



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**“Modelado de la eficiencia térmica de un concentrador solar
de media temperatura tipo Fresnel para aplicaciones de
secado de granos en la región costa del Ecuador”**

TESIS DE POSTGRADO

Previo a la obtención del Título de:

MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA

Presentada por:

Daniela Carolina Jaramillo Cobos

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por todas las bendiciones que ha derramado en mi vida.

Agradezco a mi familia por todo su apoyo incondicional, especialmente a mis padres Anita y Richard por siempre motivarme e impulsarme en cada etapa del camino; y a mi hermano Andrés por ser uno de los pilares más importantes de mi vida.

Agradezco a mi esposo, Diego, por su infinita paciencia y soporte constante.

Agradezco a mi tutora y cotutor, Emérita Delga Ph. D. y Galo Durazno M. Sc. por su tiempo y guía para la elaboración de este trabajo.

Un agradecimiento especial para el coordinador de la carrera, Juan Peralta Ph. D., por siempre estar pendiente y por su incondicional apoyo.

DEDICATORIA

A mi hijo, Ariel, mi motivación, inspiración
y razón de todo en la vida.

A mi esposo, Diego; una etapa más en lo
que nos queda por recorrer.

TRIBUNAL DE TITULACIÓN

**Emérita Alexandra Plaza
Delgado, Ph. D.**

DIRECTORA DE TESIS

**Galo Andrés Durazno
Palacios, M. Sc.**

CODIRECTOR DE TESIS

**Juan Manuel Peralta
Jaramillo, Ph. D.**

VOCAL

**Jorge Francisco Silva
León, Ph. D.**

VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta tesis de grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

Daniela Carolina Jaramillo Cobos

RESUMEN

Para garantizar la seguridad y sostenibilidad energética a largo plazo es necesario trabajar en criterios de diversificación, disponibilidad, rentabilidad y accesibilidad de diversas fuentes energéticas, por lo que este trabajo consistió en la simulación de un concentrador solar Fresnel para aplicaciones en el sector agrícola. El objetivo de la tesis es evaluar la eficiencia térmica de un concentrador solar de media temperatura tipo Fresnel mediante la aplicación de técnicas de simulación, programas CFD, para su uso como fuente secundaria de energía en el proceso de secado de granos.

El secador solar es una tecnología que puede ser fácilmente desarrollada y adaptada en áreas rurales debido a su alta eficiencia energética y mínimo impacto ambiental; la locación geográfica donde se evaluará el modelo de simulación será la costa ecuatoriana y pretende satisfacer la demanda energética del proceso de secado de granos. Las condiciones de operación establecidas para el secado del producto se da entorno de alcanzar una temperatura uniforme de aire caliente de 323 [K], considerando que los productos alimentarios pueden tener hasta un 80% de humedad inicial. Los estudios paramétricos de la geometría y configuración concentrador lineal Fresnel, que se utiliza como fuente principal de energía para el secador, se desarrollaron con el fin de evaluar el comportamiento térmico del mismo, basándose en: la radiación solar de ingreso, el número de reflectores primarios, longitud de la cavidad receptora y flujo másico de HTF. Finalmente, se desarrolló un modelo en estado transitorio evaluando las horas de radiación solar para un día en la ciudad de Guayaquil.

Los resultados muestran que existe un área de sombreado parcial en la cavidad receptora debido al ángulo de reflexión de los receptores primarios por lo que el calor concentrado no está distribuido uniformemente sobre el receptor. Para el modelo simulado, el radio de concentración es de aproximadamente 3 y la temperatura final del fluido caloportador (HTF) es de aproximadamente 355 [K]. Los estudios

paramétricos exponen que el modelo simulado alcanza el punto de equilibrio con 14 reflectores primarios, cada uno de 7 [m] de longitud. Adicionalmente, existe una correlación lineal entre el flujo másico de HTF y la temperatura de salida del mismo; mientras que para la radiación solar de entrada se tiene una correlación cuadrática con la temperatura de salida del HTF. El estudio transitorio, demostró que tanto para alta como para baja radiación solar de entrada se requieren 40 [min] para que el flujo de calor concentrado en la superficie de vidrio se estabilice y 50 [min] para que la temperatura de salida del HTF se mantenga constante.

Palabras clave: Concentrador solar, secado solar, análisis computacional, estudios paramétricos, fluido caloportador (HTF)

ABSTRACT

To ensure long-term energy security and sustainability, it is necessary to work on criteria of diversification, availability, profitability and accessibility of several energy sources, this project is based on a linear Fresnel concentrator applied in agricultural sector. The thesis objective is to evaluate the thermal efficiency of a medium-temperature Fresnel solar concentrator through the application of simulation techniques, CFD programs, for its use as a secondary source of energy in the grain drying process.

The solar dryer is a technology that can be easily developed and adapted in rural areas due to its high energy efficiency and minimal environmental footprint. The geographical location where the simulation model will be evaluated is the Ecuadorian coast and it aims to satisfy the energy demand of the grain drying process. The operating conditions establish that is necessary to reach a uniform hot air temperature of 323 [K], considering that food products can have up to 80% initial moisture. Parametric analysis of the geometry and configuration of the linear Fresnel concentrator, which is used as the main source of energy for the dryer, were developed in order to evaluate its thermal behavior, based on: incoming solar radiation, number of primary reflectors, receiving cavity length and HTF mass flow. Finally, a transient model was developed evaluating the radiation hours in a day in Guayaquil city

The results show that there exists a partially shaded area in the receptive cavity because of the reflective angle in the primary mirrors; the concentrated heat is not uniformly distributed throughout the receptive cavity. For the simulated model, the heat concentration ratio is around 3, and the final temperature of the HTF is 355K. Parametric studies shown that the model reaches the equilibrium point with 14 primary reflective mirrors with a length of 7 meters each. Additionally, when there is a flux increase in the HTF, a linear correlation between mass flux and temperature appears. Meanwhile, for inlet solar radiation there is a quadratic correlation. Transient study

shown that for high and low solar radiation, it is required 40 [min] to stabilize the concentrated heat within the receptive cavity and 50 [min] to stabilize the HTF outlet temperature

Keywords: *Solar concentrator, solar drying, computational analysis, parametric studies, heat transfer fluid (HTF)*

ÍNDICE GENERAL

	Pag.
RESUMEN	I
ABSTRACT	III
ÍNDICE GENERAL.....	V
ABREVIATURAS	VII
SIMBOLOGÍA	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XV
CAPÍTULO 1	
1. ANTECEDENTES.....	1
1.1. Problemática	4
1.2. Justificación	5
1.3. Alcance	7
1.4. Objetivo general	7
1.5. Objetivos específicos.....	7
CAPÍTULO 2	
2. REVISIÓN LITERARIA	8
2.1. Energía solar.....	8
2.2. Concentradores solares.....	13
2.3. Concentrador solar tipo Fresnel	15
2.4. Calor solar para procesos industriales	19
2.5. Aplicación directa de un concentrador lineal Fresnel: Secado de alimentos..	23
CAPÍTULO 3	
3. METODOLOGÍA.....	28
3.1. Condiciones de operación del secador agrícola	28
3.2. Geometría del concentrador lineal Fresnel.....	32
3.3. Modelo óptico y térmico	37
3.4. Simulación CFD	43
3.5. Estructura del mallado de simulación.....	46
3.6. Modelos de resolución ANSYS Fluent	48
3.7. Condiciones de frontera.....	51

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
4.1. Estudio de la malla	54
4.2. Estado estable	63
4.3. Estudio paramétrico: Número de reflectores primarios	69
4.4. Estudio paramétrico: Longitud del receptor	72
4.5. Estudio paramétrico: Flujo másico de HTF	75
4.6. Estudio paramétrico: Radiación solar característica	76
4.7. Estado transitorio	78

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
5.1. Conclusiones.....	90
5.2. Recomendaciones.....	94

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ABREVIATURAS

2D	Análisis en dos dimensiones
3D	Análisis en tres dimensiones
CFD	Fluidodinámica computacional (Computational Fluid Dynamics)
DNI	Irradiación solar directa normal (Direct Normal Irradiation)
GHI	Irradiación solar global horizontal (Global Horizontal Irradiation)
GLP	Gas licuado de petróleo
HTF	Fluido de transferencia de calor (Heat Transfer Fluid)
IEA	Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency)
MBEP	Millones de barriles equivalentes de petróleo
OC	Banda espectral de onda corta
OL	Banda espectral de onda larga
RMT	Receptor con múltiples tuberías
TSCE	Receptor de tubería simple con cubierta externa
TSCI	Receptor de tubería simple con cubierta interna
UDF	Funciones definidas por el usuario (User Defined Function)

SIMBOLOGÍA

°C	Grados centígrados
A_x, A_y, A_z	Área fraccional abierta a fluir según el eje de dirección
b_x, b_y, b_z	Pérdidas de flujo en medios porosos en coordenadas x, y, z
c_{pf}	Calor específico del fluido [$\frac{J}{kgK}$]
C_μ	Viscosidad turbulenta constante del modelo k
D_w	Espacio entre el centro de cada reflector primario instalado
EJ	Exa-julio (1 [EJ] = $1 * 10^{18}$ [J])
F	Altura del receptor trapezoidal
F_i	Distancia focal para cada reflector primario
f_x, f_y, f_z	Aceleraciones viscosas en coordenadas x, y, z
F_x, F_y, F_z	Componentes de las fuerzas exteriores que actúan sobre el volumen por unidad de masa en coordenadas x, y, z
GW	Gigavatios
G_x, G_y, G_z	Aceleración del cuerpo en las coordenadas x, y, z
h	Coeficiente de transferencia de calor por convección [$\frac{W}{m^2K}$]
h_v	Coeficiente de convección natural entre la cubierta de vidrio y el ambiente
K	Grados Kelvin
k_a	Coeficiente de absorción espectral
k_f	Conductividad térmica del fluido [$\frac{W}{mK}$]
k_s	Coeficiente de dispersión
kg	Kilogramos
kmol	Kilo mol
kWh	Kilovatios hora
$l_{b\lambda}$	Función de Planck
L_c	Longitud característica [m]
l_λ	Intensidad de la radiación espectral
min	Minutos
N	Número de reflectores primarios por cada lado del receptor
MW	Megavatios
m	Metros
m ²	Metros cuadrados
m ³	Metros cúbicos
mm	Milímetros
\dot{q}	Flujo de calor concentrado sobre la cubierta de vidrio del receptor
R_{SOR}	Fuente másica

R^2	Coefficiente de determinación para los modelos matemáticos
s	Segundos
S_h	Término fuente
t	Tiempo de simulación actual en [s]
T_s	Temperatura de la superficie
T_f	Temperatura del fluido
μm	Micrometros
u	Componente de la velocidad en dirección de las coordenadas x
v	Componente de la velocidad en dirección de las coordenadas y
V_f	Velocidad del fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$
V_F	Volumen fraccionado del fluido
w	Componente de la velocidad en dirección de las coordenadas z
W_0	Ancho de cada reflector primario instalado
W_{tot}	Ancho total del concentrador lineal tipo Fresnel

α	Absortancia de los materiales
β	Ángulo de inclinación de cada reflector primario con respecto a la horizontal del terreno
γ	Longitud de la onda electromagnética
ε	Emitancia de los materiales
θ_T	Ángulo de incidencia del rayo solar con respecto a una perpendicular a la superficie del espejo
Φ_λ	Función de dispersión de fase
μ_f	Viscosidad dinámica del fluido $\left[\frac{kg \cdot m}{s}\right]$
ρ	Reflectancia de los materiales
ρ_f	Densidad del fluido $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$,
τ	Transmitancia de los materiales
φ	Ángulo de posición de cada reflector primario con respecto al receptor
Ω	Ángulo sólido

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Capacidad de generación energética instalada a partir de recursos renovables para el año 2020	2
Figura 1.2 Distribución de la generación primaria con energías renovables en Ecuador para el año 2020	3
Figura 1.3 Potencia obtenida en los proyectos de concentración solar a nivel mundial para el año 2020	6
Figura 2.1 Potencia instalada para el aprovechamiento del recurso solar	9
Figura 2.2 Mapa de irradiación solar global horizontal (GHI) anual en el Ecuador ...	11
Figura 2.3 Variación de la radiación solar en Ecuador, año 2020	12
Figura 2.4 Esquemas de la tecnología de concentración solar	13
Figura 2.5 Esquema de un concentrador lineal Fresnel tradicional	16
Figura 2.6 Geometría de los receptores lineales Fresnel convencionales	16
Figura 2.7 Distribución de la energía generada a nivel mundial por sector	20
Figura 2.8 Aplicaciones del calor generado a partir del recurso solar	21
Figura 2.9 Esquema de generación directa de calor con un sistema auxiliar conectado en paralelo	22
Figura 2.10 Esquema de funcionamiento del secador agrícola con un concentrador Fresnel como sistema auxiliar	24

Figura 2.11 Esquema del proceso de un secador solar en aplicaciones agrícolas ...	25
Figura 3.1 Variación de la radiación solar en el Ecuador a través del tiempo	30
Figura 3.2 Diagrama de resistencias térmicas de la cavidad receptora de un captador solar	32
Figura 3.3 Estructura propuesta para el soporte del receptor	33
Figura 3.4 Modelo simplificado de un concentrador Fresnel con espejos planos	35
Figura 3.5 Geometría del receptor trapezoidal del concentrador Fresnel. Dimensiones en [mm].....	37
Figura 3.6 Radiación de onda corta y larga en un receptor trapezoidal.....	38
Figura 3.7 Proceso de absorción, reflexión y transmisión de energía en una superficie	39
Figura 3.8 Proceso de convección externa natural	42
Figura 3.9 Ejemplo gráfico del tipo de mallado empleado por ANSYS Fluent	46
Figura 3.10 Esquema de parámetros y procesos de simulación considerados para el análisis del concentrador lineal Fresnel	53
Figura 4.1 Relación entre número de elementos de cada malla y el tiempo de simulación requerido	57
Figura 4.2 Parámetros de control para el estudio de malla	58
Figura 4.3 Vista frontal de la malla 4. Análisis de la calidad global de cada elemento que compone la malla	59

Figura 4.4 Histograma de la ortogonalidad de los elementos que componen la malla 4 para el análisis de radiación	60
Figura 4.5 Histograma de la oblicuidad de los elementos que componen la malla 4 para el análisis de radiación	61
Figura 4.6 Histograma de la ortogonalidad de los elementos que componen la malla 4 para el análisis del receptor	62
Figura 4.7 Histograma de la oblicuidad de los elementos que componen la malla 4 para el análisis del receptor.....	63
Figura 4.8 Flujo de calor concentrado en la cubierta de vidrio	64
Figura 4.9 Vista frontal del flujo de calor en el concentrador lineal Fresnel	65
Figura 4.10 Vista lateral del flujo de calor en el concentrador lineal Fresnel	66
Figura 4.11 Descripción de la dirección de los rayos solares en el concentrador lineal Fresnel.....	67
Figura 4.12 Perfil de temperaturas dentro de la cavidad receptora. Vista frontal.....	68
Figura 4.13 Distribución de la temperatura del HTF a la salida de cada tubería de transporte.....	68
Figura 4.14 Variación del flujo de calor concentrado y temperatura del HTF en función del número de reflectores primarios.....	70
Figura 4.15 Flujo de calor concentrado sobre la cubierta de vidrio al considerar 14 reflectores primarios.....	71
Figura 4.16 Temperatura del HTF al considerar 14 reflectores primarios.....	71

Figura 4.17 Relación entre la longitud del receptor y la temperatura de salida del HTF	73
Figura 4.18 Temperatura del HTF al considerar 14 reflectores primarios en un concentrador de 7 [m] de longitud.....	74
Figura 4.19 Variación de la temperatura de salida del HTF en función del flujo másico de ingreso	75
Figura 4.20 Variación del flujo de calor concentrado sobre la cubierta de vidrio y la temperatura de salida del HTF en función de la radiación solar incidente	77
Figura 4.21 Variación de la radiación solar en la ciudad de Guayaquil para el año 2021	79
Figura 4.22 Variación porcentual en la temperatura de salida del HTF según el número de iteraciones por segundo utilizadas en la simulación	81
Figura 4.23. Flujo de calor concentrado en la cubierta de vidrio. Radiación solar baja: menor a 100 [Wm^2].....	82
Figura 4.24 Temperaturas del sistema. Radiación solar baja: menor a 100 [Wm^2] ..	83
Figura 4.25 Temperaturas de salida del HTF. Minuto 20 de la simulación	84
Figura 4.26 Temperaturas de salida del HTF cuando se alcanza el equilibrio basado en el tiempo de simulación	84
Figura 4.27 Temperaturas de salida del HTF en cada tubería con radiación solar baja. Detalle de los primeros 1000 [s].....	85
Figura 4.28 Flujo de calor concentrado en la cubierta de vidrio para valores de radiación solar altos: superiores a 800 [Wm^2].....	86

Figura 4.29 Temperaturas del sistema. Radiación solar alta: superiores a 800 [Wm^2]	87
Figura 4.30 Temperaturas de salida del HTF en cada tubería con radiación solar alta. Detalle de los primeros 1000 [s].....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características de los tipos de tecnología de concentración solar.....	14
Tabla 2 Características de los receptores utilizados en concentradores Fresnel.....	17
Tabla 3 Ventajas y desventajas de los concentradores lineales Fresnel.....	18
Tabla 4 Consumo energético de granos cosechados en la región Costa del Ecuador por cada 100 [kg] de producto	27
Tabla 5 Parámetros de operación del modelo de secador agrícola.....	28
Tabla 6 Propiedades del aire a temperatura ambiente	29
Tabla 7 Condiciones climáticas en la provincia de Guayas – Ecuador.....	31
Tabla 8 Parámetros geométricos del concentrador lineal Fresnel.....	34
Tabla 9 Resultados de los parámetros de posición de los reflectores primarios con respecto al receptor central	36
Tabla 10 Valores de las propiedades ópticas de las superficies del concentrador lineal Fresnel.....	40
Tabla 11 Parámetros para la evaluación de la calidad de malla en ANSYS Fluent ..	47
Tabla 12 Condiciones de frontera utilizadas en la simulación de un concentrador solar Fresnel.....	52
Tabla 13 Método de mallado para cada malla de estudio	55

Tabla 14 Tabla resumen de las ecuaciones para determinar la temperatura de salida del HTF 78

CAPÍTULO 1

1. Antecedentes

Investigaciones sobre tecnologías aplicadas al aprovechamiento de recursos naturales son desarrolladas a nivel mundial debido a la alta demanda energética y al incremento en los efectos de los gases contaminantes liberados en el medio ambiente por el uso de recursos energéticos fósiles (IEA 2021). Para garantizar la seguridad energética a largo plazo es necesario trabajar en la diversificación, disponibilidad, rentabilidad y accesibilidad a diversas fuentes de energía aplicadas a todos los sectores estratégicos, como por el ejemplo el sector agrícola (Ellabban, Abu-Rub, y Blaabjerg 2014). Muchos países producen; frutas, vegetales y granos para consumo local y exportación. De acuerdo con la Organización de Alimentos y Agricultura (FAO 2021) varios países, tales como China e India, exportan alimentos con altos contenidos de humedad siendo susceptibles a la rápida degradación y por ende pérdida del producto alimentario (Sharma, Chen, y Vu Lan 2009).

Por otra parte, el consumo de energía utilizada para el proceso de secado de alimentos representa del 7-15% de la energía industrial consumida en países como; Estados Unidos, Alemania, Dinamarca, Reino Unido y Francia (Sansaniwal, Sharma, y Mathur 2018). Cuyo costo energético es superior a los costos de países Latinoamericanos, por lo tanto, es el factor principal que incentiva la búsqueda de alternativas para el uso de diversas fuentes energéticas, como la energía solar, hídrica de baja escala, geotérmica, eólicas, entre otras.

La energía solar está disponible en casi todo el globo terráqueo, es gratuita y es una fuente de energía limpia y libre de contaminación (Bennamoun y Belhamri 2003; Ellabban et al. 2014). Esta fuente energética tiene un potencial de desarrollo mayor en

comparación a otros tipos de energías alternativas, como la energía oceánica, biomasa y geotermia, debido al costo de instalación y materiales de construcción en equipos de aprovechamiento energético (Kalogirou et al. 2016).

A partir del estudio presentado por la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, por sus siglas en inglés) (IRENA 2020), en el año 2020 sólo el 0.2% de la capacidad instalada para generación energética a partir de recursos renovables correspondía a proyectos de aprovechamiento solar térmico, esta energía fue equivalente a 6 506,68 [MW] (IRENA 2020). La Figura 1.1 muestra la capacidad de generación energética instalada a nivel mundial para el uso de fuentes de energía renovable.

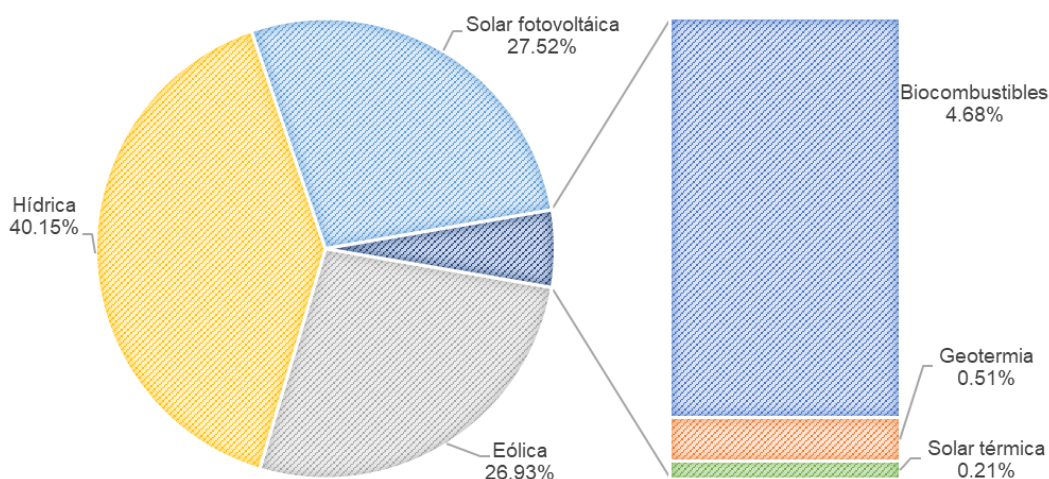


Figura 1.1 Capacidad de generación energética instalada a partir de recursos renovables para el año 2020

Fuente: IRENA 2020

Para el caso particular de Latinoamérica y El Caribe, en el año 2020 según datos del HUB de Energía (OLADE et al. 2021) la generación primaria con energías renovables fue de más de 1.2 millones de barriles equivalentes de petróleo (MBEP), este valor

representa el 32.8% de la energía generada en la región, siendo las principales fuentes la hidroenergía, caña de azúcar y leña, cada una con un aporte de aproximadamente 460 miles de MBEP.

