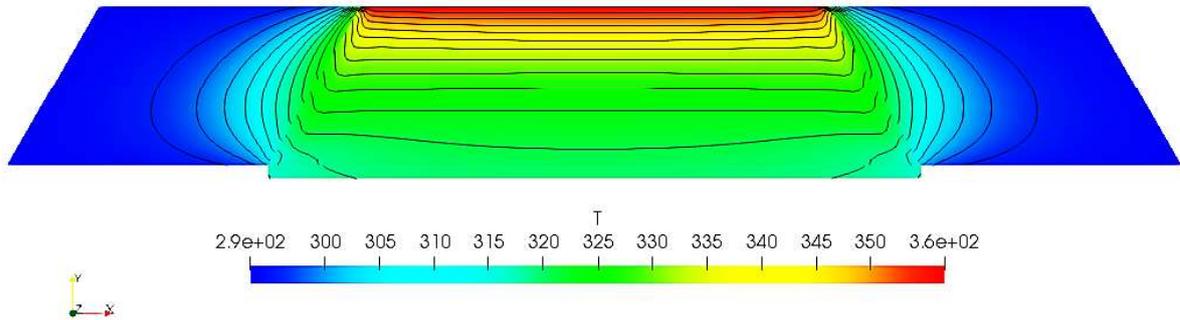


Figura 3.6. Contornos isotérmicos en el receptor Fresnel obtenidos mediante OpenFOAM.
(Fuente: Propia)

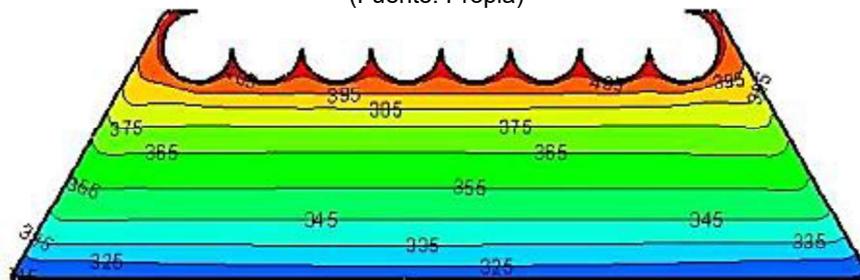


Figura 3.7. Contornos isotérmicos en un receptor Fresnel presentado por Soroush Dabiri en Ansys Fluent.
(Fuente: [37])

Además, los resultados de las simulaciones en OpenFOAM se comparan con los resultados del modelo simplificado expuesto anteriormente y que ha sido resuelto por Flores E. empleando un algoritmo de optimización en Python [17]. Una de las principales diferencias entre el modelo simplificado y las simulaciones mediante software CFD es que el modelo simplificado considera que las temperaturas son constantes a lo largo de las superficies, mientras en los resultados de CFD se puede apreciar cómo la temperatura varía mientras se aleja más de la superficie absorbadora formando los contornos isotérmicos que se observa en la

Figura 3.6, por esta razón, para poder comparar los resultados de las simulaciones con el modelo simplificado, en la Tabla 3.2 se emplea la temperatura media que es fácilmente calculada en el postprocesamiento empleando los diversos filtros que ofrece ParaView. Se compara también estos datos con las temperaturas obtenidas en simulaciones de un modelo similar realizadas por Jaramillo [3] en Ansys FLUENT. Los estudios llevados a cabo en OpenFOAM, el modelo simplificado en Python desarrollado por Flores E. [17] y las simulaciones en Ansys Fluent de Jaramillo D. [3] se desarrollaron con iguales geometrías, iguales condiciones iniciales y condiciones de borde para el sistema. Siendo la temperatura ambiente igual a 293 [K] y teniendo un coeficiente de convección externa

con el aire ambiente constante y uniforme en todas las superficies externas y con un valor de 9,1051 [W/m²K].