En el Ecuador, la energía renovable representó el 25.5% de la energía primaria en el año 2020, la distribución del aporte energético se muestra en la Figura 1.2; aquí se aprecia que la generación energética a partir de recursos no tradicionales es en su mayoría hidroenergía, considerándose como energía limpia; mientras que la energía proveniente de otras fuentes primarias como la solar, eólica, entre otras, no supera los 391 kBEP (barriles equivalentes de petróleo), siendo una muestra de la necesidad de desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de estos recursos en el país.

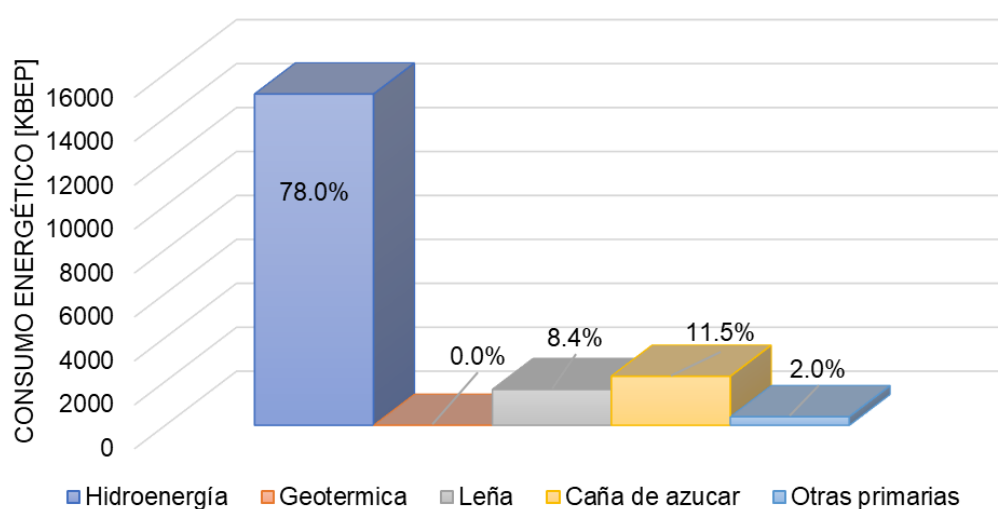


Figura 1.2 Distribución de la generación primaria con energías renovables en Ecuador para el año 2020

Fuente: MERNNR 2021; OLADE et al. 2021

Los concentradores solares son dispositivos diseñados para aprovechar la radiación solar y convertirla en calor (Kalogirou 2004), esta tecnología puede ser empleada

como dispositivo primario o auxiliar en la generación de energía a partir del recurso solar. El principio de operación de estos equipos se basa en la reflexión de la radiación solar hacia una cavidad receptora, convirtiendo esta energía en calor a través de un fluido de transferencia de calor (HTF, por sus siglas en inglés) (Kalogirou et al. 2016). Dependiendo de la necesidad energética, el calor puede ser transformado a energía eléctrica o térmica (Tian y Zhao 2013).

Existen diferentes tipos de concentradores solares, sin embargo, los concentradores solares tipo Fresnel son tecnología que puede implementarse en diversos sectores estratégicos debido a su volumen de instalación, peso ligero, y la inversión económica inicial necesaria, misma que es relativamente baja en comparación con sistemas de concentración parabólicos (Xie et al. 2011). Esta tecnología ha sido implementada y desarrollada en diversas regiones del mundo, especialmente en Europa, por su alta eficiencia óptica con una mínima inversión en equipos, sin embargo, su desarrollo tecnológico continúa en algunas áreas de aplicación como por ejemplo el secado de alimentos, en donde el equipo sirve como dispositivo externo y auxiliar en el aprovechamiento del recurso solar.

1.1. Problemática

Para reducir la dependencia a combustibles tradicionales y el impacto ambiental generado por el uso de fuentes de energía convencional es necesario implementar, especialmente en los sectores estratégicos del país, tecnología que permita el aprovechamiento de energía renovable y de manera simultánea ofrezca una solución sostenible para su usuario. A nivel mundial la alta dependencia a recursos energéticos tradicionales, como combustibles fósiles, es uno de los mayores retos que vencer para identificar necesidades que puedan satisfacerse mediante el calor obtenido de la energía solar (Xie et al. 2011), por lo que el estudio de la implementación de diversos sistemas de aprovechamiento de la energía solar se ha vuelto una herramienta en el desarrollo energético. Los sistemas de secado agrícolas han sido modificados

constantemente, a través de la implementación de tecnología que permita obtener productos de alta calidad nutritiva, mediante una eficiencia moderada y a bajos costos de producción (Blanco Cano, Valldecabres Sanmartín, y Navarra 2016); la tecnología implementada debe contribuir a la obtención de las mejores condiciones físico-químicas de los productos agrícolas, puesto que los procesos tradicionales de secado someten al producto a fluctuaciones de temperatura que cambian las propiedades nutricionales y disminuyen la calidad del producto final ofertado al consumidor (García, Alvis, y García 2015).

1.2. Justificación

El proceso de secado de un producto agrícola es térmico, al utilizar equipos tecnológicos para su ejecución se contemplan varios parámetros económicos y técnicos, como la alta inversión inicial, la necesidad de tener acceso a energía eléctrica la mejor configuración geométrica, el diseño que mejor se adapte a las necesidades del usuario, entre otras; dificultando su uso en sectores rurales, y en ocasiones, obligando al agricultor a depender de combustibles fósiles para sus actividades, por lo que la implementación de un secador de alimentos cuya fuente energética sea el recurso solar es una alternativa adecuada para los agricultores rurales del Ecuador. El sistema térmico propuesto tiene dos elementos básicos, un captador en el que la radiación solar se convierte en calor y una cámara de secado, donde el producto es deshidratado debido a la convección del aire caliente.

Los captadores solares tipo Fresnel son considerados como una alternativa tecnológica debido a su eficiencia óptica, uso eficiente del suelo, bajo costo de instalación y mantenimiento. Según datos del Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL, por sus siglas en inglés), hasta el año 2020 se tenía en operación 224 [MW] de energía obtenida a partir de campos de captación solar tipo Fresnel (NREL 2020), lo que representaba aproximadamente el 3% de la energía obtenida en campos que emplean diversas tecnologías de captación; la Figura

1.3 muestra un comparativo de la capacidad de generación por tipo de tecnología a nivel mundial.

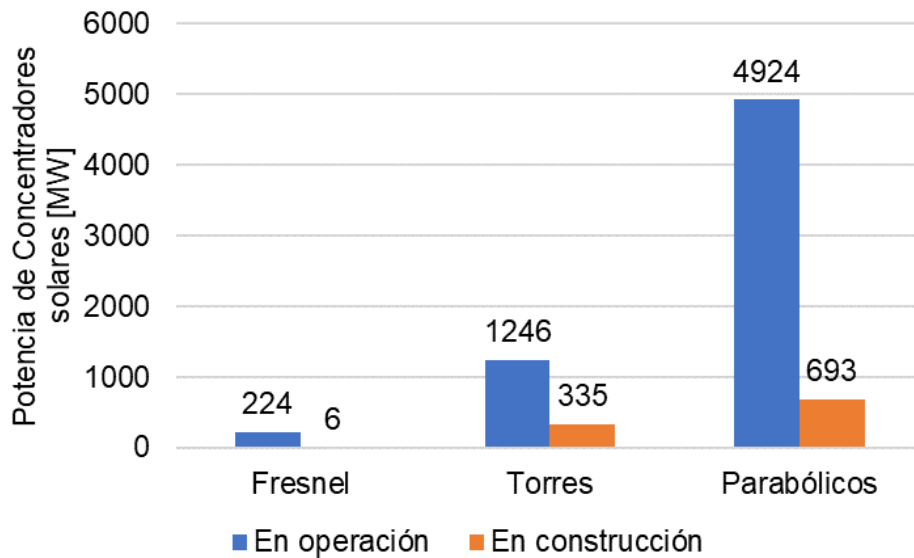


Figura 1.3 Potencia obtenida en los proyectos de concentración solar a nivel mundial para el año 2020

Fuente: NREL 2020

En el Ecuador no existen proyectos que involucren campos de captación tipo Fresnel para el aprovechamiento del recurso solar, por lo que este trabajo puede ser empleado como base para futuras investigaciones dentro del área de captación solar, y además aportar con el cumplimiento de los objetivos 7 (Energía asequible y no contaminante), 8 (Trabajo decente y crecimiento económico), 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y 12 (Producción y consumo responsable) del desarrollo sostenible planteados por la Organización de las Naciones Unidas en el 2015 (Naciones Unidas 2015).

1.3. Alcance

Este proyecto tiene como alcance desarrollar un modelo en volúmenes finitos para determinar la eficiencia térmica del fluido de transferencia de calor (HTF) en estado estable y transitorio de un concentrador solar tipo Fresnel que será utilizado como fuente secundaria en el proceso de secado de granos en la región Costa del Ecuador. Se presentará un modelo matemático del comportamiento térmico del concentrador en estado estable y simulaciones de fluidodinámica computacional (CFD) de dicho comportamiento, adicionalmente se presentarán simulaciones cualitativas del estado transitorio del concentrador lineal Fresnel.

1.4. Objetivo general

Evaluar la eficiencia térmica de un concentrador solar de media temperatura tipo Fresnel mediante simulación utilizando programas de fluidodinámica computacional (CFD), para su aplicación como fuente secundaria de energía en el proceso de secado de granos.

1.5. Objetivos específicos

- i. Desarrollar un modelo en volúmenes finitos para el análisis de la eficiencia térmica del fluido de transferencia de calor en estado estable y transitorio de un concentrador solar tipo Fresnel.
- ii. Desarrollar estudios paramétricos con variables de influencia en la eficiencia térmica del concentrador para obtener el modelo adecuado para las aplicaciones de secado deseadas.
- iii. Analizar el comportamiento térmico de un concentrador solar lineal Fresnel de acuerdo con los parámetros ambientales de la zona de actuación.

CAPÍTULO 2

2. Revisión Literaria

2.1. Energía solar

La demanda energética mundial se satisface, actualmente, casi en su totalidad a través del uso de combustibles fósiles, mismos que contaminan el ambiente con emisiones de efecto invernadero; la innovación tecnológica pretende diversificar las fuentes energéticas para satisfacer esta demanda a través de recursos disponibles no explotados (Yu et al. 2022). El recurso solar es una fuente de energía viable dado que no contamina, es renovable y está disponible a nivel mundial. El sol provee a la Tierra de tanta energía que tan solo en 90 [min] se podría satisfacer la demanda energética mundial (Hereher y El Kenawy 2020), se estima que anualmente la energía suministrada por el sol alcanza los 3.85 millones de [EJ] (Villar 2012); sin embargo, esta energía no es aprovechada adecuadamente debido al limitado acceso y desarrollo tecnológico necesario para su empleo.

Los sistemas de aprovechamiento solar pueden ser empleados en una gran variedad de aplicaciones y son más económicos, respecto a los costos de mantenimiento, que los equipos que utilizan combustibles fósiles (Chen et al. 2019); la principal desventaja de esta tecnología es su dependencia a condiciones climáticas, lo que obliga al usuario a instalar fuentes de almacenamiento energético que incrementan el costo de inversión inicial. Entre 1991 y 2020, el empleo de la energía solar ha tenido un crecimiento exponencial; siendo su mayor progreso en aplicaciones de generación eléctrica. De acuerdo con el Reporte del Estado Global del uso de Energías Renovables (REN21 2020) en el año 2020 la implementación de tecnología para el aprovechamiento de recursos renovables se vio afectada por la pandemia del COVID-

19, donde todos los recursos económicos fueron redirigidos para atender la emergencia sanitaria; este acontecimiento histórico también representó una reducción del 4% de la demanda energética mundial, sin embargo, a pesar de la emergencia ese año se instalaron 125 [GW] de potencia energética obtenida a partir del recurso solar, lo que representó aproximadamente un 15% más que la potencia instalada en el año 2019 (IRENA 2020; REN21 2020). La Figura 2.1 muestra el crecimiento de potencia instalada para aprovechamiento del recurso solar a nivel mundial, aquí se puede observar que las instalaciones son en su mayoría fotovoltaicas, siendo las plantas térmicas sólo el 1% del total de energía solar aprovechada en el año 2020.

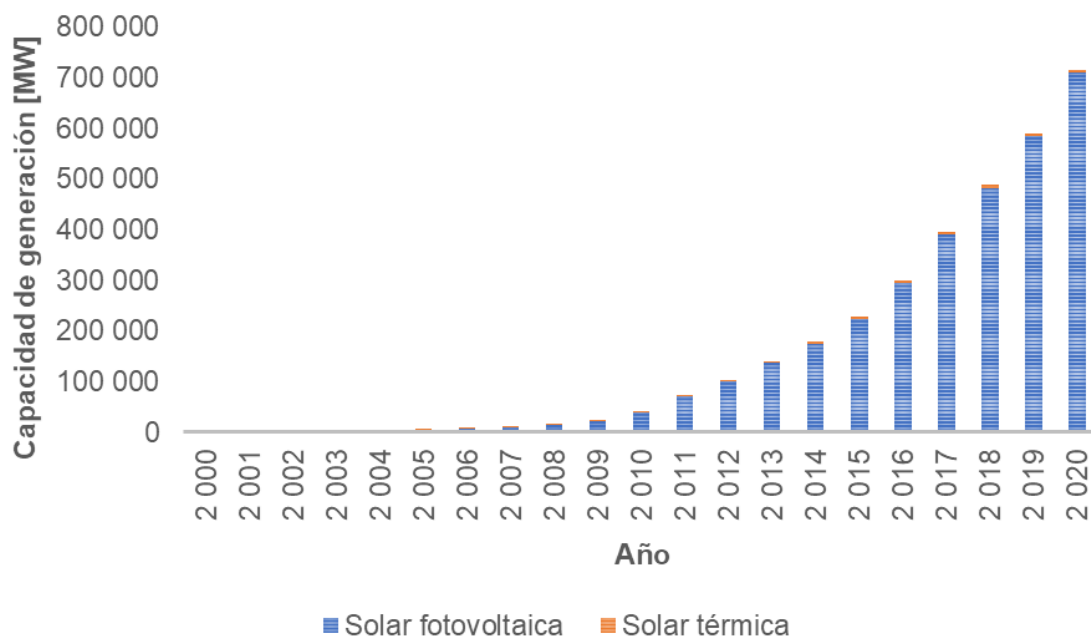


Figura 2.1 Potencia instalada para el aprovechamiento del recurso solar

Fuente: IRENA 2020

China está considerado como el país que tiene mayor demanda, inversión y capacidad de generación, a partir de recursos renovables, seguido de Estados Unidos en el caso de generación de potencia y de Turquía para la generación de calor (REN21 2020). La energía solar, desde el punto de vista renovable, puede ser aprovechada en plantas de captación para obtener calor o electricidad; los sistemas de generación de calor tienen como principio de funcionamiento el aprovechamiento de la radiación solar directa a través del calentamiento de un fluido de transferencia de calor (HTF) que circula por tuberías contenidas en receptores solares (Madridsolar 2006); la eficiencia de estos sistemas depende principalmente de los materiales de construcción, geometría de los receptores, sistemas auxiliares de almacenamiento térmico, etc.; su campo de aplicación son los sistemas sanitarios de pequeña escala, como calefacción, desinfección, pasteurización, entre otros. Los sistemas fotovoltaicos, utilizados para generación eléctrica, transforman la radiación solar en electricidad a partir del efecto fotoeléctrico en materiales semiconductores (Leonzio 2017).

Para el aprovechamiento adecuado del recurso solar es necesario definir el potencial de cada país, para el caso de Ecuador en el 2019, el grupo de investigación SCINERGY de la Escuela Politécnica Nacional realizó un proceso de validación considerando 41 estaciones meteorológicas pertenecientes a la Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), con el objetivo de actualizar los mapas solares existentes (Vaca y Ordoñez 2019). La Figura 2.2 muestra el mapa solar en el Ecuador para el año 2019, es necesario considerar que el recurso solar en el país no es constante debido al alto grado de nubosidad y orografía, sin embargo, los mapas muestran que Loja cuenta con el mayor potencial solar del Ecuador continental, alcanzando niveles desde 4.2 hasta 5.7 [kWh/m² día], mientras que provincias de la región Costa alcanzan valores de irradiación solar global horizontal anual desde 4.2 hasta 5.2 [kWh/m² día]. Según los registros meteorológicos de la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio de

Estados Unidos (NASA, por sus siglas en inglés), la radiación solar global anual en el Ecuador, en el año 2020, ha variado entre 3.45 - 4.68 [kWh/m² día]; mientras que la radiación solar normal directa varió entre 1.81 – 3.6 [kWh/m² día], siendo el mes de agosto el que mayor radiación solar aprovechable presentó (NASA 2021). El comportamiento antes mencionado se puede apreciar en la Figura 2.3.

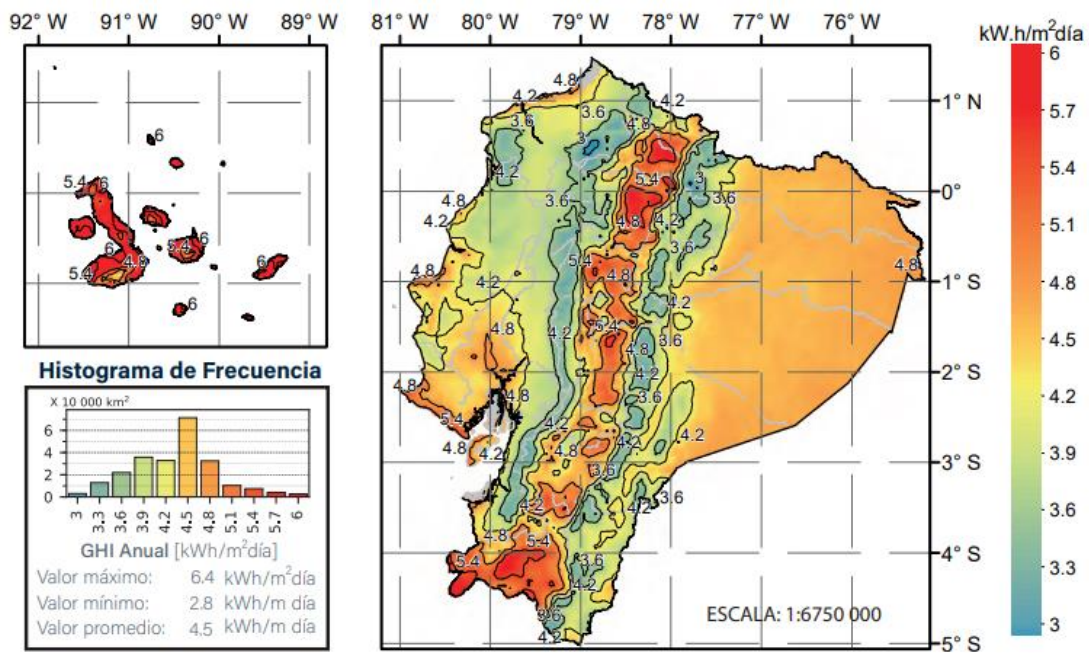


Figura 2.2 Mapa de irradiación solar global horizontal (GHI) anual en el Ecuador

Fuente: Vaca y Ordoñez 2019

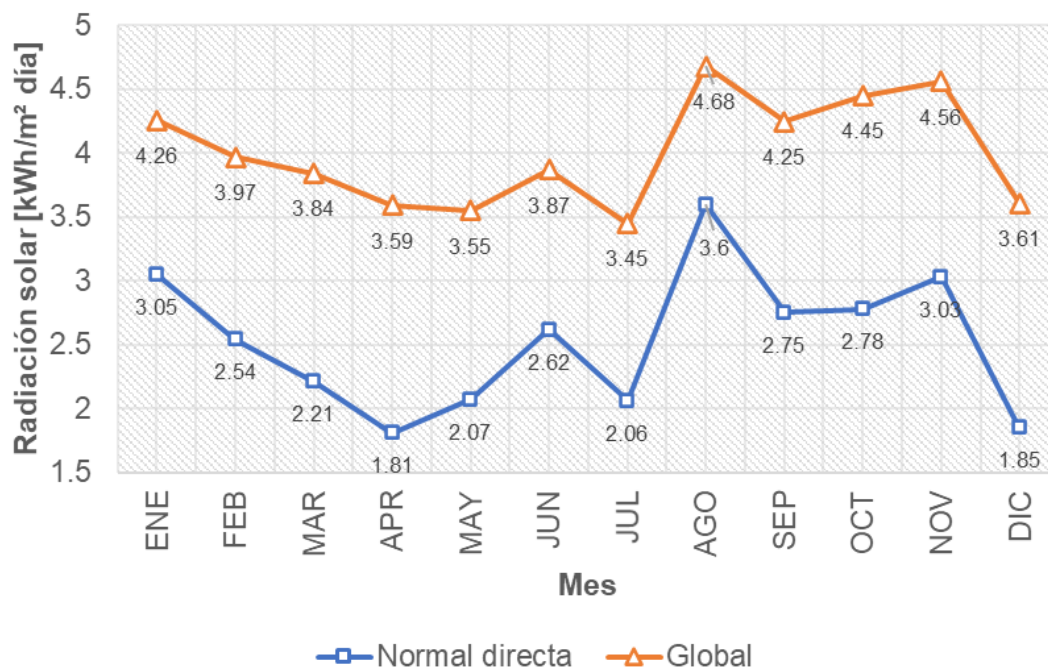


Figura 2.3 Variación de la radiación solar en Ecuador, año 2020

Fuente: NASA 2021

En Ecuador, según el HUB de Energía (OLADE et al. 2021) la inversión pública para el desarrollo del aprovechamiento del recurso solar disminuyó de 19.8 millones de dólares en el año 2010 a 0.04 millones invertidos durante 2016, desviando todos los recursos a la implementación de proyectos de aprovechamiento hídrico. En lo que respecta al aprovechamiento del recurso solar para generación de energía, el país cuenta con el proyecto FERUM (Energización Rural y Electrificación Urbano-Marginal), mismo que tiene como objetivo mejorar las condiciones de vida en sectores rurales sin acceso a la red eléctrica, hasta el año 2021 el proyecto seguía en fase de ejecución con un 84.17% del tiempo total transcurrido desde el 01/Enero/2013 hasta el 31/Diciembre/2022 (Rodríguez 2021), sin embargo, para aplicaciones térmicas no existen proyectos detallados a gran escala que utilicen el recurso solar como fuente

energética, y los proyectos a pequeña escala son, principalmente, calentamiento de agua sanitaria para uso doméstico.

2.2. Concentradores solares

Los concentradores solares son sistemas que aprovechan el recurso solar mediante el empleo de superficies reflectivas, generalmente espejos, que redirigen la radiación normal directa (DNI, por sus siglas en inglés) hacia un receptor, mismo que contiene un fluido de transferencia de calor (HTF) en el que se transforma la energía de la radiación solar en energía térmica. Los países con más desarrollo en este campo tecnológico son Estados Unidos, España y China, con una generación de potencia superior a los 4 [GW] (Peinado Gonzalo, Pliego Marugán, y García Márquez 2019), la Figura 2.4 muestra los esquemas de los concentradores solares empleados en los campos de captación solar y la Tabla 1 resume las principales características de cada tecnología.

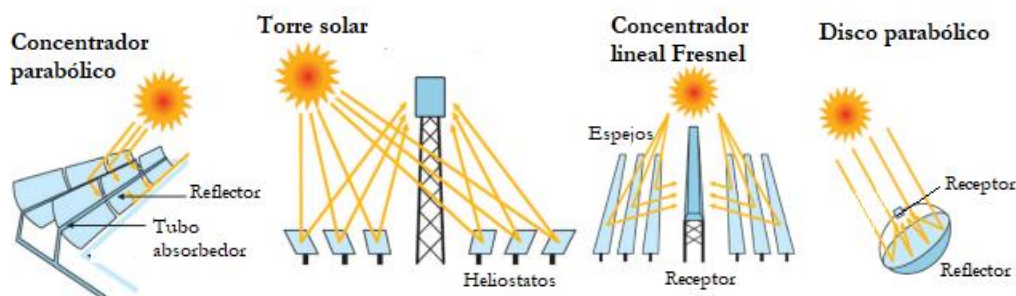


Figura 2.4 Esquemas de la tecnología de concentración solar

Fuente: Peinado Gonzalo et al. 2019

Tabla 1
Características de los tipos de tecnología de concentración solar

Tecnología	Temperatura de operación [°C]	Razón de concentración solar	Eficiencia térmica [%]	Capacidad de operación [MW]
Concentrador parabólico	20-400	15-45	18	10-300
Torre solar	300-565	150-1500	25-28	10-200
Concentrador lineal Fresnel	50-300	10-40	12	10-200
Disco parabólico	120-1500	100-1000	30	0.01-0.025

Fuente: Giovannelli 2015; Malagueta et al. 2014; Peinado Gonzalo et al. 2019; Shahabuddin et al. 2021

Algunos de los retos tecnológicos a los que se enfrentan los equipos mencionados previamente, sin considerar la fluctuación en la irradiación solar, son (Peinado Gonzalo et al. 2019; Shahabuddin et al. 2021):

- Deformación, fracturas y corrosión en el tubo por donde pasa el HTF: el material de esta tubería generalmente es acero con recubrimiento galvanizado para mejorar la absorción de la superficie.
- Problemas en las propiedades térmicas de los materiales del sistema de absorción de calor, esto se ve reflejado en la baja eficiencia termodinámica.

- Mantenimiento y limpieza de los espejos reflectores debido a la acumulación de polvo.

Los problemas mencionados anteriormente son en su mayoría causados por factores climáticos, propiedades de los materiales, diseño y construcción del equipo, entre otros; por lo que la solución a estos inconvenientes se encuentra en etapa de investigación y prueba a través de prototipos o simulaciones, centrándose en el diseño del receptor, ciclo termodinámico del fluido de transferencia de calor (HTF) y materiales de construcción.

2.3. Concentrador solar tipo Fresnel

El concentrador lineal Fresnel utiliza la tecnología desarrollada por Agustín-Jean Fresnel (1788-1827) que establece la división de un lente reflector en varias partes que imitan el radio de curvatura del lente original y cuyo reflejo se direcciona hacia un foco central (Zhang et al. 2013). Los concentradores lineales Fresnel tradicionales tienen reflectores primarios ubicados a nivel del suelo, evitando las cargas mecánicas debido al viento y aprovechando la radiación solar directa y difusa, dicha radiación se refleja hacia un receptor estático ubicado algunos metros sobre el nivel del suelo y generalmente en el centro de los reflectores primarios. La Figura 2.5 muestra un esquema típico de un concentrador lineal Fresnel.

Los reflectores primarios pueden ser planos o curvos, sin embargo, a pesar de que los reflectores planos son más económicos la eficiencia óptica de los mismos es inferior a la de los reflectores curvos (Bellos 2019); de acuerdo con estudios realizados por Benyakhlef et al. (2016), una deflexión de 2 [mm] es óptima en la geometría de los reflectores primarios.

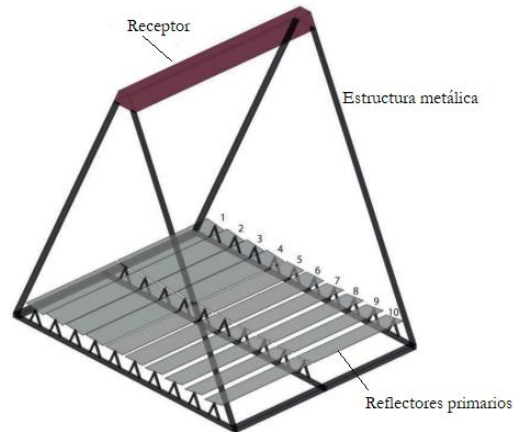


Figura 2.5 Esquema de un concentrador lineal Fresnel tradicional

Fuente: Autor

El receptor de un concentrador lineal Fresnel usualmente contiene una o más tuberías por donde circula el HTF rodeadas de un material reflector, conocido como reflector secundario (Bellos 2019). La geometría del receptor depende principalmente del número de tuberías para transporte de HTF que se requieran, la Figura 2.6 muestra las principales geometrías de receptores utilizados a nivel industrial y la Tabla 2 describe las características de estos.

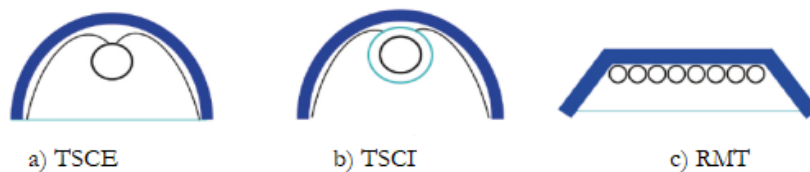


Figura 2.6 Geometría de los receptores lineales Fresnel convencionales

Fuente: Bellos 2019; Venegas y Barraza 2019

Tabla 2
Características de los receptores utilizados en concentradores
Fresnel

Tubería simple con cubierta externa	Tubería simple con cubierta interna	Receptor con múltiples tuberías
El uso de una tubería única disminuye el área y peso del receptor	El uso de una tubería única disminuye el área y peso del receptor	Permite mayor calentamiento del HTF a través de la circulación múltiple del mismo dentro de las tuberías
La cubierta de vidrio reduce las pérdidas de calor por convección dentro del receptor	Es necesario el uso de reflectores secundarios para concentrar la radiación solar en el tubo de transporte	No es necesario el empleo de reflectores secundarios
		La cubierta de vidrio reduce las pérdidas de calor por convección dentro del receptor

Fuente: Haberle et al. 2014; Venegas y Barraza 2019

El fluido de transferencia de calor (HTF) utilizado en los concentradores solares, mencionados previamente, usualmente es agua, o vapor para la generación de vapor sobresaturado junto a un sistema que emplee una turbina con ciclo Rankine (Bellos 2019). Con respecto al material que cubre las tuberías de transporte se considera que este debe optimizar la relación entre la energía absorbida y emitida dado que algunos materiales absorben hasta el 96% de la radiación solar incidente pero solo emiten el 7% a través de la radiación infrarroja, disminuyendo así la eficiencia de los reflectores

secundarios; uno de los materiales más empleados en estas aplicaciones es el cromo negro depositado electroquímicamente (Venegas y Barraza 2019). Esta tecnología de captación solar tiene varias ventajas y desventajas con respecto a otros tipos de concentradores, la Tabla 3 resume estos factores.

Tabla 3
Ventajas y desventajas de los concentradores lineales Fresnel

Ventajas	Desventajas
Tiene un receptor fijo que no requiere elementos flexibles como rótulas esféricas	Requiere varios metros de longitud de receptor
Se considera que tiene una carga eólica baja, lo que permite instalar estructuras metálicas livianas	Tiene un rendimiento óptico inferior por área de apertura
Su configuración geométrica es ajustable a las necesidades del usuario y al espacio de instalación disponible	La producción anual de energía es menor que la obtenida con concentradores parabólicos
El uso de espejos planos como reflectores primarios facilita su limpieza y mantenimiento	

Fuente: Haberle et al. 2014; Kumar, Shrivastava, y Untawale 2015

Para el caso particular de Ecuador, la energía obtenida a partir de concentradores lineales Fresnel puede ser empleada para varios procesos industriales, entre los que destacan:

- Secado de alimentos: se puede utilizar el concentrador como equipo auxiliar para la generación de calor que alimente a una cámara de secado en áreas rurales del país.
- Calor de proceso: el calor puede ser empleado en plantas de procesamiento de alimentos donde se requiera esterilización, pasteurización, calefacción, entre otros.
- Industria textil: limpieza de telares y planchado de productos finales.

2.4. Calor solar para procesos industriales

Debido al constante crecimiento de la demanda energética a nivel mundial, el sector industrial ha tenido un impacto significativo en su desarrollo tecnológico y económico (Sharma et al. 2017), por lo que constantemente se están implementando alternativas para satisfacer las necesidades energéticas. A nivel mundial, entre el 32-35% de la energía generada es direccionada al sector industrial (Kumar, Hasanuzzaman, y Rahim 2019). La Figura 2.7 expone un promedio aproximado para la distribución energética por sector a nivel mundial, se puede apreciar que a nivel industrial el mayor uso energético es para proyectos térmicos de alta temperatura, es decir, aplicaciones sobre los 400 °C.

El uso del calor generado a partir del aprovechamiento del recurso solar reduce la dependencia a combustibles fósiles y disminuye los gases contaminantes y de efecto invernadero emitidos al ambiente, sin embargo, debido a los requerimientos tecnológicos todavía existen grandes limitantes para su aplicación a gran escala en algunos sectores industriales.

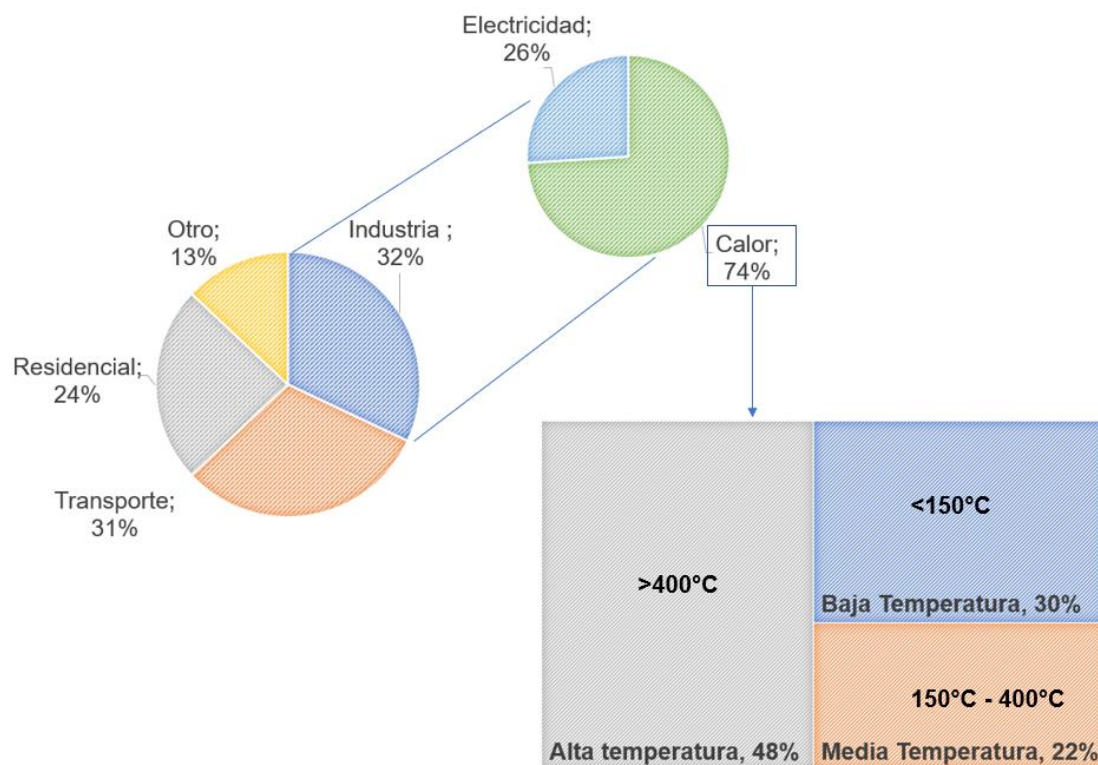


Figura 2.7 Distribución de la energía generada a nivel mundial por sector

Fuente: Kumar et al. 2019; Solar Payback 2017

La Figura 2.8 muestra algunos ejemplos de aplicaciones asociadas al área industrial o procesos que pueden utilizar como energía de entrada una fuente de calor generado a partir del recurso solar. La selección adecuada de la tecnología para el aprovechamiento del recurso solar es clave para satisfacer la demanda energética, los principales parámetros a considerar en esta selección son (Andersen y Furbo 2009; Horta et al. 2016; Sharma et al. 2017):

- Temperatura de operación

- Eficiencia del concentrador solar
- Energía solar disponible en la zona de actuación
- Costo de instalación y mantenimiento

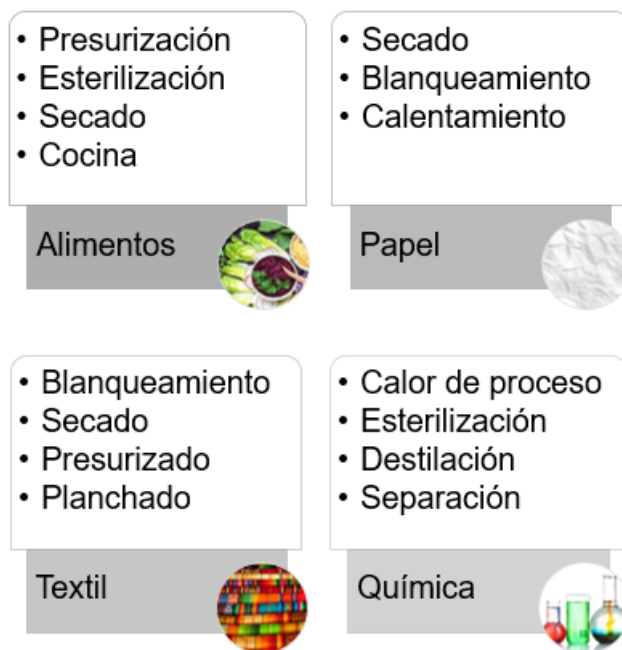


Figura 2.8 Aplicaciones del calor generado a partir del recurso solar

Fuente: Kalogirou 2004; Kumar et al. 2020; Sharma et al. 2017

Los concentradores solares que emplean aire como fluido de transferencia de calor (HTF) son principalmente usados en el procesamiento de alimentos, reemplazando o disminuyendo el consumo de combustible fósil para el proceso de secado (Kramer 2012). La Figura 2.9 muestra un esquema de generación de calor directa como un sistema auxiliar conectado en paralelo que puede ser empleado para satisfacer la demanda energética en el sector industrial. La principal ventaja de esta configuración es el sistema de operación continuo, es decir, si el concentrador solar no satisface la

demanda energética, el sistema auxiliar complementa la energía faltante para que el consumo energético sea continuo.

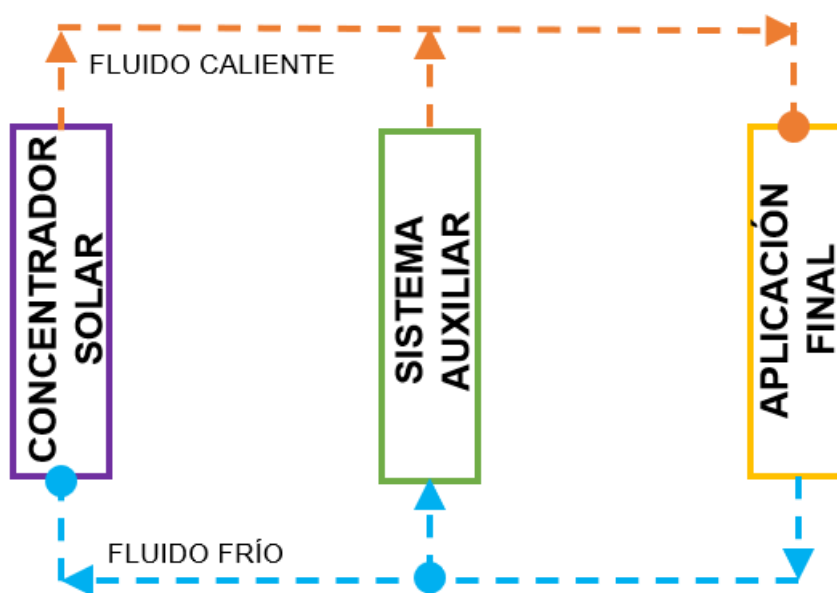


Figura 2.9 Esquema de generación directa de calor con un sistema auxiliar conectado en paralelo

Fuente: Sharma et al. 2017

Respecto al ámbito económico, Abdel-Dayem y Mohamad (2001) estudiaron la implementación de un sistema de calor para procesos industriales en el sector textil, y determinaron que el período de recuperación de la inversión (PRI) es de aproximadamente 6 años; de manera similar, Sharma et al. (2017) determinaron que el periodo de recuperación de la inversión en una industria de alimentos, que utiliza calor de proceso a bajas temperaturas (60-80 [°C]), es de aproximadamente 3 años.

A pesar de que el recurso solar disponible es suficiente para satisfacer la demanda energética del sector industrial, la capacidad de aprovechamiento instalada es

pequeña, esto se debe a varias razones, entre las que se puede citar (Abraham y Gundimeda 2014; Sharma et al. 2017):

- Dificultad para integrar los sistemas de aprovechamiento solar a los procesos térmicos instalados.
- Alto costo de inversión inicial, especialmente para industrias que están en etapa de desarrollo.
- Falta de personal capacitado para la elaboración de diseños, instalación, programas de control, mantenimiento, de los equipos de captación solar.
- Falta de las políticas necesarias que impulsen el desarrollo tecnológico.

De manera general, la integración de sistemas de aprovechamiento solar para la generación de calor de procesos es un factor clave para la reducción de la dependencia energética a combustibles fósiles, disminución del impacto ambiental y diversificación de la matriz energética de un país.

2.5. Aplicación directa de un concentrador lineal Fresnel: Secado de alimentos

En Ecuador, mayoritariamente se utiliza gas licuado de petróleo (GLP) y combustible diésel para los equipos de secado agroindustrial; su uso se debe, principalmente, a su bajo costo de adquisición debido al subsidio del Estado, sin embargo, las medidas tomadas por el Ministerio de Energías para regularizar el consumo del GLP y disminuir paulatinamente el subsidio en combustibles tradicionales ha motivado la implementación de tecnología cuya fuente primaria sean recursos renovables; cabe destacar que esta tecnología no se basa en parámetros técnicos nuevos, sino en la réplicas de modelos actualmente existentes que son optimizados en geometría, materiales, pérdidas de calor, entre otros.

Los sistemas de secado no convencionales son una alternativa tecnológica en países tropicales o subtropicales (Fudholi et al. 2015), estos equipos se basan en procesos industriales en los que los alimentos son deshidratados en condiciones higiénicas y que permiten el ahorro de energía, tiempo y área de secado necesaria (Lutz et al. 1987; Sharma et al. 2009). Un secador solar para alimentos está compuesto por dos partes principales; captador solar donde el aire que ingresa es calentado por efecto de la radiación y una cámara de secado, (Stiling et al. 2012). En la Figura 2.10, se muestra un sistema adaptando un concentrador Fresnel en vez de un colector solar de aire, en todo caso se necesita un sistema de control para regular la temperatura y velocidad del aire caliente.

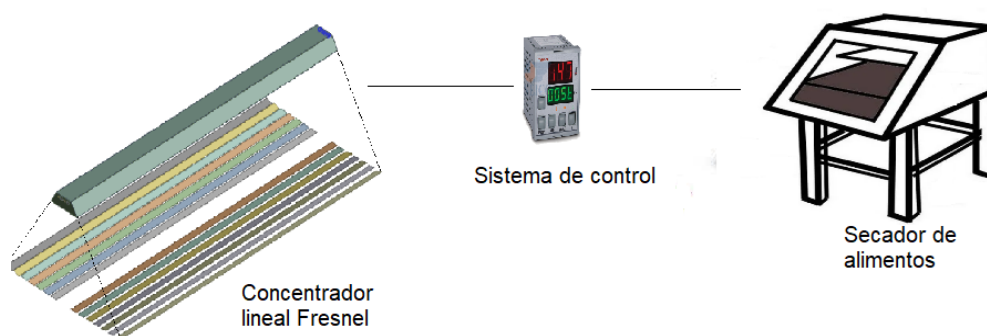


Figura 2.10 Esquema de funcionamiento del secador agrícola con un concentrador Fresnel como sistema auxiliar

Fuente: Portal Frutícola 2016

La demanda energética del sistema de secado en el sector agrícola depende de la humedad inicial del producto, y de la calidad final del mismo, para ello es necesario considerar que el crecimiento microbiano debe ser mínimo, además las propiedades organolépticas deben mantenerse (Asoegwu et al. 2016); la Figura 2.11 muestra los parámetros de influencia para el secado de alimentos.

A partir de la literatura , se presenta que el requerimiento energético necesario para el secado de un producto está en orden de 3000 – 8000 [kJ] por cada kilogramo de agua que debe evaporarse, esto representa aproximadamente 0.8 – 2.2 [kWh] por cada kilogramo de producto (Delgado-Plaza et al. 2020).