Tabla 3.2. Temperaturas [K] en las superficies del receptor

Superficie	OpenFOAM	Modelo Python**	%Diferencia	Ansys FLUENT*	%Diferencia
Superficie Absorbedora	356,782	356,782	0,00%	355,520	0,35%
Reflector secundario izquierdo	322,161	338,082	4,71%	335,710	4,04%
Reflector secundario derecho	322,161	338,083	4,71%	335,710	4,04%
Superficie del vidrio, interna	317,608	320,698	0,96%	324,060	1,99%
Superficie del vidrio, externa	316,622	319,365	0,86%	322,900	1,94%
Temperatura media del aire	329,85	337,364	2,23%	336,840	2,08%

(Fuente: [3]*, [17]**)

Se evidencia que la mayor diferencia de los resultados obtenidos con OpenFOAM y el modelo simplificado resuelto en Python está es en los reflectores secundarios, teniendo una diferencia de 4,71%. Esta diferencia se debe que el modelo simplificado asume una temperatura uniforme a lo largo de toda la superficie de los reflectores secundarios. Pero las simulaciones muestran un comportamiento más “real” del receptor, en el cual se tiene una notable variación de esta temperatura conforme se aleja de la superficie absorbadora. Una variación de interés en el presente estudio es la inclusión de las regiones de material aislante y la transferencia de calor por conducción a través de sus paredes.

3.3. Comportamiento del aire dentro de la cavidad del receptor.

En el modelo simplificado se asume que la velocidad del aire dentro de la cavidad receptora es muy baja, casi nula. Sin embargo, la diferencia de temperaturas genera movimiento del aire y la convección natural aparece en el receptor. Los resultados de las simulaciones en OpenFOAM confirman esta suposición. En la Figura 3.8 se observa las líneas de flujo que se generan por los fenómenos de flotabilidad en el aire. La geometría del receptor es simétrica con respecto al eje vertical del receptor y por tanto también el movimiento del aire. Las velocidades son muy bajas y alcanzan 1.6e-2 [m/s] al estar en contacto con las superficies de los reflectores secundarios. La Figura 3.9 clarifica mediante vectores las direcciones y magnitudes de la velocidad del aire en el receptor. Esto facilita el entendimiento del comportamiento del aire en la cavidad receptora. Un comportamiento muy similar del aire se evidencia en los estudios realizados por Jaramillo D. [3]. En la Figura 3.10 se presentan estos resultados para comparación.

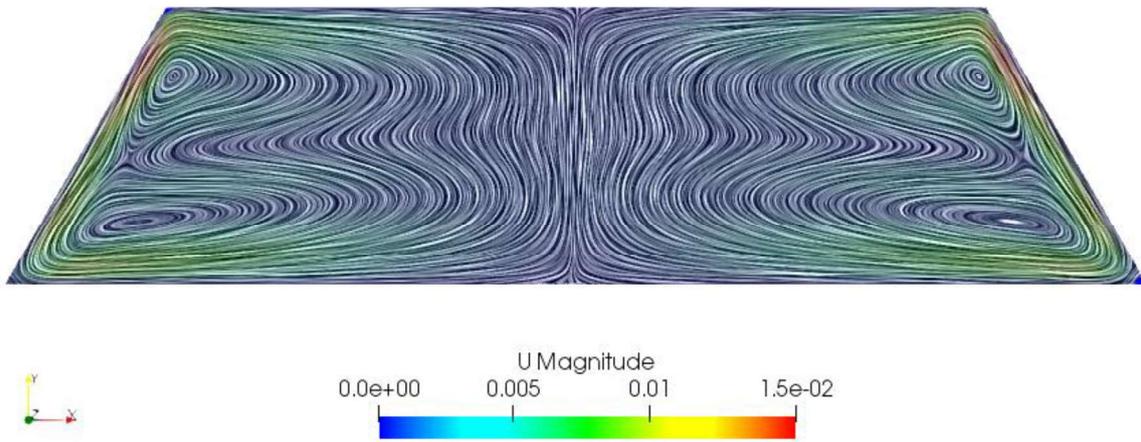


Figura 3.8. Líneas de flujo del aire dentro de la cavidad receptora.
(Fuente: Propia)