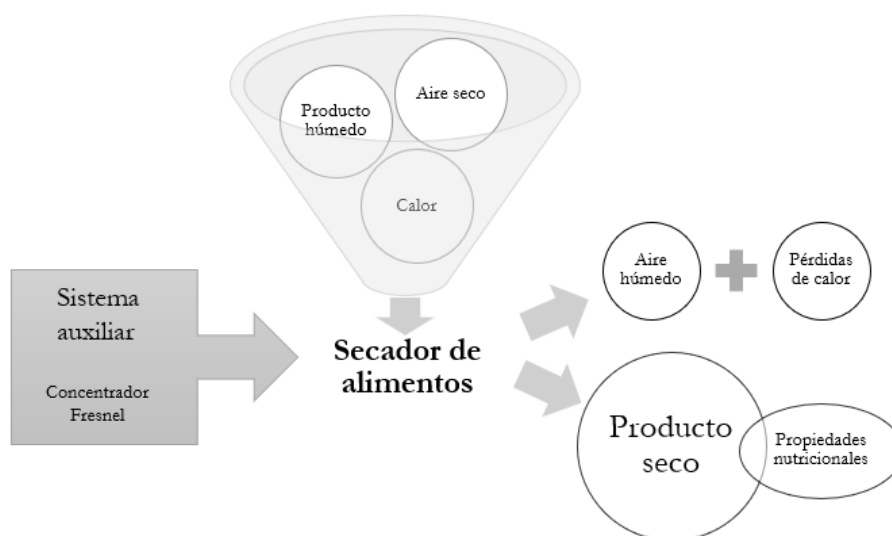


Figura 2.11 Esquema del proceso de un secador solar en aplicaciones agrícolas

Fuente: Delgado, Peralta, y Barriga 2018; Fudholi et al. 2015

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), establece que el consumo de un equipo de secado varía entre 1010-1030 [kcal], analizándolo a través de los siguientes factores energéticos:

- | | |
|--|----------------|
| - Calor utilizado para la evaporación de 1 [kg] de agua | 600 [kcal] |
| - Calor sensible que se pierde en el aire | 300-320 [kcal] |
| - Pérdidas de calor por conducción, radiación y convección con el exterior | 30 [kcal] |
| - Calor transferido al alimento | 80 [kcal] |

Para determinar el consumo de energía requerida en el proceso de secado de cualquier producto, es necesario calcular el porcentaje de agua que debe evaporarse, para ello, es necesario conocer la humedad inicial y humedad final del producto. En la Ecuación 1 se presenta la formula representativa.

$$[\%] H_2O_{Evap} = \frac{H_{final} - H_{inicial}}{100 - H_{inicial}} * 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

En base a lo mencionado, el estudio está enfocado al análisis de concentradores Fresnel para generación de calor a un secador de granos, por lo tanto, en la Tabla 4 se muestran valores de humedad inicial y final para algunos granos cosechados en la región Costa del Ecuador.

Por otra parte, se deben considerar varios parámetros para el control del secado agroindustrial, es por ello que Cabascango y De la Vega (2018) definen que para asegurar la calidad del producto debe considerarse el tamaño, forma y disposición dentro de la cámara de secado, además, los autores mencionan que la temperatura adecuada para deshidratar alimentos varía entre 40 – 50 [°C], temperaturas inferiores permiten el crecimiento microbiano y temperaturas superiores cocinan los alimentos afectando sus propiedades nutritivas (Rodríguez y Bartosik 2006). Estos parámetros no serán considerados dentro del presente estudio

Tabla 4

**Consumo energético de granos cosechados en la región Costa
del Ecuador por cada 100 [kg] de producto**

Producto	$H_{inicial}$ [1]	H_{Final} [1]	H_2O	Consumo energético	Tiempo de secado [2] [3]	Consumo energético
	[%]	[%]	[%]	[kcal]	[h]	[kcal/h]
Arvejas desgranadas	72	14	67.44	68116.28	17	4006.84
Choclo entero	72	14	67.44	68116.28	17	4006.84
Choclo desgranado	77	14	73.26	73988.37	22	3363.11
Garbanzo, fréjol	68	14	62.79	63418.60	14	4529.90
Habas enteras	82	14	79.07	79860.47	30	2662.02
Lentejas	65	14	59.30	59895.35	12	4991.28

Fuente: [1] Cabascango y De la Vega 2018; [2] De Michelis y Ohaco 2015; [3]
Miranda Lugo et al. 2018

CAPÍTULO 3

3. Metodología

3.1. Condiciones de operación del secador agrícola

El modelo a desarrollar debe satisfacer la demanda energética del secador agrícola de zonas rurales de la región Costa del Ecuador específicamente para el secado de los granos indicados en la Tabla 4.

En la Tabla 5 se muestran los parámetros de operación seleccionados para el modelo, estos fueron considerados en base a la búsqueda y revisión bibliográfica realizada previamente.

Tabla 5
Parámetros de operación del modelo de secador agrícola

Producto	Lentejas
Masa de producto a secar [kg]	100
Consumo energético [kcal/h]	4991.28
Temperatura de operación [°C]	50
Tiempo de secado [h]	12

Fuente: Autor

El fluido de transferencia de calor a emplearse en el concentrador lineal Fresnel será **aire**, mismo que saldrá del captador solar hacia la cámara de secado. Las propiedades de este fluido a temperatura ambiente, 23[°C], se muestran en la Tabla 6. El caudal de aire caliente necesario para satisfacer la demanda energética del secador se calcula

empleando la Ecuación 2 (De Dios y FAO 1996), para el caso de estudio, el caudal de aire necesario será de $10.874 \left[\frac{m^3}{min}\right]$, o su equivalente $0.153 \left[\frac{kg}{s}\right]$. Considerando que el aire caliente va a transportarse desde el concentrador lineal Fresnel hacia la cámara de secado, y que durante este proceso existen pérdidas de calor que dependen de la distancia entre equipos, tuberías de transporte utilizadas, condiciones climáticas, entre otras, se sobredimensiona el caudal necesario en un 25%, es decir, el modelo a simularse utiliza como referencia un caudal de aire, a la entrada del concentrador lineal Fresnel, de 0.2 [kg/s] .

$$q_{aire} \left[\frac{m^3}{min}\right] = \frac{\text{Consumo energético} \left[\frac{kcal}{h}\right]}{(T_{secado} - T_{ambiente}) [^\circ C] * 17} \quad \text{Ecuación 2}$$

Tabla 6
Propiedades del aire a temperatura ambiente

Fluido	Aire	
Masa molar	28.96	[kg/kmol]
Densidad	1.185	[kg/m ³]
Viscosidad dinámica	1.831E-05	[kg/m.s]
Conductividad térmica	2.610E-02	[W/m.K]
Calor específico	1006.43	[J/kg.K]

Fuente: ANSYS 2012a

Con respecto a las condiciones ambientales a las que estará sometido el captador solar, se considera que el equipo será instado en Ecuador continental, latitud -1.8312 y longitud -78.1834 (El Tiempo 2022). En la Figura 3.1 se aprecia que el recurso solar anual promedio no presenta fluctuaciones importantes a través del tiempo, por lo que dichos valores pueden ser empleados como dato de ingreso para los procesos de

simulación. Los valores de las condiciones ambientales, para el año 2021, de la zona de actuación, es decir, en la provincia de Guayas; se muestran en la Tabla 7.

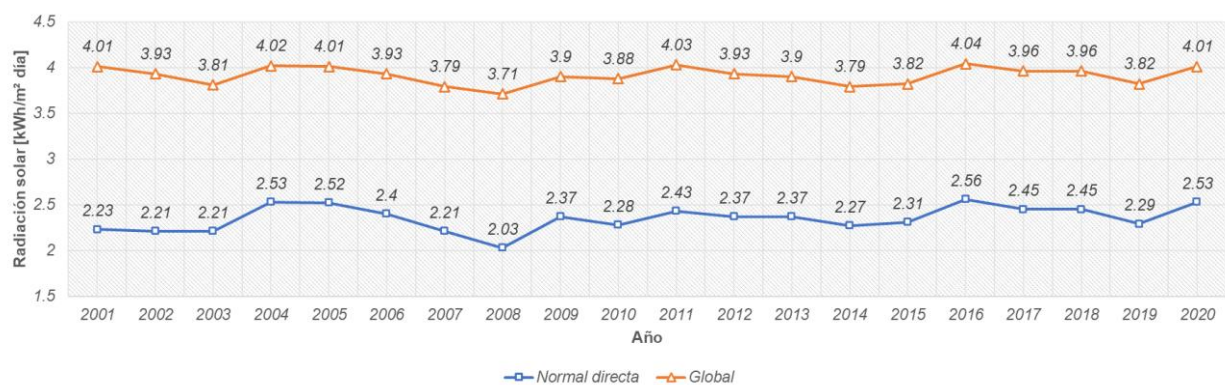


Figura 3.1 Variación de la radiación solar en el Ecuador a través del tiempo

Fuente: NASA 2021

Para garantizar que el concentrador solar sea viable para la aplicación deseada es necesario realizar un balance energético del mismo, este balance se muestra en la Ecuación 3, Ecuación 4 y Ecuación 5, para llegar al mismo se utilizó el diagrama de resistencias térmicas mostrado en la Figura 3.2 y las siguientes consideraciones:

- Los reflectores secundarios de la cavidad receptora están aislados térmicamente, por lo que el intercambio de calor con el medio externo es despreciable.
- La cubierta de vidrio permite la entrada de la radiación solar concentrada, y de manera simultánea impide la salida de la radiación emitida por las superficies de la cavidad receptora.
- El calor incidente en las tuberías de transporte del HTF es transferido en su totalidad al fluido.

$$Q_{entrada} = Q_{conv_{amb}} + Q_{cond_{vidrio}} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$Q_{cond_{vidrio}} = Q_{conv_{aire-cavidad}} + Q_{rad_{arie-cavidad}} = Q_{cond_{tuberias}} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$Q_{cond_{tuberias}} = Q_{conv_{HTF}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Tabla 7
Condiciones climáticas en la provincia de Guayas – Ecuador

Mes	Irradiación solar promedio	$T_{ambiente}$	Velocidad del viento	Luz diurna	Insolación
	$S_a \left[\frac{W}{m^2} \right]$	$T_a [^{\circ}C]$	$V_v \left[\frac{km}{h} \right]$	[hora]	[hora]
Enero	551.1	26.2	9.4	12.2	6.8
Febrero	599.7	26.0	9.8	12.2	6.8
Marzo	655.3	26.3	9	12.1	7.2
Abril	596.6	26.5	10	12.1	7.6
Mayo	546.1	25.6	13.5	12	8.1
Junio	471.2	24.1	13.3	12	8.5
Julio	407.5	23.5	14.6	12	8.7
Agosto	395.4	23.4	15.1	12	9.3
Septiembre	487.4	23.6	15.9	12.1	9.1
Octubre	546.1	23.8	15.6	12.2	9.5
Noviembre	463.2	24.4	14.8	12.2	10
Diciembre	560.2	25.8	12.9	12.2	7.9
Promedio	523.3	24.9	12.8	12.1	8.3

Fuente: Arce y Reyna 2020; NASA 2021; Weather Atlas 2021

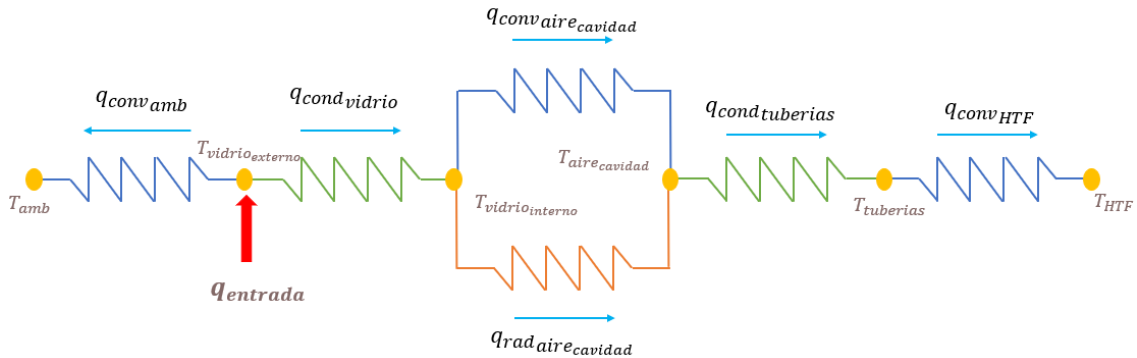


Figura 3.2 Diagrama de resistencias térmicas de la cavidad receptora de un captador solar

Fuente: Autor

El calor entregado por el concentrador lineal Fresnel se puede obtener mediante la Ecuación 6, este parámetro depende del tipo y temperatura de salida del fluido de transferencia de calor, para el caso de estudio este fluido es aire y sus propiedades se muestran en la Tabla 6. El caudal másico se calculó utilizando la Ecuación 2 y su valor es de $0.2 \left[\frac{kg}{s} \right]$, finalmente, la variación de la temperatura dependerá del producto agrícola a deshidratarse.

$$Q_{necesario}[W] = \dot{m}_{HTF} * c_{pHTF} * \Delta T \quad \text{Ecuación 6}$$

3.2. Geometría del concentrador lineal Fresnel

La estructura del concentrador debe cumplir con varios requisitos de diseño y construcción, entre los principales se tiene (Venegas y Barraza 2019):

- Soporte adecuado de los espejos y de los motores de seguimiento solar en caso de ser instalados.

- Soporte del receptor, de las tuberías de transporte de HTF y del HTF durante la operación del concentrador.
- Contrarrestar las fuerzas ejercidas por el viento sobre la estructura.

Tomando en consideración los requisitos mencionados se propone una estructura en forma de "A", ver Figura 3.3; la misma está construida a partir de vigas rígidas de acero, siendo su principal ventaja la facilidad de instalación. Los reflectores primarios son espejos planos, cuyo objetivo principal es reflejar y concentrar la radiación solar directa hacia el receptor, la cantidad de energía solar reflejada y absorbida depende del ángulo de inclinación de los espejos respecto al plano horizontal donde serán instalados (Li et al. 2017).



Figura 3.3 Estructura propuesta para el soporte del receptor

Fuente: Haberle et al. 2014

Los parámetros geométricos del receptor solar son considerados a partir del estudio desarrollado por Bellos, Tzivanidis, y Papadopoulos (2018), dichos autores realizaron una comparación del comportamiento térmico de un captador solar Fresnel utilizando

varios fluidos de transferencia de calor; los parámetros antes mencionados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8
Parámetros geométricos del concentrador lineal Fresnel

Parámetro	Nomenclatura	Dimensión [m]
Altura del receptor	F	3.0
Longitud del receptor	L	6.0
Ancho de los reflectores primarios	W_0	0.15
Distancia entre los reflectores primarios	D_w	0.20

Fuente: Bellos et al. 2018

Con base en los parámetros antes descritos y considerando la facilidad de instalación que debe tener el equipo se plantea para el modelo inicial del concentrador lineal Fresnel el uso de 10 reflectores primarios, localizados de manera simétrica con relación al receptor, para referencia se puede ver la Figura 3.4. El cálculo del ancho total del concentrador lineal se realiza a partir de la Ecuación 7 (Bellos 2019), obteniendo un valor de 2.15 [m].

$$W_{tot} = 2ND_w + W_0 \quad \text{Ecuación 7}$$

La distancia focal de cada espejo plano (F_i) es calculada mediante la Ecuación 8 (Bellos 2019), el ángulo de posición de cada espejo con respecto al receptor se calcula aplicando la Ecuación 9 (Bellos 2019) y finalmente el ángulo de inclinación del espejo con respecto a la horizontal del terreno de instalación se calcula con la Ecuación 10 (Bellos 2019). Dado que el país se encuentra en la línea ecuatorial, el ángulo θ_T es 0°

(Alvarez y Serrano 2017); los resultados de los parámetros descritos previamente se muestran en la Tabla 9.

$$F_i = \sqrt{F^2 + i^2 D_w^2} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\cos(\varphi) = \left[1 + i^2 \left(\frac{D_w}{F} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\beta = \frac{\varphi - \theta_T}{2} \quad \text{Ecuación 10}$$

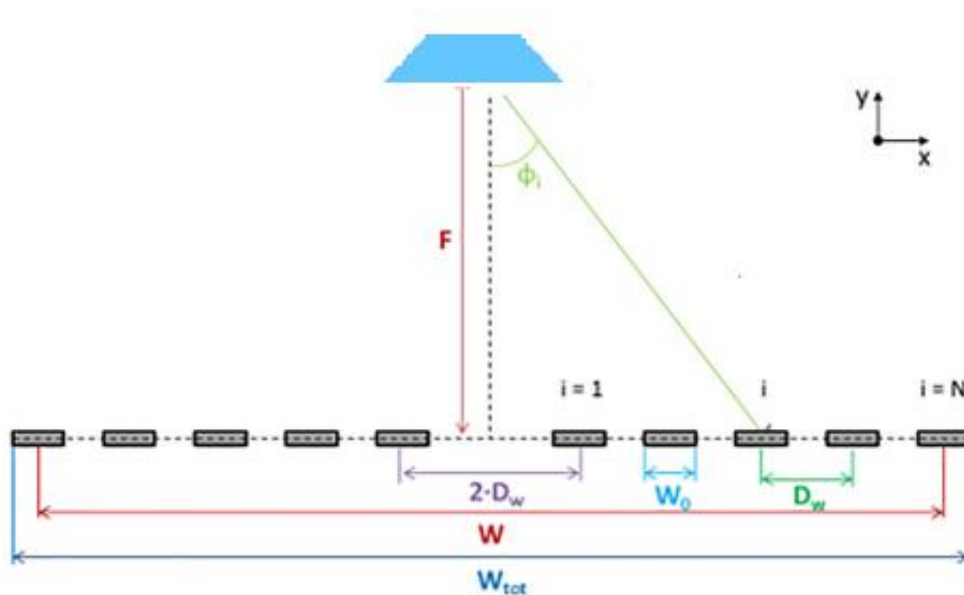


Figura 3.4 Modelo simplificado de un concentrador Fresnel con espejos planos

Fuente: Bellos 2019

Tabla 9
Resultados de los parámetros de posición de los reflectores
primarios con respecto al receptor central

Reflector	F_i	$\text{Cos}(\varphi)$	φ [°]	β [°]
1	2.010	0.995	5.711	2.855
2	2.040	0.981	11.310	5.655
3	2.088	0.958	16.699	8.350
4	2.154	0.928	21.801	10.901
5	2.236	0.894	26.565	13.283

Fuente: Autor

Con relación al receptor central, se plantea un diseño trapezoidal con 4 tuberías para transporte de HTF, la base para la geometría del receptor es tomada del estudio realizado por Moghimi et al. (2016), dichos autores utilizan este diseño basados en las cavidades receptoras que ofrece la empresa de servicios energéticos AREVA. La Figura 3.5 muestra la vista frontal de la geometría del receptor trapezoidal.

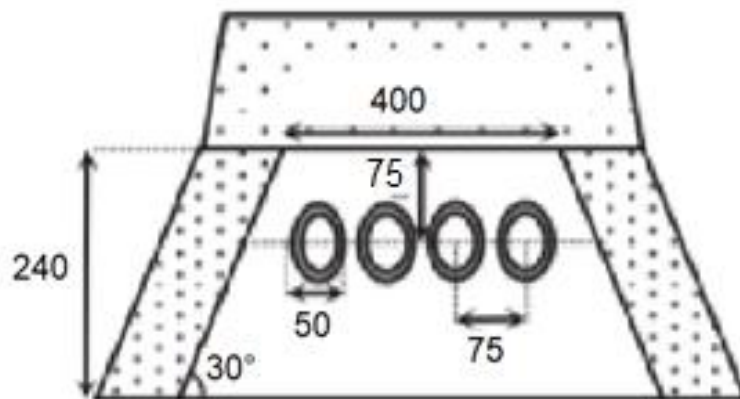


Figura 3.5 Geometría del receptor trapezoidal del concentrador Fresnel. Dimensiones en [mm]

Fuente: Moghimi et al. 2016

3.3. Modelo óptico y térmico

La transferencia de calor desde los reflectores primarios hacia el HTF pasa por procesos de conducción, convección y radiación; la conducción se da en el vidrio del receptor y en las tuberías de transporte, la convección entre el ambiente y la cubierta de vidrio y en el HTF. Finalmente, la radiación se transmite entre las superficies dentro del receptor como energía en forma de ondas electromagnéticas y en la radiación solar reflejada por los reflectores primarios. Una de las características de la energía transmitida por radiación es que no se requiere un medio material para su propagación, pero su intensidad y dirección de flujo depende de la materia con la que interactúa (Inzunza 2015).

Para determinar las características del comportamiento del concentrador lineal con respecto al modo de transferencia de calor por radiación se consideró un modelo de dos bandas espectrales, la primera banda espectral que representa la radiación solar

es de onda corta (OC) ($\gamma < 2.5 [\mu m]$), mientras que la banda espectral de onda larga (OL) ($\gamma > 2.5 [\mu m]$) representa la radiación térmica de las superficies que componen la cavidad receptora. La cubierta de vidrio del receptor tiene dos comportamientos; para la radiación OL se comporta como un sólido opaco que impide la salida de la radiación, mientras que para OC es una superficie semitransparente que permite el ingreso de la radiación solar concentrada hacia la cavidad receptora (Sarmiento 2007); la Figura 3.6 muestra un esquema del comportamiento en ambas bandas espectrales para un receptor trapezoidal.

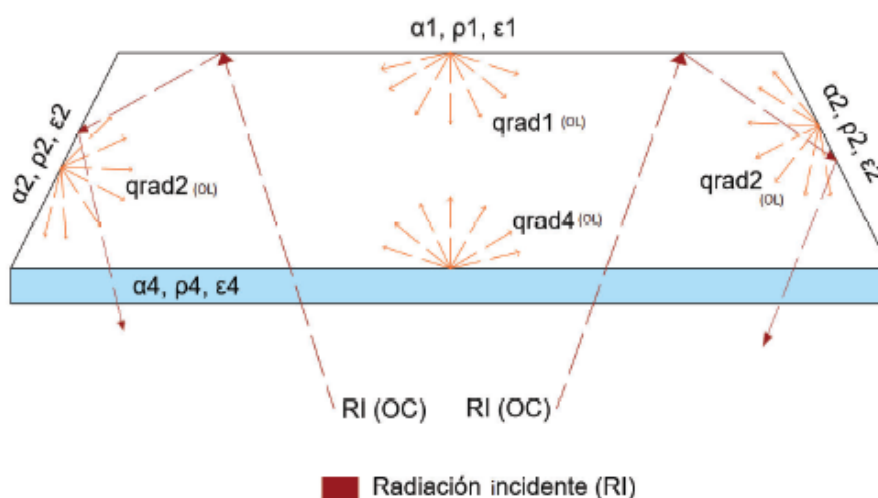


Figura 3.6 Radiación de onda corta y larga en un receptor trapezoidal

Fuente: Jaramillo y Ordoñez 2017

Las propiedades de radiación de los materiales que componen el concentrador lineal Fresnel se muestran en la Figura 3.7, estas propiedades son (Modest 2013):

- Reflectancia (ρ): fracción de la energía incidente que es reflejada hacia el entorno.

- Absortancia (α): fracción de la energía incidente que es absorbida por una superficie.
- Transmitancia (τ): fracción de la energía incidente que es transmitida a través de una superficie.
- Emitancia (ε): fracción de la energía incidente que emite una superficie, depende de la temperatura del cuerpo. El punto de referencia para esta propiedad es la energía emitida por un cuerpo negro ($\alpha=\varepsilon=1$) a la misma temperatura.

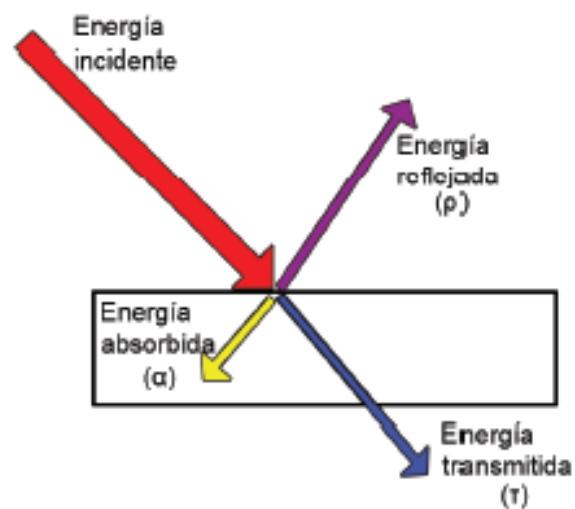


Figura 3.7 Proceso de absorción, reflexión y transmisión de energía en una superficie

Fuente: Jaramillo y Ordoñez 2017

Todas las superficies que componen el concentrador lineal satisfacen la Ecuación 11, siendo la energía incidente la sumatoria de la energía absorbida, reflejada y transmitida. Adicionalmente, se considera que todas las superficies de la cavidad

receptora cumplen la ley de Kirchhoff, misma que determina que la energía absorbida y emitida por un cuerpo están en equilibrio, es decir, $\alpha = \varepsilon$ (Incropera et al. 2002); mientras que los reflectores primarios tienen reflexión pura, es decir, $\rho = 1$. Los valores de absorptancia, reflectancia, transmitancia y emitancia para las superficies del concentrador lineal se muestran en la Tabla 10.

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Ecuación 11

Tabla 10
Valores de las propiedades ópticas de las superficies del
concentrador lineal Fresnel

Superficie	Reflectancia	Absortancia	Transmitancia	Emitancia
Reflectores primarios	1	0	0	1
Cubierta de vidrio	0	0	1	1
Tuberías de transporte	0.05	0.05	0.90	0.95
Reflectores secundarios	1	0	0	1

Fuente: Moghimi et al. 2016

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el aire y la cubierta de vidrio se considera convección natural, por lo que el fluido más cercano a la superficie tiende a calentarse o enfriarse, generando un gradiente en su temperatura y densidad; este proceso se muestra en la Figura 3.8. El cálculo del coeficiente de convección depende del empleo de los siguientes números adimensionales (Incropera et al. 2002):

- Número de Nusselt: permite determinar el incremento de la transferencia de calor desde una superficie y el fluido que la rodea.

$$Nu = \frac{hL_c}{k_f} \quad \text{Ecuación 12}$$

- Número de Reynolds: relaciona las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas de un fluido para definir el régimen del mismo, ya sea este laminar o turbulento.

$$Re = \frac{\rho_f V_f L_c}{\mu_f} \quad \text{Ecuación 13}$$

- Número de Prandtl: relaciona la velocidad de difusión de la cantidad de movimiento con la velocidad de difusión de calor.

$$Pr = \frac{\mu_f c_{pf}}{k_f} \quad \text{Ecuación 14}$$

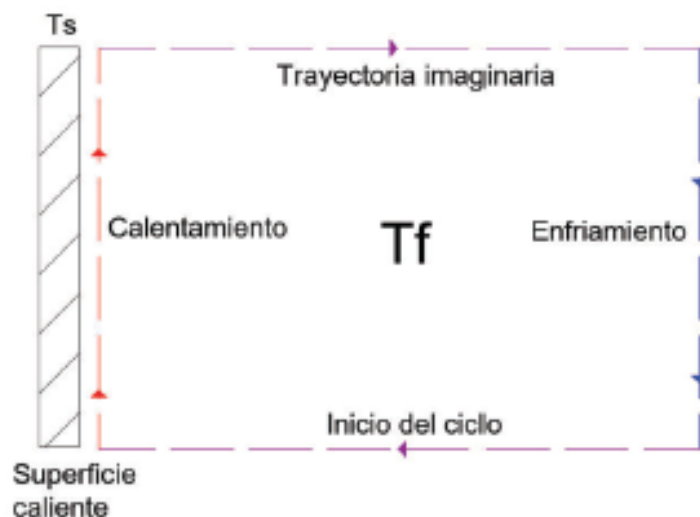


Figura 3.8 Proceso de convección externa natural

Fuente: Jaramillo y Ordoñez 2017

Con el fin de determinar el coeficiente de convección entre el ambiente y la cubierta de vidrio del receptor, Moghimi, Craig, y Meyer (2015) establecen que, en un modelo simplificado, el valor es constante a pesar de las variaciones en las corrientes del aire. La correlación de convección para este caso se muestra en la Ecuación 15 (Coronel 2005).

$$Nu = 0.037Re^{4/5} Pr^{1/3} \quad \text{Ecuación 15}$$

Considerando la velocidad del aire promedio en la zona de interés, los números adimensionales de la Ecuación 13 y Ecuación 14, las propiedades del aire ambiente de la Tabla 6, se obtiene que el coeficiente de transferencia de calor por convección natural entre la cubierta de vidrio y el ambiente es:

$$h_v = 22.036 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

3.4. Simulación CFD

La fluidodinámica computacional (CFD) se basa en el análisis numérico de flujos, transferencia de calor, turbulencia, reacciones químicas mediante simulaciones. Esta herramienta tecnológica permite obtener soluciones de problemas que no pueden analizarse de manera analítica o experimental, y además reduce los tiempos de estudio y los costos de investigación. El análisis CFD es ampliamente utilizado en la industria de procesos, aerodinámica, hidrodinámica, ingeniería biomédica, desarrollo de prototipos, entre otros (Morato 2019). El análisis CFD tiene tres etapas principales, independientes del programa computacional seleccionado:

1. Preproceso: definición de la geometría, mallado y condiciones de frontera.
2. Resolución de ecuaciones: análisis numérico de las ecuaciones que gobiernan el fluido de estudio según las condiciones de frontera establecidas previamente.
3. Postproceso: evaluación numérica y gráfica de las simulaciones obtenidas.

Para este trabajo se empleará el programa computacional ANSYS Fluent 2021 R2, versión estudiantil, se realizará la simulación en estado estable y transitorio del comportamiento térmico de un concentrador Fresnel utilizado como sistema auxiliar para el secado de productos agrícolas. Este recurso fue seleccionado con base en los resultados obtenidos en diversas investigaciones, del recurso computacional disponible y tiempo de simulación empleado.

La resolución del problema planteado se realizará mediante una solución basada en la presión, es decir, se emplearán métodos de proyección en la ecuación de la continuidad detallada en la Ecuación 16 (ANSYS 2012a).

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_f u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_f v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_f w) = 0 \quad \text{Ecuación 16}$$

La ecuación de conservación de la cantidad de movimiento se obtiene a partir de la segunda ley de Newton, donde la sumatoria de las fuerzas que actúan en un fluido es igual a la rapidez del cambio del vector lineal de la cantidad de movimiento de la masa del fluido, esto se expresa matemáticamente con las fórmulas mostradas en la Ecuación 17 (ANSYS 2012a).

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} &= F_x - \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} \right) \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} &= F_y - \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} &= F_z - \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 17}$$

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el movimiento de un fluido a partir de un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales, estas ecuaciones gobiernan todos los fluidos Newtonianos y se obtienen aplicando los principios de la conservación mecánica y termodinámica a un volumen de fluido. Pijush K. Kundu, Cohen, y David R Dowling (2016), establecen que con excepción de ciertos flujos y situaciones específicas no es posible encontrar una solución analítica al conjunto de fórmulas mostradas en la Ecuación 18, por lo que es necesario emplear análisis matemático para determinar una solución aproximada.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y V^2}{x V_F} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \end{aligned}$$

Ecuación 18

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y V^2}{x V_F} \\ = -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial P}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y V^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s)$$

En el programa de simulación CFD, ANSYS Fluent, la conservación de energía está descrita mediante la Ecuación 19, y define que la variación de la energía total de un volumen es igual al trabajo por unidad de tiempo de las fuerzas exteriores que actúan sobre el mismo volumen, más el calor recibido desde el exterior por unidad de tiempo.

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h) = \nabla \cdot (k_f \nabla T) + S_h \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde: $\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}$ = Temperatura temporal.

La resolución de las ecuaciones, descritas anteriormente, se lleva a cabo mediante el método de volúmenes finitos, para ello se discretiza el espacio del fluido formando nuevos volúmenes que se almacenan en nodos (Dávalos, Casa, y Hidalgo 2020), la ecuación diferencial se integra sobre cada volumen de control y su resultado permite resolver los siguientes nodos hasta obtener la convergencia del dominio total.

3.5. Estructura del mallado de simulación

ANSYS Fluent requiere una discretización espacial para poder resolver las ecuaciones que gobiernan los fluidos, para ello utiliza dos tipos de mallado, el estructurado y el no estructurado. Las mallas estructuradas forman cuadriláteros en simulaciones 2D y hexaedros en 3D, la principal ventaja de este método es la orientación de los elementos, ya que se tiene un acceso eficaz a las celdas continuas. Las mallas no estructuradas tienen flexibilidad para adaptarse a geometrías complejas, formando triángulos en simulaciones 2D y tetraedros en 3D (Dávalos et al. 2020). La Figura 3.9 muestra un ejemplo gráfico de los tipos de mallado descritos previamente. Con respecto a la calidad de la malla, el mallado estructurado presenta mejores resultados, sin embargo, el tiempo computacional requerido para la elaboración del mismo es elevado en comparación a la malla no estructurada.

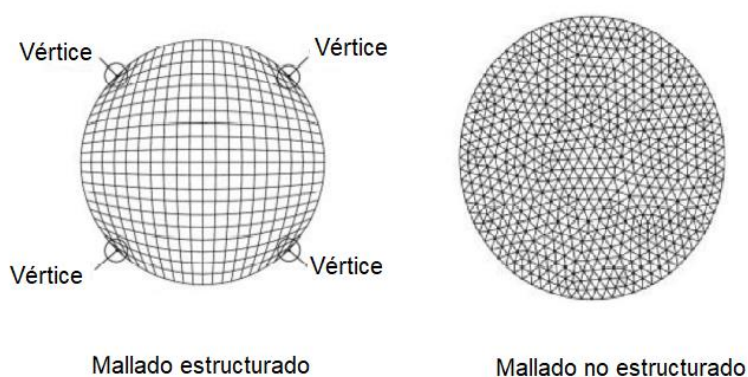


Figura 3.9 Ejemplo gráfico del tipo de mallado empleado por ANSYS Fluent



Fuente: Dávalos et al. 2020

ANSYS Fluent determina la calidad del mallado en función de varios parámetros, a continuación, se detallan algunos de ellos; estos parámetros de evaluación dependen

de la geometría y tamaño del elemento de malla, mismo que se establece a través de los métodos de mallado y de la geometría a simularse. La Tabla 11 muestra los criterios de valoración para la evaluación de la calidad del mallado generado.

- Ortogonalidad: Se mide a partir del ángulo formado por los ejes ortogonales de una cara y los vectores de la dirección de las caras generadas a partir de las aristas.
- Relación de aspecto: Se define como la relación entre sus tamaños en diferentes dimensiones para un elemento específico.
- Oblicuidad: Define la similitud entre el elemento construido y el elemento ideal descrito por su circunferencia circunscrita en 2D o una esfera en 3D.

Tabla 11
Parámetros para la evaluación de la calidad de malla en ANSYS
Fluent

Ortogonalidad					
					
Inaceptable	Mala	Aceptable	Buena	Muy buena	Excelente
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00
Oblicuidad					
					
Excelente	Muy buena	Buena	Aceptable	Mala	Inaceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Fuente: ANSYS 2012b

3.6. Modelos de resolución ANSYS Fluent

Para analizar el comportamiento turbulento del HTF, es necesario conocer los efectos térmicos que genera el mismo, para ello se emplean diversos modelos de turbulencia, los principales que tiene ANSYS Fluent son (ANSYS 2012a; Leonidivna y Torres 2018):

- Modelo laminar: es aplicable con flujos de bajo número de Reynolds ($Re < 1000$), es necesario verificar que tanto la entrada como la salida del fluido mantenga este rango de turbulencia para que los resultados de la simulación sean confiables y se pueda alcanzar la convergencia del modelo.
- Modelo estándar $k - \varepsilon$: modela la ecuación de la energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación turbulenta (ε); se basa en consideraciones empíricas, físicas y argumentos dimensionales. La viscosidad turbulenta se calcula a través de la Ecuación 20. Se considera un modelo robusto, económico en términos de recurso computacional y que brinda una aproximación razonable para un amplio rango de flujos turbulentos. No se recomienda la aplicación de este modelo en los siguientes casos:
 - Flujos con separación de capa límite.
 - Flujos con cambios súbitos en la tasa de deformación media.
 - Flujos sobre superficies curvas.

$$\mu_t = \rho C_\mu * 2k\varepsilon \qquad \text{Ecuación 20}$$

- Modelo estándar $k - w$: es un modelo de dos ecuaciones, modela la energía cinética turbulenta (k) y la tasa específica de disipación de energía (w). Este

modelo permite la simulación de una subcapa viscosa que ofrece una aproximación de resultados en capas con gradientes diversos, su uso se limita ante la sensibilidad en flujos de superficie que generan capas de corte repentinas.

- Modelo de esfuerzos de Reynolds: este modelo considera los efectos de la curvatura aerodinámica, los cambios súbitos en la velocidad de deformación y los flujos secundarios, se puede aplicar este modelo para los siguientes casos de estudio:
 - Flujos rotativos.
 - Flujos con considerable curvatura aerodinámica
 - Flujo flotante.
- Modelos LES (Large-Eddy Simulation): Se emplean en simulaciones dependientes del tiempo o en flujos con altos números de Reynolds, estos modelos resuelven las ecuaciones de turbulencia a gran escala y aproximan el efecto a pequeña escala. No son utilizados en simulaciones CFD que tienen geometrías complejas debido a que su demanda computacional es muy elevada.

La radiación térmica que será simulada a través del programa CFD proviene de los cuerpos que tienen temperatura superior al cero absoluto; la ecuación para la intensidad de la radiación viene dada por la Ecuación 21 (ANSYS 2012b).

$$\frac{dl_{\lambda}}{ds} = \varepsilon \cdot l_{b\lambda} - (k_a + k_s) \cdot l_{\lambda} + \frac{k_s}{4\pi} \int_{4\pi} l_{\lambda}(\hat{S}_i) \cdot \Phi_{\lambda}(\hat{S}_i, \hat{S}) \cdot d\Omega_i$$

Ecuación 21

Donde: $l_{b\lambda}$ describe la intensidad de irradiación de un cuerpo negro, l_{λ} depende de la posición (r) y dirección (s)

La resolución de la Ecuación 21 demanda muchos recursos computacionales, es por ello que existen varios modelos de radiación, mismos que simplifican el modelo matemático, implementados en ANSYS Fluent, los principales son (ANSYS 2012b; Leonidivna y Torres 2018):

- Modelo Rosseland: El modelo asume que los medios son ópticamente gruesos y que la energía radiante emitida se absorbe rápidamente, es decir, el modelo de radiación no es válido cerca de las paredes de la geometría. Uno de los beneficios más destacables del modelo es que no requiere condiciones de frontera puesto que las superficies son consideradas como cuerpos negros ($\epsilon=1$).
- Modelo Monte Carlo: Simula las interacciones físicas entre los fotones y su entorno, cada vez que un fotón experimenta un cambio, por ejemplo, la dispersión o la absorción se actualizan las propiedades físicas del fluido. Se recomienda este modelo para el cálculo de la radiación en medios transparentes.
- Modelo de transferencia directa: El modelo discretiza en secciones un rayo de energía, la ecuación de transferencia de calor por radiación se integra analíticamente a lo largo del dominio discretizado, asumiendo que las propiedades físicas de los elementos simulados se mantienen constantes. Este modelo brinda mejores resultados de simulación que los descritos anteriormente, pero no se recomienda su aplicación cuando existen demasiadas superficies en la geometría.

- Modelo S2S “Surface to Surface”: Considera que todas las superficies de análisis tienen valores propios de absorptancia, transmitancia, reflectancia y emitancia; y además todas las superficies satisfacen la ley de Kirchoff ($\epsilon=\alpha$). Este modelo calcula los factores de forma que definen cómo se transmite el calor por radiación, y su principal limitante es que las condiciones de frontera para todas las superficies deben ser constantes.
- Modelo Discrete Ordinates: Permite la simulación de superficies considerando sus propiedades ópticas, el usuario configura el número de discretizaciones a considerarse para la simulación según la precisión deseada y el recurso computacional disponible.

Para las simulaciones a realizarse se considera el modelo de turbulencia $k - w$, porque permite el análisis de la capa límite formada entre el HTF y las tuberías de transporte; en el análisis de la radiación se considera el modelo de ordenadas discretas (Discrete Ordinates) por su flexibilidad para reconocer todas las propiedades ópticas del concentrador solar, adicionalmente es el modelo recomendado por Miller y Reed (1977) y utilizado por Moghimi et al. (2016), dado que se adapta y optimiza la resolución de las ecuaciones de transferencia de calor por radiación.

3.7. Condiciones de frontera

En la resolución de un problema hidráulico y térmico es necesario establecer las condiciones de frontera aplicadas en los límites del dominio computacional, las condiciones utilizadas para esta simulación se muestran en la Tabla 12 y sus principales características son (ANSYS 2012b):

- Flujo de salida: se utiliza cuando el fluido se encuentra totalmente desarrollado a la salida y cuando no se conocen los valores de velocidad y presión en este punto. No es una condición aplicable para flujos compresibles.

- Velocidad de entrada: permite definir la velocidad de entrada del HTF en las tuberías de transporte.
- Pared: permite introducir una condición de contorno a una superficie sólida, se pueden especificar propiedades ópticas, rugosidad, coeficientes de transferencia de calor, etcétera.

Tabla 12
Condiciones de frontera utilizadas en la simulación de un
concentrador solar Fresnel

Superficie	Condición	Análisis térmico		Análisis radiación	
		Reflectores primarios	Pared	Temperatura constante	300 [K]
Cubierta de vidrio	Pared	Mixta	T=300[K] h= 22.036 [$\frac{W}{m^2K}$]	Semitransparente	$\tau= 1$
Reflectores secundarios	Pared	Temperatura constante	300 [K]	Reflexión pura	$\rho=1$
Tuberías de transporte	Pared	Flujo de calor	0 [$\frac{W}{m^2}$]		
Ingreso HTF	Velocidad de entrada	Velocidad constante	9.25 [$\frac{m}{s}$]		
Salida HTF	Flujo de salida	Presión constante	1 [atm]		

Fuente: Autor

La simulación fue realizada en dos etapas, el flujo de calor concentrado sobre la superficie de vidrio, a este estudio se le denomina "Radiación" para futuras

interpretaciones; y el calor transferido al HTF, estudio denominado como “Receptor”. Esta selección se consideró a partir del recurso computacional, licencia de ANSYS Fluent disponible y tiempo de simulación para cada escenario. El esquema donde se detallan los procesos de simulación y parámetros a considerarse en el presente trabajo se muestra en la Figura 3.10.