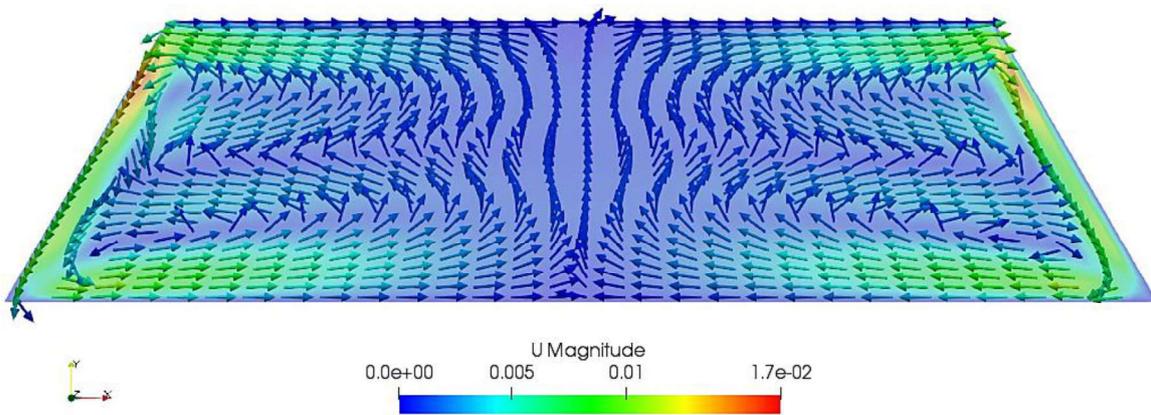


Figura 3.9. Distribución de velocidades del aire dentro de la cavidad receptora.
(Fuente: Propia)

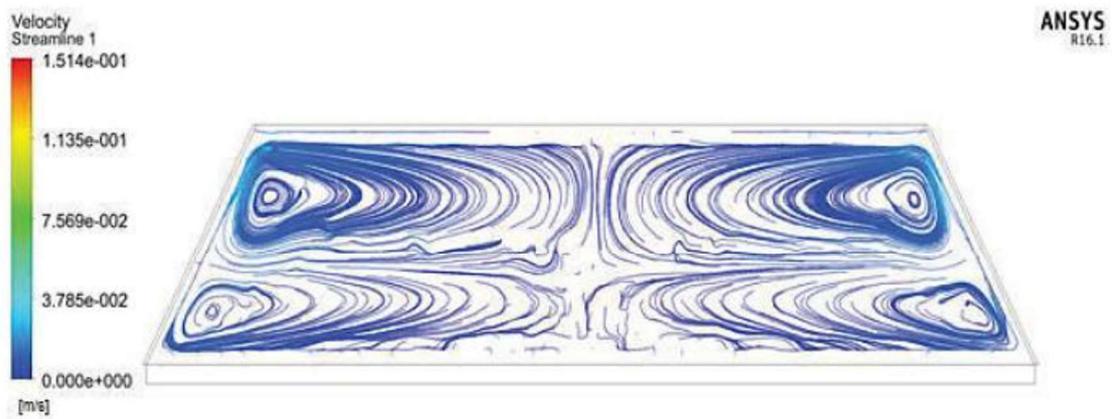


Figura 3.10. Líneas de flujo del aire en el receptor presentado por Jaramillo D.
(Fuente: [3])