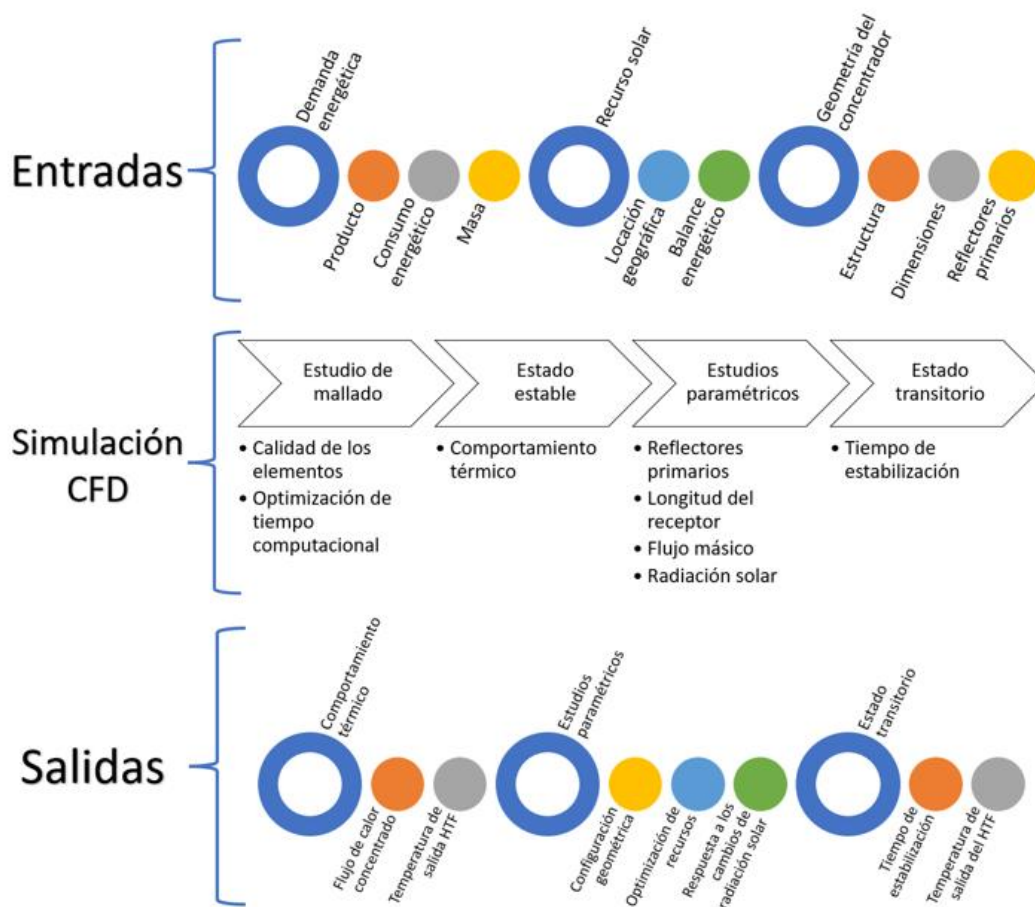


Figura 3.10 Esquema de parámetros y procesos de simulación considerados para el análisis del concentrador lineal Fresnel

Fuente: Autor

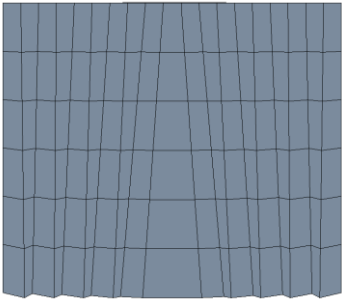
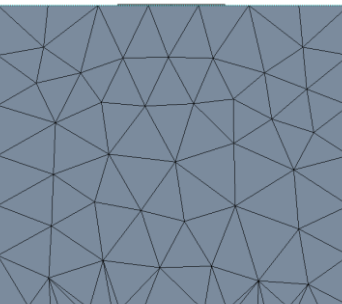
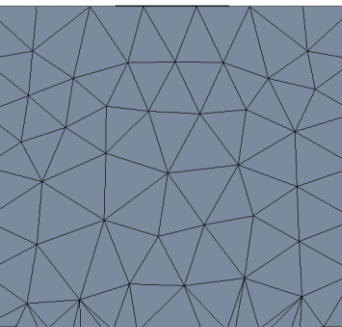
CAPÍTULO 4

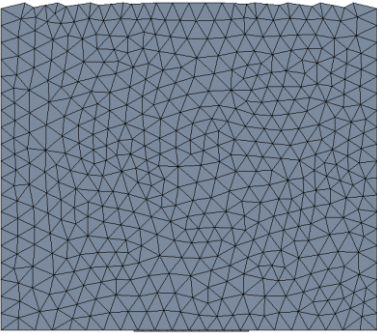
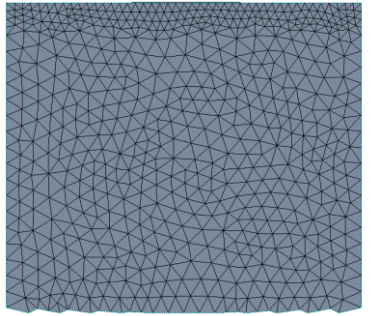
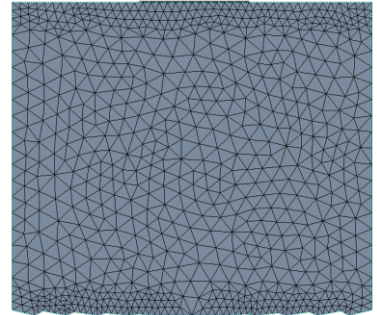
4. Resultados y discusión

4.1. Estudio de la malla

En el estudio del mallado se realizaron las simulaciones en estado estable, considerando 100 iteraciones para cada etapa, el método utilizado para cada malla se detalla en la Tabla 13. Las condiciones de frontera utilizadas para el proceso de simulación se muestran en la Tabla 12; adicionalmente, la radiación solar incidente en cada espejo corresponde a $523.3 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, valor ambiental promedio mostrado en la Tabla 7, dicho valor se obtiene del promedio anual de la radiación solar reportada por la NASA en el año 2021.

Tabla 13
Método de mallado para cada malla de estudio

Malla	Método		Esquema gráfico
1	Inflación	8 capas	
	Refinamiento	Fino	
2	Tetraedros	Aire exterior	
3	Tamaño	Vidrio	

4	Tamaño	Aire exterior	
	Tamaño	Reflector secundario	
5	Refinamiento	Dominio	
	Tamaño	Aire interior	
6	Refinamiento	Espejos	

Fuente: Autor

La Figura 4.1 muestra la relación entre el número de elementos en cada malla y el tiempo de simulación total requerido para representar el fenómeno térmico en el concentrador solar, a partir de la misma se puede describir el comportamiento entre el número de elementos y el tiempo lineal con una función predominante del tipo exponencial.

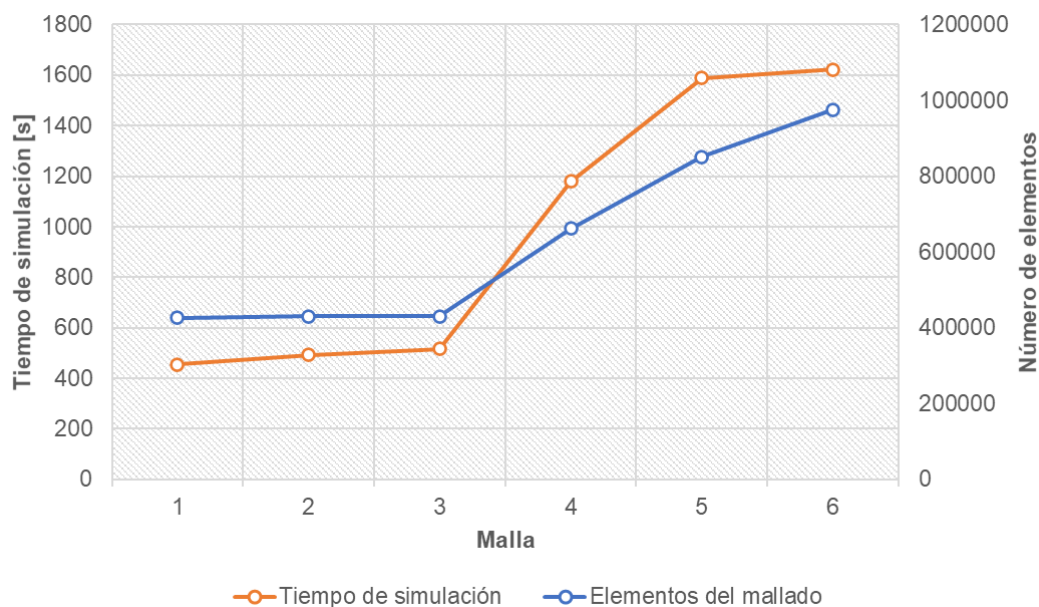


Figura 4.1 Relación entre número de elementos de cada malla y el tiempo de simulación requerido

Fuente: Autor

La Figura 4.2 expone el comportamiento de los parámetros de control dentro del estudio del mallado, los parámetros se definen en base a las variables de interés de cada proceso de simulación; para la simulación de la concentración solar se considera el flujo de calor concentrado en la cubierta de vidrio, mientras que para la simulación de la cavidad receptora las variables de interés son las temperaturas de salida del HTF en cada tubería y la temperatura del vidrio, este último parámetro es analizado para garantizar que esta superficie no pase la temperatura de fusión del material, la misma que oscila entre 1400 y 1500 [°C]. En base a los resultados obtenidos en cada simulación se puede apreciar que el flujo de calor concentrado tiene un valor estable de $1800 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ desde la malla 2, mientras que la temperatura de la cubierta de vidrio y de la salida del HTF en cada tubería se estabilizan a partir de la malla 4.

A partir de las consideraciones antes mencionadas se llega a la conclusión de que la **mall**a 4 es la que mantiene constantes los parámetros de control y cuyo tiempo de simulación es aceptable para realizar el análisis paramétrico de interés. La Figura 4.3 expone la vista frontal de la malla seleccionada, mostrando de manera simultánea la calidad global de cada elemento que la compone, la imagen izquierda es referente de la malla para el análisis de radiación y la imagen derecha el análisis en la cavidad trapezoidal.

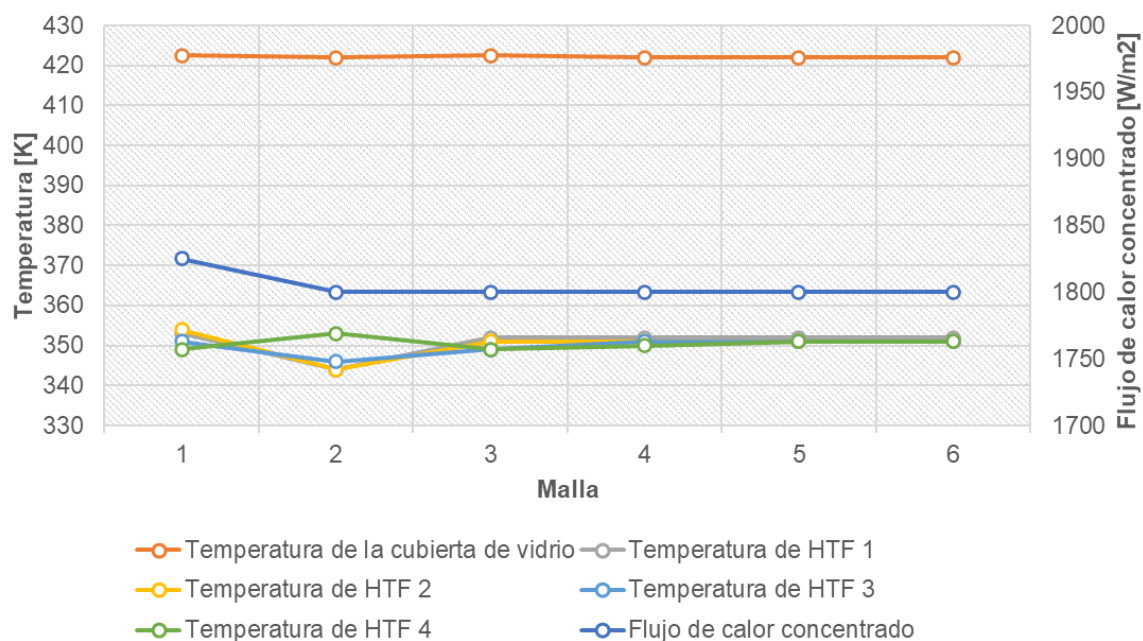


Figura 4.2 Parámetros de control para el estudio de malla

Fuente: Autor

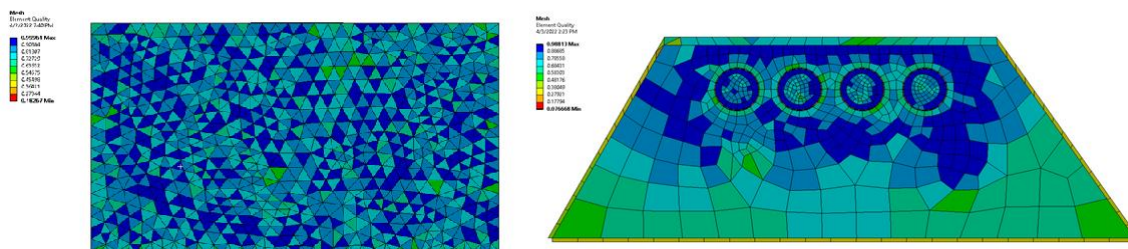


Figura 4.3 Vista frontal de la malla 4. Análisis de la calidad global de cada elemento que compone la malla

Fuente: Autor

El análisis de los parámetros de calidad, según la Tabla 11, para la malla 4 en el análisis de radiación, se detallan en la Figura 4.4 para ortogonalidad y Figura 4.5 para oblicuidad, la mayoría de los elementos que componen la malla tienen un valor de ortogonalidad entre 0.7 y 0.9, es decir, cumple con los criterios de evaluación una malla muy buena; y según el parámetro de oblicuidad, la mayoría de los elementos tiene valores entre 0.1 y 0.3, es decir, cumple con los criterios de evaluación una excelente malla.

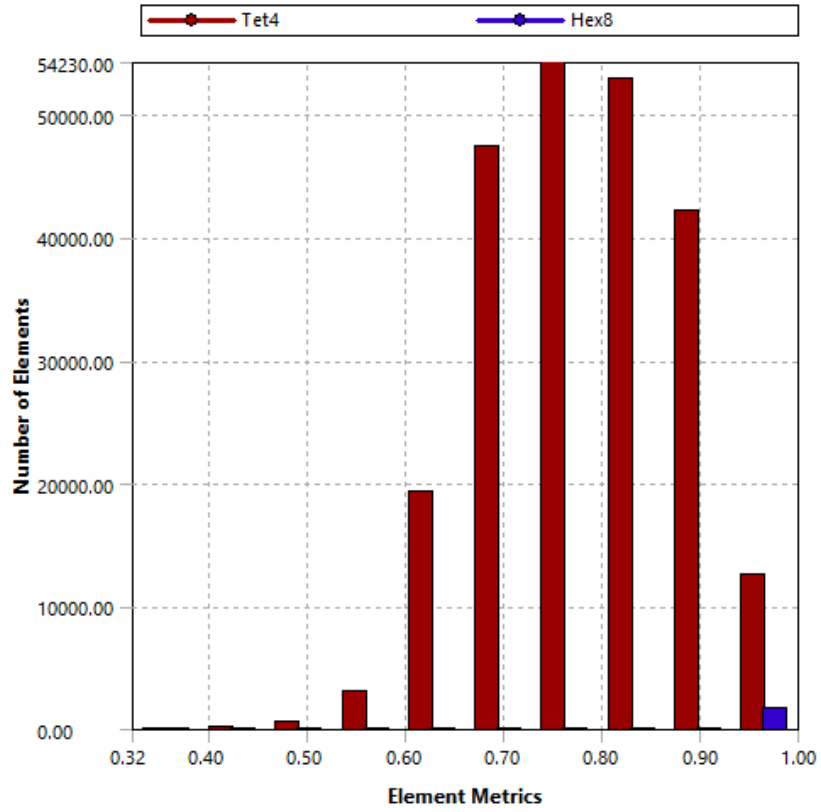


Figura 4.4 Histograma de la ortogonalidad de los elementos que componen la malla 4 para el análisis de radiación

Fuente: Autor

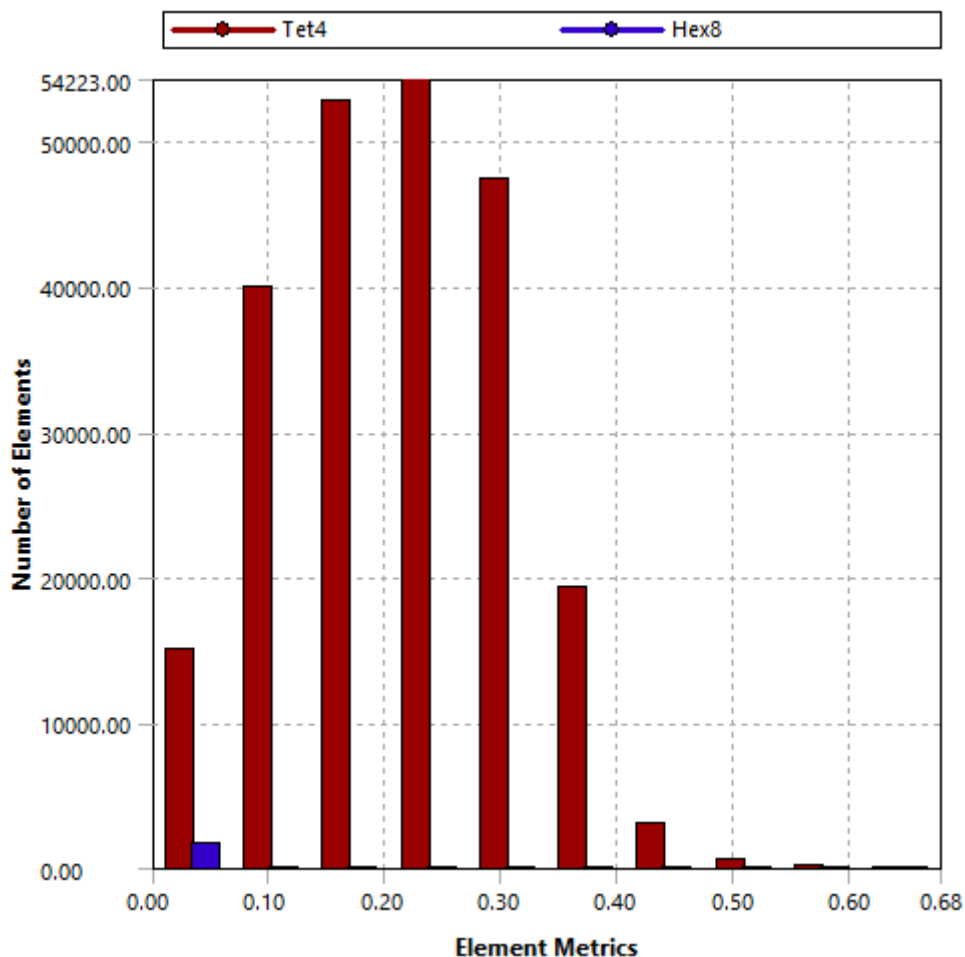


Figura 4.5 Histograma de la oblicuidad de los elementos que componen la malla 4 para el análisis de radiación

Fuente: Autor

Con respecto al análisis de los parámetros de calidad, según la Tabla 11, para la malla 4 en el análisis del receptor, los histogramas se muestran en la Figura 4.6 para ortogonalidad y Figura 4.7 para oblicuidad, la mayoría de los elementos que componen la malla tienen un valor de ortogonalidad de 0.95 y valores entre 0.1 y 0.3 para la oblicuidad, es decir, cumple con los criterios de evaluación de una excelente malla.

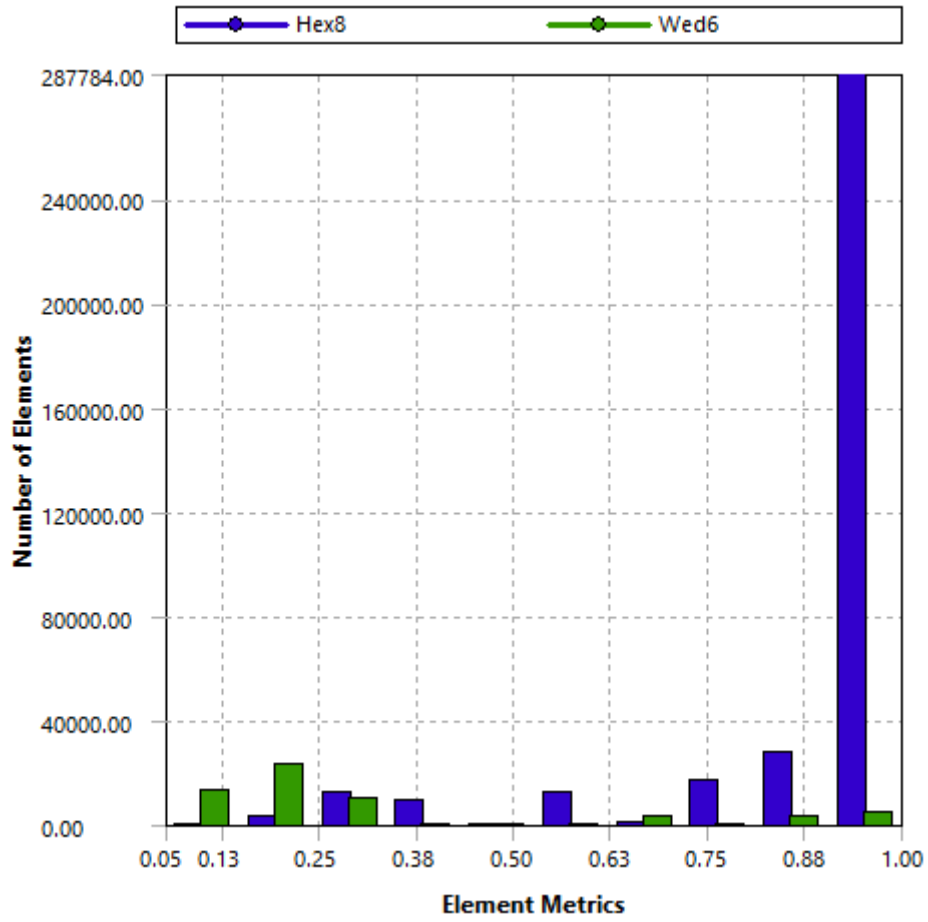


Figura 4.6 Histograma de la ortogonalidad de los elementos que componen la malla 4 para el análisis del receptor

Fuente: Autor

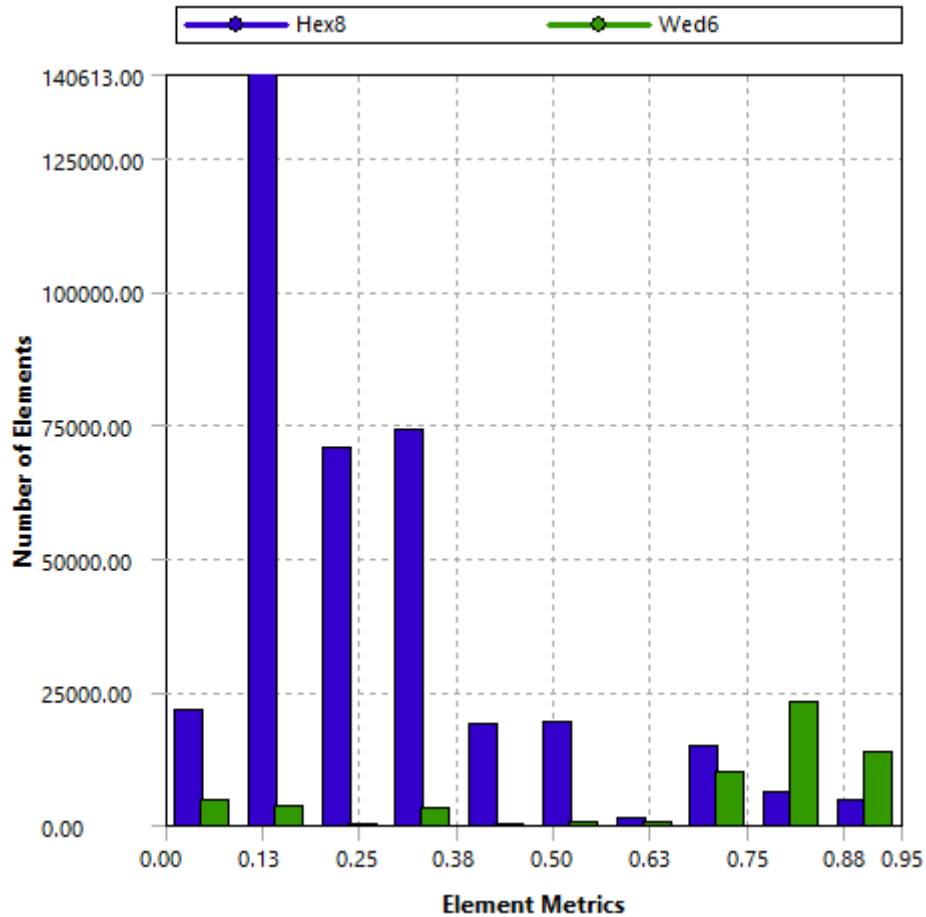


Figura 4.7 Histograma de la oblicuidad de los elementos que componen la malla 4 para el análisis del receptor

Fuente: Autor

4.2. Estado estable

El análisis en estado estable, se analiza un receptor de 6 [m] de longitud inicial con condiciones de frontera expuestas en la Tabla 12, radiación solar incidente igual a $523.3 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ (valor promedio obtenido de la Tabla 7) y empleando la malla 4 obtenida en

el estudio previo; este análisis expone que el flujo de calor en la superficie de vidrio por efectos de la radiación solar concentrada sigue el comportamiento mostrado en la Figura 4.8, aquí se puede apreciar que la mayor cantidad de flujo de calor se concentra en el centro de la cubierta de vidrio, es decir, en el segmento ubicado a 1 [m] de distancia del inicio hasta 1 [m] de distancia del final de la cavidad receptora; el valor promedio de este flujo concentrado es de $1800 \frac{W}{m^2}$.

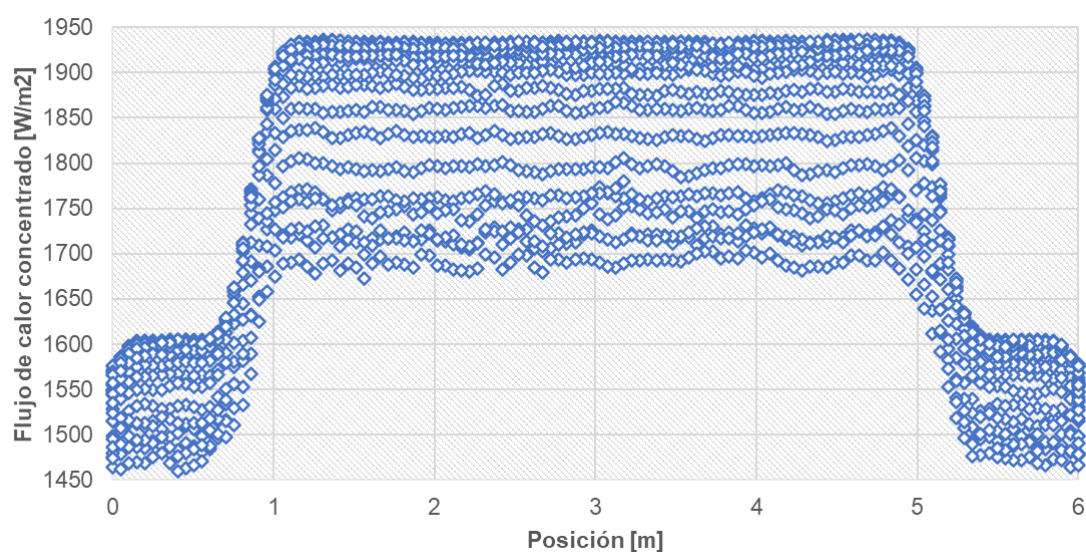


Figura 4.8 Flujo de calor concentrado en la cubierta de vidrio

Fuente: Autor

La Figura 4.9 y Figura 4.10 muestran la vista frontal y lateral del flujo de calor concentrado en la cubierta de vidrio, respectivamente, aquí se observa que la radiación solar es reflejada por todos los espejos primarios hacia la cubierta, incrementando en la misma el calor concentrado, sin embargo, debido al fenómeno de sombreado explicado por Bellos y Tzivanidis (2018) en la Figura 4.11 no se aprovecha el calor concentrado en los extremos del equipo de captación. La Figura 4.10 muestra una zona de calentamiento por debajo de la cubierta de vidrio, esto se debe a que

durante la simulación no se considera aire en movimiento debajo del receptor. A pesar de que la cubierta de vidrio tiene transferencia de calor por convección con el ambiente ($h_v = 22.03 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$) se analiza un estado crítico de ganancia de calor, donde el aire bajo el concentrador solar se mantiene estático, para casos prácticos esta concentración de calor debería ser mínima debido a las corrientes de aire propias de la zona de actuación donde se pretende instalar el concentrador lineal Fresnel. De manera visual se puede deducir el calor residual en el ambiente es de aproximadamente $710 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, es por ello que la inclinación de los reflectores primarios es un factor crítico al diseñar un equipo que emplee la tecnología Fresnel.

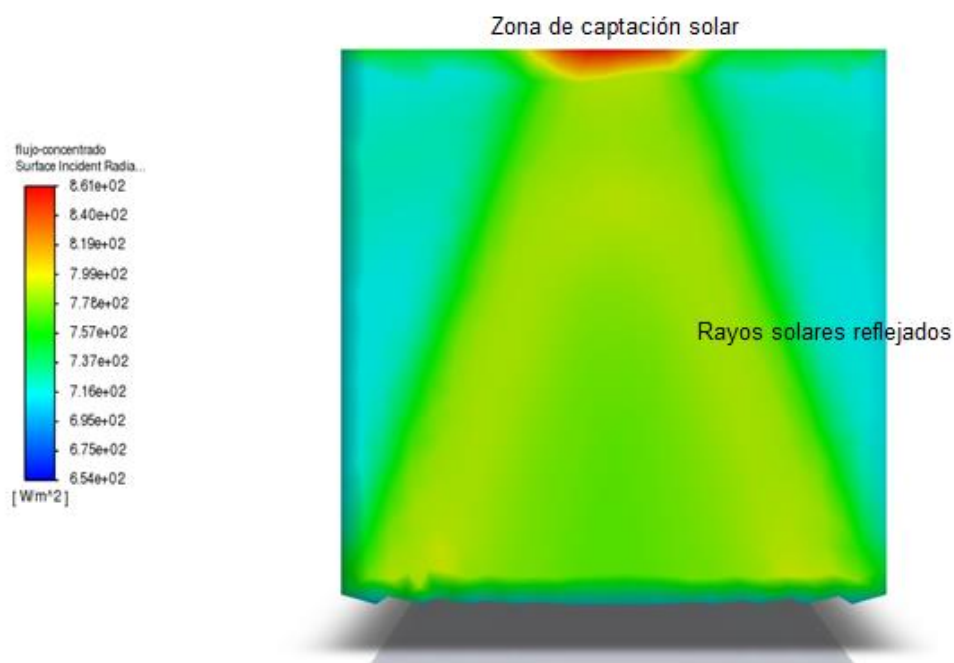


Figura 4.9 Vista frontal del flujo de calor en el concentrador

lineal Fresnel

Fuente: Autor



Figura 4.10 Vista lateral del flujo de calor en el concentrador lineal Fresnel

Fuente: Autor

La Figura 4.11 expone el fenómeno de sombreado parcial, según lo describe Bellos y Tzivaniadis (2018) cuando un rayo de sol incidente llega a los reflectores primarios, dependiendo de las propiedades ópticas del material, este rayo se refleja con un ángulo diferente al que llegó, y según la inclinación del reflector los rayos reflejados llegan a la cubierta del receptor en diferentes zonas creando áreas de sombreado que no permiten un flujo uniforme del calor concentrado en toda la superficie de interés.

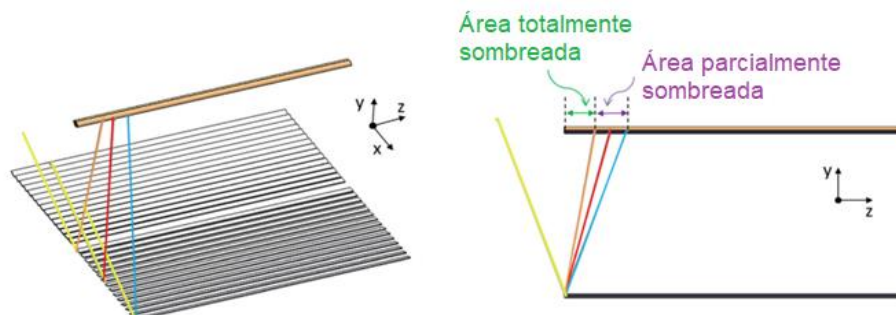


Figura 4.11 Descripción de la dirección de los rayos solares en el concentrador lineal Fresnel

Fuente: Bellos y Tzivanidis 2018

La Figura 4.12 muestra el perfil de temperaturas dentro de la cavidad receptora, aquí se aprecia que la superficie más caliente es la cubierta de vidrio puesto que esta recibe directamente el flujo de calor concentrado, y transfiere este calor por efectos de conducción entre el material y convección con aire al interior de la cavidad. Finalmente, la Figura 4.13 muestra la distribución nodal de la temperatura a la salida de cada tubería de transporte de HTF, aquí se aprecia que las tuberías 3 y 4 tienen los gradientes más altos de temperatura, variando aproximadamente 10 [K] de los valores de temperatura obtenidos en las tuberías 1 y 2; esta diferencia radica principalmente en el modelo de radiación utilizado, ya que el valor del calor transferido por radiación depende del índice de refracción de cada material y de la temperatura de los cuerpos alrededor del sólido de análisis y al ser un modelo simétrico las variaciones de estos parámetros son mínimas.

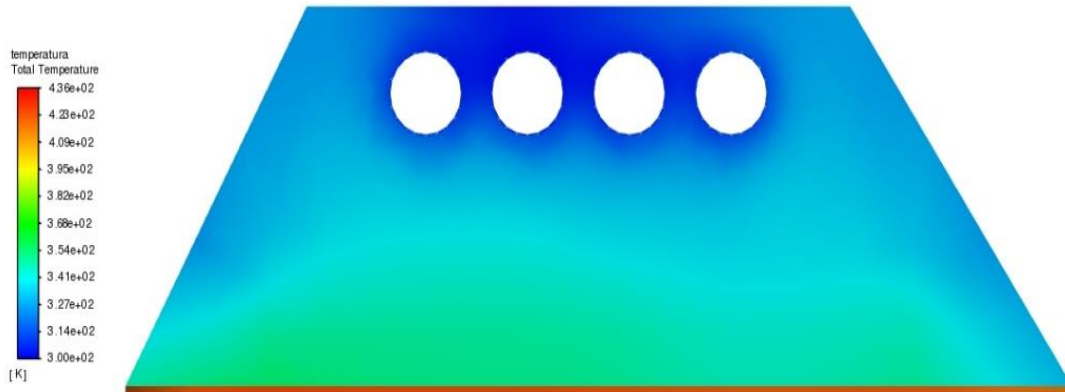


Figura 4.12 Perfil de temperaturas dentro de la cavidad receptora. Vista frontal

Fuente: Autor

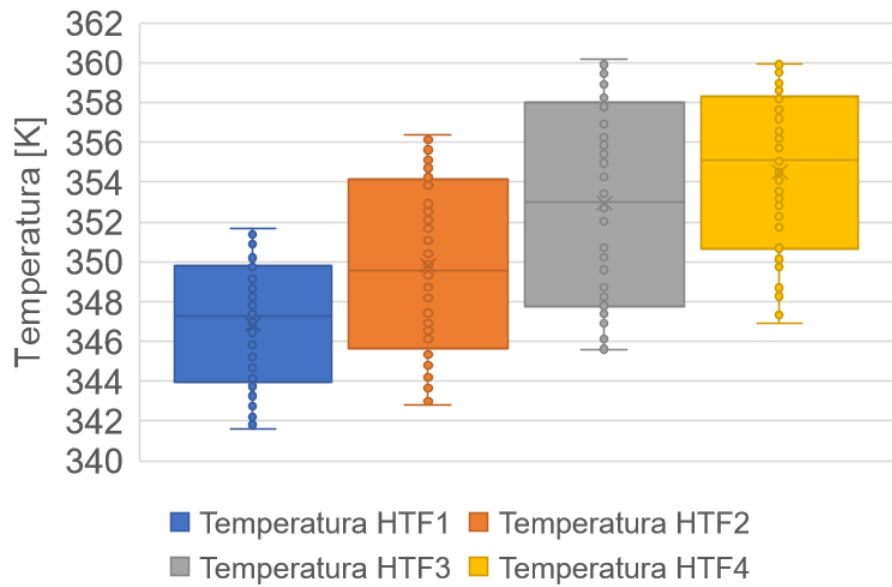


Figura 4.13 Distribución de la temperatura del HTF a la salida de cada tubería de transporte

Fuente: Autor

Para determinar la temperatura promedio de la salida de cada HTF se considera cada nodo mostrado por la simulación CFD, estos valores muestran que la tubería 4 tiene el HTF más caliente con una temperatura promedio de 354.5 [K], y la temperatura más baja se obtiene en el HTF transportado por la tubería 1 con un valor de 346.8 [K]. Para futuras investigaciones se puede refinar el mallado de esta sección para determinar la variación real de temperatura entre el fluido de cada tubería. Finalizado el análisis en estado estable es necesario considerar que en estas condiciones el programa CFD no considera energía generada ni almacenada en los cuerpos que conforman el dominio de estudio, es decir, la energía solar es transferida directamente al HTF cuando el sistema ha alcanzado su equilibrio térmico sin importar el tiempo que esto conlleve, en la vida real el tiempo previo al equilibrio térmico modifica las condiciones iniciales establecidas en este análisis.

4.3. Estudio paramétrico: Número de reflectores primarios

El número de reflectores primarios determina la cantidad de energía concentrada en la cavidad receptora; inicialmente se considera el modelo diseñado por Bellos et al. (2018), mismo que está compuesto por 5 reflectores primarios a cada lado de la cavidad receptora, 10 espejos en total, posteriormente se incrementa el número de reflectores para incrementar el flujo de calor en la cubierta de vidrio. Las condiciones de frontera utilizadas se muestran en la Tabla 12 y el valor de la radiación solar incidente es de $523.3 \left[\frac{W}{m^2} \right]$. La Figura 4.14 muestra el comportamiento del flujo de calor concentrado y la temperatura de salida del HTF en la tubería 1 según el número total de reflectores primarios utilizado en el concentrador lineal Fresnel, aquí se observa que, a partir de los 14 reflectores, distribuidos simétricamente con relación a la cavidad receptora, el flujo de calor concentrado y por lo tanto la temperatura del HTF se mantiene constante. Este fenómeno se da debido a que los rayos solares, por el ángulo de reflexión sobre los reflectores primarios, ya no inciden sobre la cubierta de vidrio, convirtiéndose en radiación que se pierde en el ambiente.

En base a los resultados obtenidos en el estudio paramétrico se consideran 14 reflectores primarios en el modelo de concentrador lineal Fresnel planteado, la Figura 4.15 muestra el flujo de calor concentrado en la cubierta de vidrio, el valor promedio de este parámetro es de $1950 \frac{W}{m^2}$, concentrado en la parte media de la superficie debido a los efectos de sombreado parcial explicados previamente. La Figura 4.16 muestra la temperatura del HTF a la salida de cada tubería, el valor promedio es de aproximadamente 356 [K] .

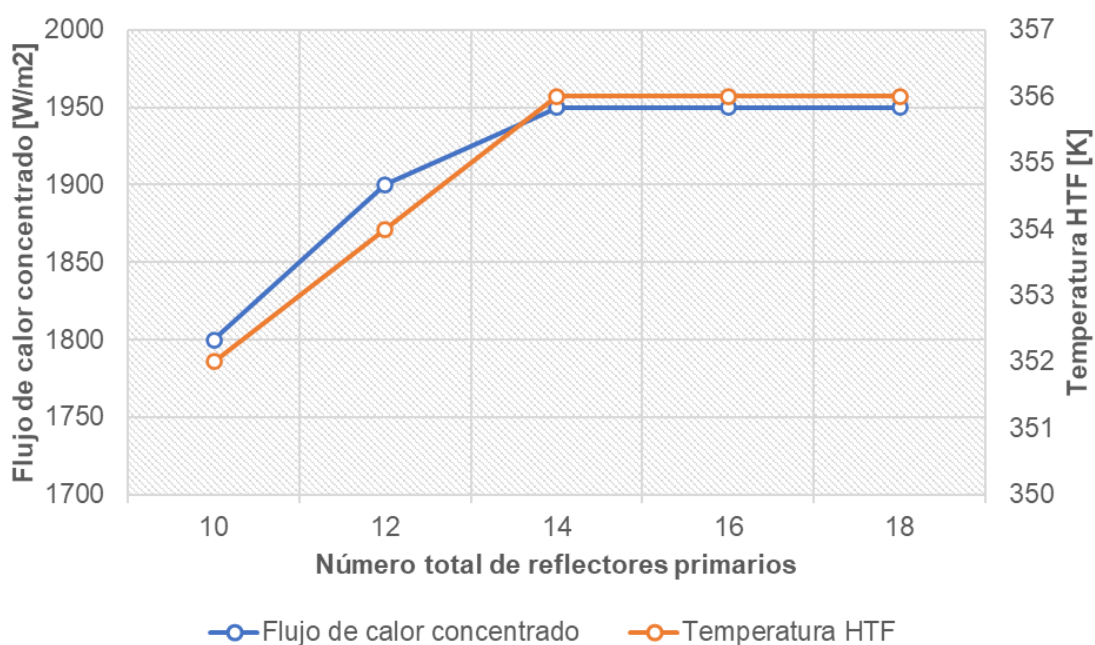


Figura 4.14 Variación del flujo de calor concentrado y temperatura del HTF en función del número de reflectores primarios

Fuente: Autor

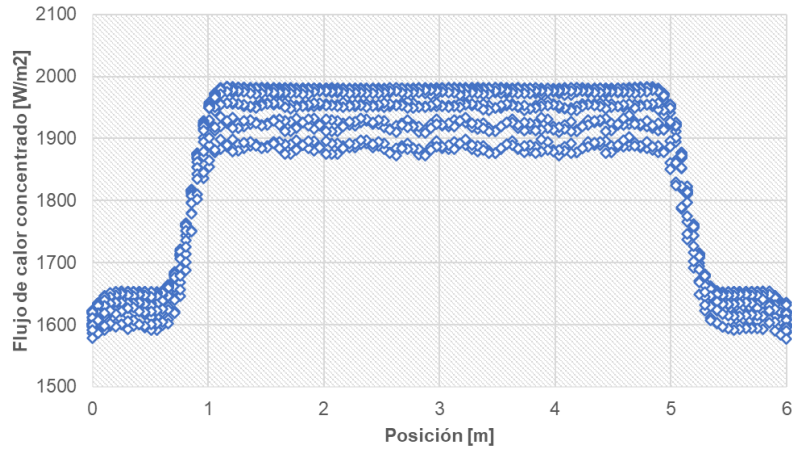


Figura 4.15 Flujo de calor concentrado sobre la cubierta de vidrio al considerar 14 reflectores primarios

Fuente: Autor

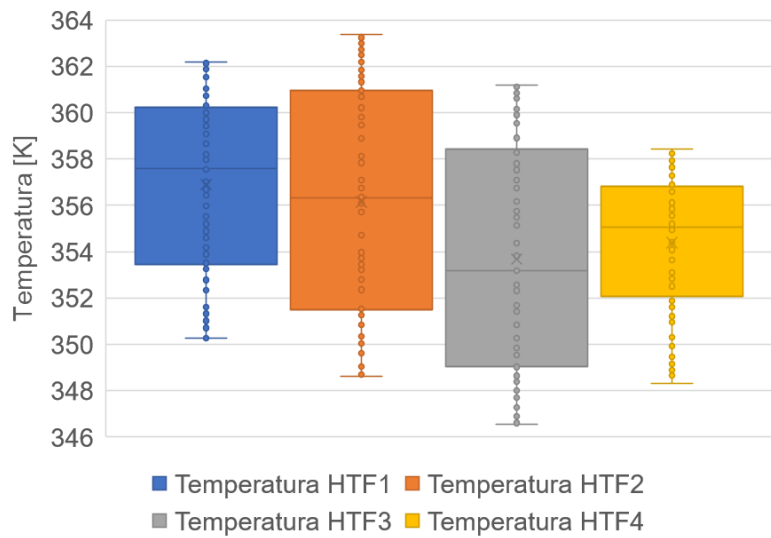


Figura 4.16 Temperatura del HTF al considerar 14 reflectores primarios

Fuente: Autor

Para los siguientes estudios paramétricos se consideran 14 reflectores primarios con el objetivo de optimizar el uso del recurso solar; cabe destacar que al incrementar el número de reflectores primarios también se incrementa de manera lineal el uso del suelo, en el área de la agricultura esto representa una desventaja dado que le exige al agricultor rural asignar más espacio a la tecnología de aprovechamiento solar disminuyendo, posiblemente, la cantidad de siembra.

4.4. Estudio paramétrico: Longitud del receptor

La longitud del receptor solar además de la radiación incidente define la exposición del HTF al flujo de calor concentrado, de tal manera que a mayor longitud del receptor se tiene una temperatura superior a la salida del HTF. Las condiciones de frontera utilizadas se muestran en la Tabla 12 y el valor de la radiación solar incidente es de $523.3 \left[\frac{W}{m^2} \right]$. La Figura 4.17 muestra la distribución de la temperatura a la salida del HTF y el incremento del espacio físico utilizado por el concentrador lineal Fresnel. Como se puede apreciar el uso del espacio se incrementa de manera lineal, por lo que es necesario establecer un límite que dependerá principalmente del espacio disponible por el usuario para la instalación de este tipo de tecnología.