3.4. Tiempo de cálculo para la simulación.

La simulación del caso presentado en este trabajo se llevó a cabo en OpenFOAM-dev y sistema operativo Ubuntu versión 18.04.3 LTS. Además, las características principales del computador son procesador Intel Core i5 CPU M460 @2.53 GHz de 4 núcleos, y 4GB de memoria RAM. Con estos recursos, el tiempo de procesamiento requerido para la simulación del comportamiento térmico del receptor es de 141 segundos (2,35 minutos) empleando un solo núcleo (es decir que no se empleó paralelización). Este tiempo de cálculo se puede contrastar con la simulación de Jaramillo D. [3] en Ansys Fluent, donde 9 horas fueron necesarias para obtener soluciones apropiadas. Esta importante reducción del tiempo en la simulación ofrece nuevas oportunidades para futuros estudios del comportamiento del receptor con mayor detalle.

A pesar que la curva de aprendizaje de OpenFOAM es considerablemente empinada, y no existe abundante documentación disponible sobre casos de transferencia de calor conjugada o tutoriales actualizados, la versatilidad del programa presenta varias ventajas para un usuario familiarizado con su manejo, ya que se reduce en gran medida el tiempo en la simulación del caso de estudio, permitiendo simular diversos casos con distintas condiciones iniciales en un muy corto tiempo.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se desarrolló un caso para la simulación del comportamiento térmico de un receptor de geometría trapezoidal de un colector lineal Fresnel, empleando un módulo de transferencia de calor conjugada entre las distintas regiones de sólidos y fluidos que permite incluir en el modelo transferencia de calor por conducción, convección natural, convección forzada, y radiación. Y se comparó los resultados del modelo CFD con un modelo analítico simplificado. De esta forma se logró conocer las temperaturas en cada una de las superficies del receptor y los flujos de calor en las mismas. Obteniendo las siguientes conclusiones:

Se evidencia que el comportamiento térmico del receptor depende en gran medida de la cantidad de energía incidente en el receptor. Este valor de entrada proviene de los modelamientos ópticos.

Las simulaciones llevadas a cabo mediante CFD en OpenFOAM demuestran que el modelo simplificado posee una exactitud aceptable. La diferencia más significativa se obtuvo en la temperatura promedio de las superficies de los reflectores secundarios. Mientras que, el error más bajo se obtuvo en la superficie del vidrio. Esta diferencia en los resultados se debe a que el modelo simplificado asume que los reflectores secundarios poseen una temperatura uniforme, mientras en las simulaciones se evidencia que esta temperatura disminuye conforme se aleja de la superficie de la placa absorbidora.

Las simulaciones y el modelo simplificado demuestran que la mayor transferencia de calor entre las superficies del receptor se deba a los flujos de calor por radiación de onda larga.

Las ecuaciones fundamentales que gobiernan los fenómenos de transferencia de calor dentro del receptor y el uso de simulaciones mediante OpenFOAM permiten estudiar con precisión aceptable el comportamiento térmico en estado estable del receptor lineal Fresnel presentado en este trabajo.

En base a los estudios realizados, se plantea distintas opciones de trabajos futuros cómo: simular el comportamiento del receptor considerando el eje longitudinal del mismo con lo que se podrá conocer también el comportamiento térmico del HTD en su recorrido a lo largo de las tuberías que lo transportan, esto demandará una gran cantidad de recursos computacionales por lo que se recomienda paralelizar la simulación. Estudiar el comportamiento del receptor empleando distintos fluidos de transferencia de calor y distintos materiales aislantes. Y, construir un banco de pruebas que permita corroborar experimentalmente los estudios analíticos y computacionales realizados.

Referencias Bibliográficas

- [1] H. Ritchie y M. Roser, «Energy Production & Changing Energy Sources,» 2018.
- [2] M. Ghodbane, B. Boumeddane y N. Said, «A linear Fresnel reflector as a solar system for heating water: theoretical and experimental study,» *Case studies in thermal Engineering*, 2016.
- [3] F. Ordóñez y D. Jaramillo, «Thermal performance model and parametric studies of a trapezoidal Fresnel solar receiver,» *American Institute of Physics*, 2017.
- [4] G. Morin, . J. Dersh, W. Platzer, M. Eck y A. Haberle, «Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector power plants,» *Solar Energy*, nº 86, pp. 1-12, 2011.
- [5] M. A. Moghimi, K. J. Craig y J. P. Meyer, «Optimization of a trapezoidal cavity absorber for the Linear Fresnel Reflector,» *Solar Energy*, nº 119, pp. 343-361, 2015.
- [6] S. S. Sahoo, S. Singh y R. Banerjee, «Analysis of heat losses from a trapezoidal cavity used for Linear Fresnel Reflector system,» *Solar Energy*, nº 86, pp. 1313-1322, 2012.
- [7] C. Greenshields, OpenFOAM User Guide, OpenFOAM Foundation Ltd., 2018.
- [8] IRENA, «Rethinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation,» International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2017.
- [9] B. Dudley y S. Dale, «BP Statistical Review of World Energy June 2019,» BP Statistical Review of World Energy, London, 2019.
- [10] J. Winters, «By the numbers: Renewables go from many to two,» *Mechanical Engineering Magazine*, pp. 28-29, Agosto 2018.
- [11] M. Castro, «Hacia una Matriz Energética Diversificada en Ecuador,» CEDA, Quito, 2011.
- [12] J. Peralta, «Análisis estadístico de la información meteorológica para la explotación de energías renovables en el Ecuador,» Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables INER, Quito, 2013.
- [13] D. Vaca-Revelo y F. Ordóñez, «Mapa Solar del Ecuador,» EPN, Quito, 2019.
- [14] IRENA, «Renewable Energy Statistics 2019,» The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019.
- [15] E. E. P. Galápagos, «Isabela Renovable,» [En línea]. Available: <http://www.elecgapagos.com.ec/newsite/isabela-renovable/> .
- [16] M. Romero, Energía Solar Termoeléctrica, Almería: Tabernas.
- [17] E. Flores y F. Ordóñez, Desarrollo de un modelo óptico y térmico de un colector solar

lineal fresnel con receptor trapezoidal, Quito: EPN, 2019.

- [18] G. Zhu, T. Wendelin, M. J. Wagner y C. Kutscher, «History, current state, and future of linear Fresnel concentrating solar collectors.,» *Solar Energy*, n° 103, pp. 639-652, 2014.
- [19] F. Lara, N. Velázquez, D. Saucedo y A. Acuña, «Metodología para el Dimensionamiento y Optimización de un Concentrador Lineal Fresnel,» *Inf. Tecnológica*, vol. 24, pp. 115-128, 2013.
- [20] J. Pye, G. Morrison y M. Behnia, «Convection inside the cavity receiver of the CLFR concentrating solar power system,» de *7th Natural Convection Workshop*, Sydney, Australia, 2003.
- [21] M. Lin, K. Sumathy, Y. J. Dai, R. Z. Wang y Y. Chen, «Experimental and theoretical analysis on a linear Fresnel reflector solar collector prototype with V-shaped cavity receiver,» *Applied Thermal Engineering*, n° 51, pp. 963-972, 2013.
- [22] R. Manikumar, A. Valan Arasu y S. Jayaraj, «Numerical Simulation of a Trapezoidal Cavity Absorber in the Linear Fresnel Reflector Solar Concentrator System.,» *International Journal of Green Energy*, vol. 11, n° 4, pp. 344-363, 2014.
- [23] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman y A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Séptima ed., Hoboken: Jhon Wiley & Sons, 2007.
- [24] R. Abbas, J. Muñoz y J. Martínez-Val, «Steady-state thermal analysis of an innovative receiver for linear Fresnel reflectors,» *Applied Energy*, n° 92, pp. 503-515, 2012.
- [25] E. Bellos, E. Mathioulakis, C. Tzivanidis, V. Belessiotis y K. A. Antonopoulos, «Experimental and numerical investigation of a linear Fresnel solar collector with flat plate receiver.,» *Energy Conversion and Management*, n° 130, pp. 44-59, 2016.
- [26] J. Muñoz, J. M. Martínez-Val y A. Ramos, «Thermal regimes in solar-thermal linear collectors,» *Solar Energy*, n° 85, pp. 857-870, 2011.
- [27] Y. A. Cengel y A. J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa, Fundamentos y Aplicaciones*, Cuarta ed., McGraw Hill, 2011.
- [28] G. Chen, Q. Xiong, P. J. Morris, E. G. Paterson, A. Sergeev y Y.-C. Wang, «OpenFOAM for Computational Fluid Dynamics,» *Notices of the AMS*, vol. 61, n° 4, 2014.
- [29] MAlletto, «chtMultiRegionFoam,» Open Foam Wiki, 23 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://openfoamwiki.net/index.php/ChtMultiRegionFoam>. [Último acceso: 11 2019].
- [30] F. Moukalled, L. Manhani y M. Darwish, *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics, An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab*, Beirut: Springer, 2016.
- [31] M. Hermosilla, P. J. Gamez y R. Castilla, *Study of heat and mass transfer*

applications in the field of engineering by using OpenFOAM, Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya, 2016.

- [32] A. Vdovin, «Radiation heat transfer in OpenFOAM,» Chalmers University of Technology, Göteborg, 2009.
- [33] A. Singhal, «Tutorial to set up a case for chtMultiRegionFoam in OpenFOAM 2.0.0,» University of Luxembourg, Luxembourg, 2014.
- [34] M. Van Der Tempel, «a chtMultiRegionSimpleFoam tutorial,» Chalmers University of Technology, Chalmers, 2012.
- [35] S. A. Verdério, V. L. Scalón, E. Avallone y P. C. Mioralli, «Numerical validation of viewFactor and FVDOM radiation models of OpenFOAM and application in the study of food furnaces,» *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 26, nº 4, pp. 546-556, 2018.
- [36] U. Ayachit, The ParaView Guide Community Edition, 2019.
- [37] S. Dabiri, E. Khodabandeh, A. Khomeini, R. Mashayekhi, D. Toghraie y S. A. Abadian, «Parametric investigation of thermal characteristic in trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator,» *Energy*, 2018.
- [38] ANSYS, ANSYS Fluent User's Guide, Canonsburg: ANSYS Inc., 2013.
- [39] M. F. Modest, Radiative Heat Transfer, Segunda ed., USA: Elsevier Science, 2003.
- [40] J. D. Pye, G. L. Morrison y M. Behnia, «Modelling of cavity receiver heat transfer for the compact linear fresnel reflector,» 2006.
- [41] K. S. Reddy y K. Ravi Kumar, «Estimation of convective and radiative heat losses from an inverted trapezoidal cavity receiver of solar linear Fresnel reflector system,» *International Journal of Thermal Sciences*, nº 80, pp. 48-57, 2014.
- [42] E. Guadamud, A. Oliva, O. Lehmkuhl, I. Rodríguez y I. González, «Thermal analysis of a receiver for Linear Fresnel reflectors,» *Energy Procedia*, nº 69, pp. 405-414, 2015.
- [43] M. Ghodbane, B. Boumeddane y N. Said, «Design and experimental study of a solar system for heating water utilizing a linear Fresnel reflector,» *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, vol. 8, nº 3, pp. 804-825, 2016.
- [44] J. Duffie y W. Beckman, Solar Engineering for Thermal Processes, Cuarta ed., New York, 2013.
- [45] A. Roostaei y M. Ameri, «Effect of Linear Fresnel Concentrators Field Key Parameters on Reflectors Configuration, Trapezoidal Cavity Receiver Dimension, and Heat Loss,» *Renewable Energy*, 2018.