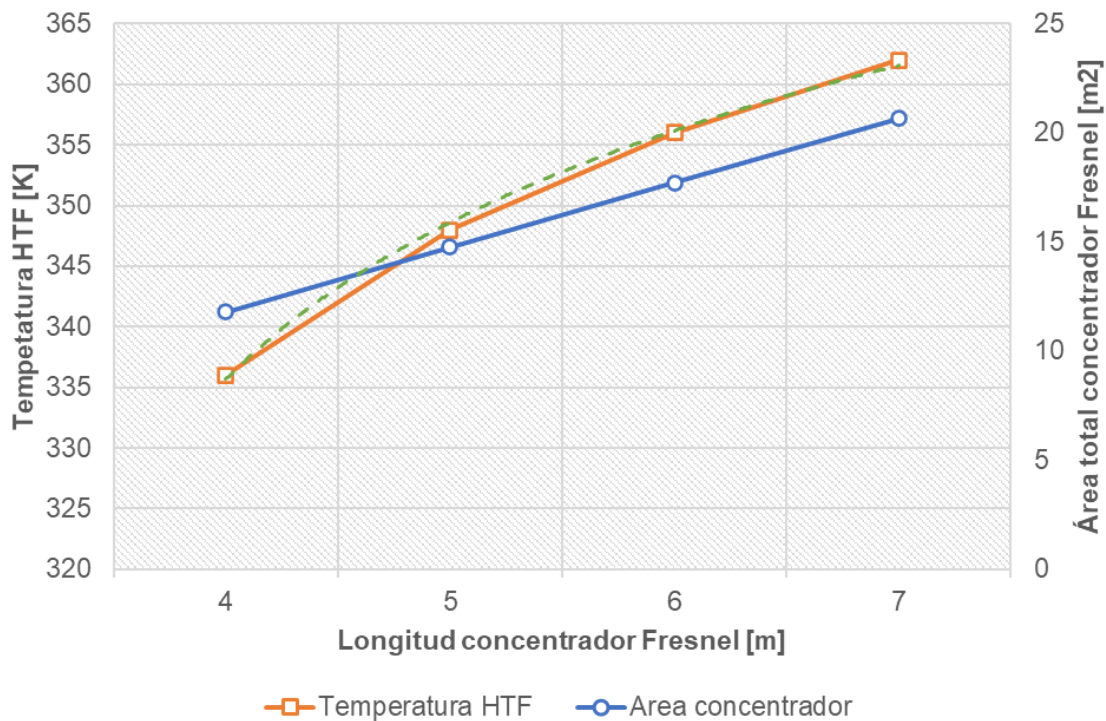


Figura 4.17 Relación entre la longitud del receptor y la temperatura de salida del HTF

Fuente: Autor

La Ecuación 22 establece la relación existente entre la temperatura de salida del HTF y la longitud del receptor, estos parámetros tienen una relación logarítmica, de tal forma que existe un límite en la longitud del concentrador que permite un crecimiento significativo en la temperatura, aproximadamente este valor ronda los 200 [m] con una temperatura de salida de 535 [K]. El coeficiente de determinación (R^2) para esta ecuación es de 0.9946, es decir, el modelo se ajusta con buena exactitud la variabilidad de la temperatura de salida del HTF en función de la longitud del receptor.

$$T_{HTF} = 46.491 \ln(L) + 272.24$$

Ecuación 22

La Figura 4.18 muestra la distribución de la temperatura a la salida del HTF transportado por cada tubería en un concentrador que tiene 14 reflectores primarios y 7 [m] de longitud; aquí se aprecia que la temperatura promedio de salida es de 362 [K], y mantiene una distribución similar en cada tubería de transporte, la variación de a temperatura es de aproximadamente 6 [K], esta diferencia se debe a la energía que se transmite por efectos de conductividad entre las tuberías de transporte de HTF.

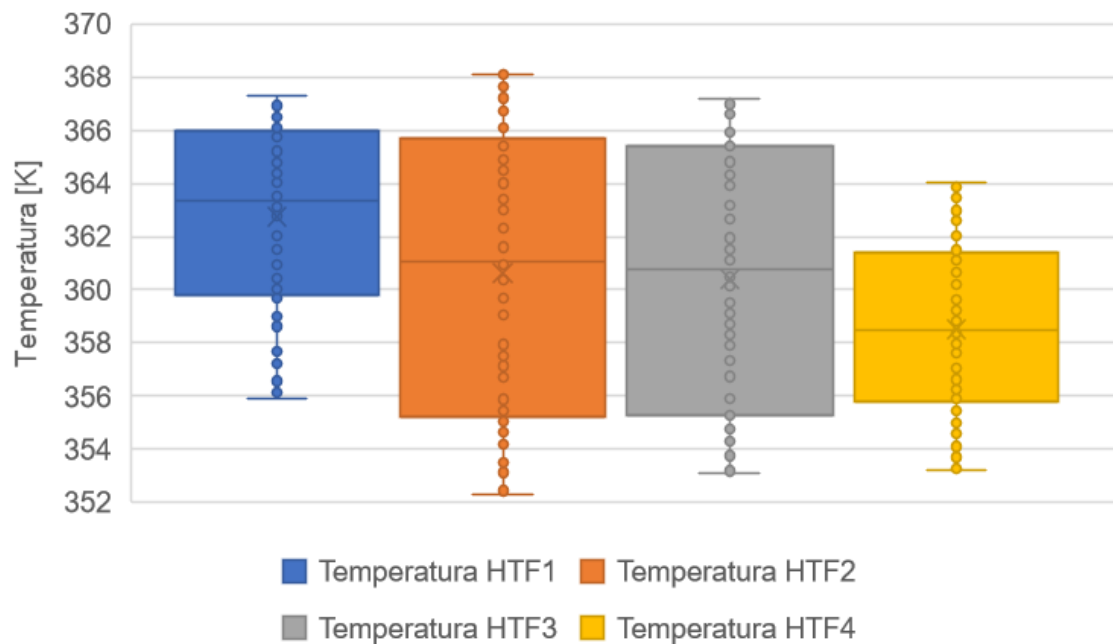


Figura 4.18 Temperatura del HTF al considerar 14 reflectores primarios en un concentrador de 7 [m] de longitud

Fuente: Autor

4.5. Estudio paramétrico: Flujo másico de HTF

El concentrador lineal Fresnel al ser un equipo auxiliar debe adaptarse a las necesidades del usuario, de tal manera que sea viable utilizar la misma tecnología en el secado de diferentes productos cosechados en la región Costa del Ecuador, para ello es necesario variar el flujo másico del HTF, mismo que se relaciona con el consumo energético del secador de alimentos, como se expuso previamente en la Ecuación 2. La Figura 4.19 muestra el comportamiento de la temperatura del HTF a la salida de las tuberías de transporte en un receptor lineal de 7 [m] de longitud con 14 reflectores primarios.

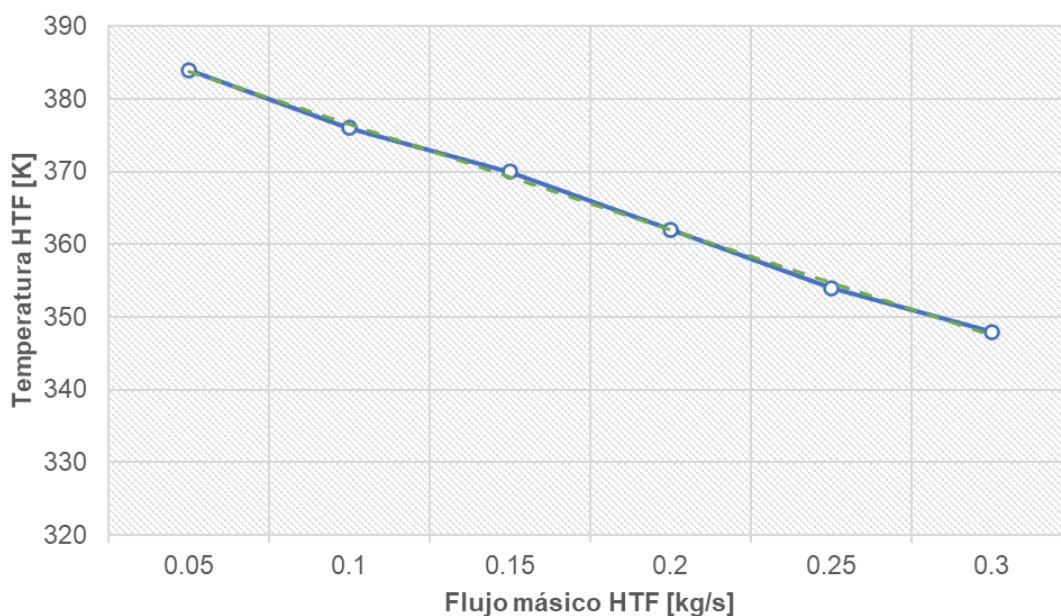


Figura 4.19 Variación de la temperatura de salida del HTF en función del flujo másico de ingreso

Fuente: Autor

Como se puede observar la temperatura del HTF es inversamente proporcional al flujo másico del fluido, la Ecuación 23 describe la relación entre estos parámetros. Según el comportamiento mostrado en las ecuaciones CFD cuando el flujo másico de HTF necesario supera los $0.6 \left[\frac{kg}{s} \right]$ el fluido no incrementa su temperatura, es decir, se mantiene en 300 [K]. El coeficiente de determinación (R^2) para esta ecuación es de 0.9982, es decir, el modelo describe el comportamiento de la temperatura del HTF en función del flujo másico con un alto grado ajuste.

$$T_{HTF} = -145.14m_{HTF} + 391.07 \quad \text{Ecuación 23}$$

Para este análisis se consideró un flujo de calor concentrado en la superficie del vidrio de $1950 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y se simuló únicamente la sección de la cavidad receptora.

4.6. Estudio paramétrico: Radiación solar característica

Dado que la radiación solar no es constante a lo largo del día es necesario analizar las posibles fluctuaciones y los efectos que se tendrían en el comportamiento del concentrador lineal, para ello se consideran valores mínimos y máximos de radiación solar. La Figura 4.20 muestra la variación del flujo de calor concentrado y la temperatura de salida del HTF en función de la radiación solar incidente (S_a), ambas curvas son directamente proporcionales a este parámetro.

La Ecuación 24 define el comportamiento de la temperatura de salida del HTF, el coeficiente de determinación (R^2) para esta ecuación es de 0.9991; la temperatura máxima alcanzable según este comportamiento es de 382 [K], con un valor de radiación solar incidente de $1530 \left[\frac{W}{m^2} \right]$.

$$T_{HTF} = -0.00002S_a^2 + 0.0612S_a + 335.25$$

Ecuación 24

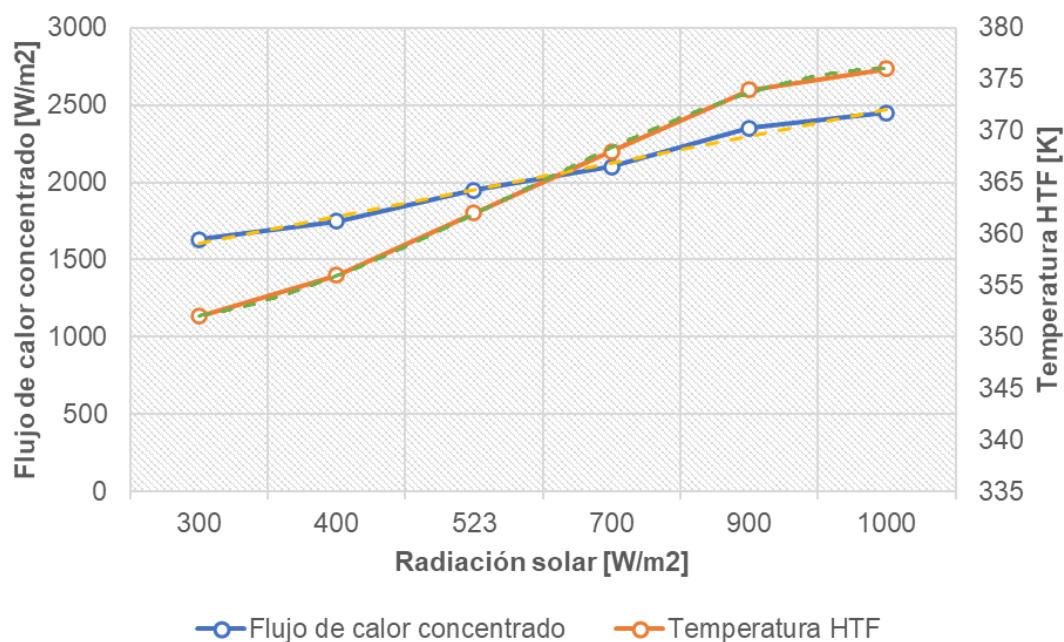


Figura 4.20 Variación del flujo de calor concentrado sobre la cubierta de vidrio y la temperatura de salida del HTF en función de la radiación solar incidente

Fuente: Autor

La Ecuación 25 define el comportamiento del flujo de calor concentrado sobre la superficie de vidrio en función de la radiación solar incidente, el coeficiente de determinación (R^2) para esta ecuación es de 0.995. Dado que esta curva del flujo de calor concentrado es lineal, no existe límite en el análisis considerando la radiación solar incidente, sin embargo, debido a la restricción en la Ecuación 24, el valor máximo del flujo de calor concentrado es aproximadamente $3000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$.

$$\dot{q} = 1.1642S_a + 1296.5 \quad \text{Ecuación 25}$$

Las ecuaciones mostradas se ajustan al concentrador lineal Fresnel con cavidad trapezoidal, de 7 [m] de longitud y 14 reflectores primarios, en caso de requerir variaciones en la geometría del receptor es necesario realizar otros estudios paramétricos para definir las nuevas ecuaciones que definan el comportamiento del concentrador solar.

En la Tabla 14 se presenta un resumen de las ecuaciones que determinan la temperatura de salida del fluido de transferencia de calor en base a los estudios paramétricos realizados en esta sección.

Tabla 14
Tabla resumen de las ecuaciones para determinar la temperatura de salida del HTF

Estudio paramétrico	Ecuación resultante	Grado de ajuste
Longitud del receptor	$T_{HTF} = 46.491 \ln(L) + 272.24$	0.9946
Flujo másico	$T_{HTF} = -145.14m_{HTF} + 391.07$	0.9982
Radiación en la zona de actuación	$T_{HTF} = -0.00002S_a^2 + 0.0612S_a + 335.25$	0.9991

Fuente: Autor

4.7. Estado transitorio

La característica principal del análisis transitorio es la variación de las propiedades del fluido con el tiempo, el objetivo de este estudio es obtener un modelo cualitativo de la evolución del comportamiento térmico del HTF en función del tiempo, y definir el

tiempo que requiere el modelo para alcanzar el equilibrio térmico y una temperatura de salida estable.

Las propiedades del HTF iniciales están consideradas a temperatura ambiente, sus valores se muestran en la Tabla 6, adicionalmente para la simulación se tiene en cuenta las siguientes condiciones:

- El modelo geométrico del concentrador lineal Fresnel tiene 7 [m] de longitud y 14 reflectores primarios, el flujo másico del HTF es de $0.2 \left[\frac{kg}{s} \right]$.
- El valor de la radiación solar incidente es representativo a la radiación promedio en la ciudad de Guayaquil, la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra los valores de la radiación diario en el año 2021. Los valores máximos se tienen en promedio a las 12:00 y su valor aproximado es de $800 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, mientras que los valores mínimos se tienen en promedio a las 6:00, este valor es de aproximadamente $100 \left[\frac{W}{m^2} \right]$.

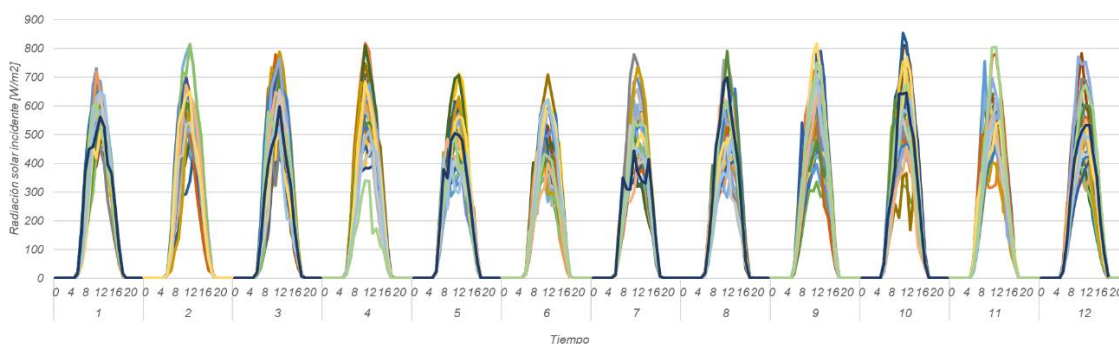


Figura 4.21 Variación de la radiación solar en la ciudad de Guayaquil para el año 2021

Fuente: NASA 2021

- El tiempo de análisis para cada simulación, concentración de flujo de calor y temperatura de salida del HTF fue de 2 [horas]. Para analizar el comportamiento del concentrador lineal se consideran las primeras horas de luz solar donde la radiación solar es más baja y las también las horas de más alta radiación en el día.
- Para determinar el número de iteraciones por cada segundo de simulación se realizó un estudio del primer minuto en estado transitorio; en la primera simulación se utilizaron 50 iteraciones por segundo con un tiempo de simulación aproximado de 7 [horas], y en la segunda simulación se utilizaron 5 iteraciones por segundo con un tiempo de simulación aproximado de 35 [minutos]. La Figura 4.22 muestra las variaciones entre ambas consideraciones de simulación, aquí se aprecia que la variación máxima fue de 0.45%, por lo que la consideración de 5 iteraciones es válida para futuras simulaciones en estado transitorio.

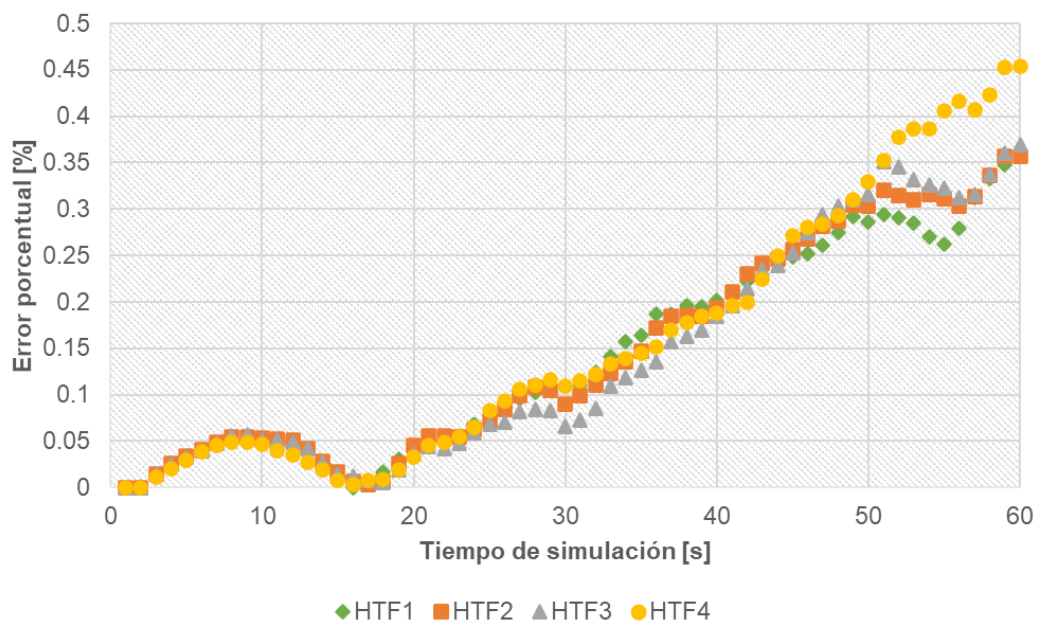


Figura 4.22 Variación porcentual en la temperatura de salida del HTF según el número de iteraciones por segundo utilizadas en la simulación

Fuente: Autor

Los resultados obtenidos para el calor concentrado en la cubierta de vidrio durante el análisis de las dos primeras horas de radiación en el día se muestran en la Figura 4.23, se aprecia que para la primera hora el flujo de calor se estabiliza a los 2500 [s] (41.6 [min]) y en la segunda hora se estabiliza a los 6000 [s] (1 [h], 40 [min]), aproximadamente, dichos valores de estabilización se muestran como asíntotas en las curvas presentadas. Para la simulación del receptor se crearon funciones UDF (“User Defined Function”) que permiten definir el valor de entrada para cada segundo de simulación, para la primera hora se utilizó la Ecuación 26, y para la segunda hora la Ecuación 27. En el Anexo A se muestra el código de programación de la UDF empleada en la simulación.

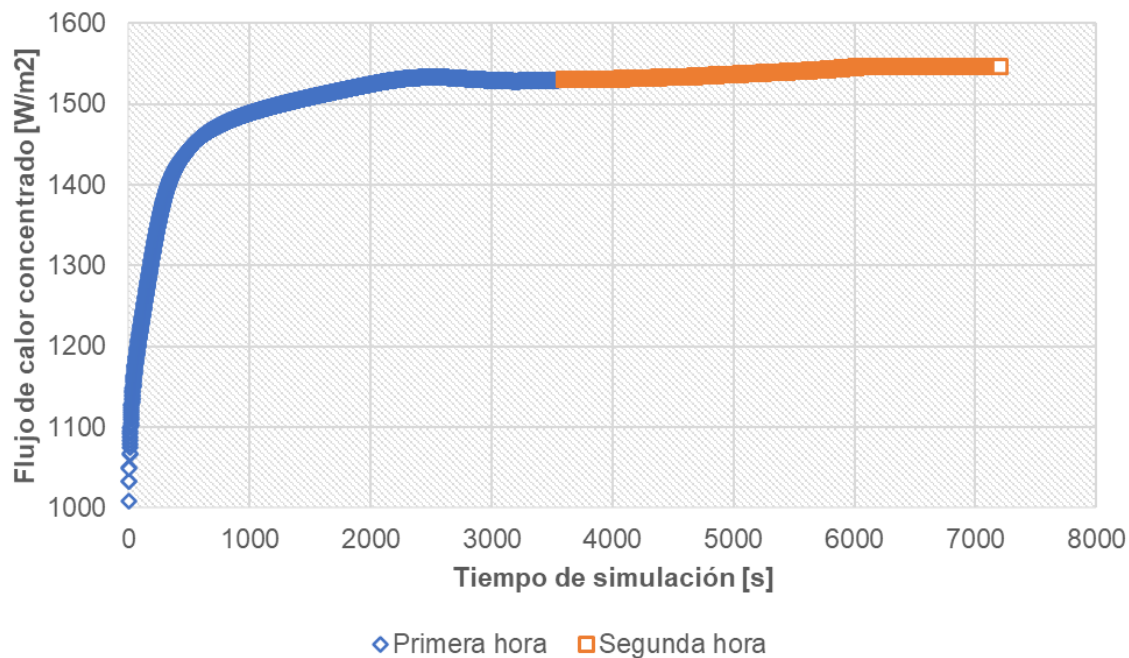


Figura 4.23. Flujo de calor concentrado en la cubierta de vidrio.

Radiación solar baja: menor a $100 \left[\frac{W}{m^2} \right]$

Fuente: Autor

$$\dot{q} = -3 \cdot 10^{-11}t^4 + 2 \cdot 10^{-7}t^3 - 6 \cdot 10^{-4}t^2 + 0.7826t + 1164. \quad \text{Ecuación 26}$$

$$\dot{q} = -1 \cdot 10^{-9}t^3 + 2 \cdot 10^{-5}t^2 - 0.0998t + 1684.7 \quad \text{Ecuación 27}$$

La Figura 4.24 muestra el comportamiento de la temperatura de salida del HTF en cada tubería que compone el receptor, y en la cubierta de vidrio; con respecto al HTF lo datos obtenidos tienen valores variables debido a cómo se realizó el cálculo promedio de la temperatura. Al considerar la salida del HTF como una superficie, y no como un volumen, se considera el área superficial; la Figura 4.25 muestra el

comportamiento del fluido a la salida de las tuberías en los primeros minutos de simulación, en estas superficies existes nodos con temperaturas superiores que alteran el valor final de la temperatura, sin embargo, el comportamiento general es similar a la temperatura de la cubierta de vidrio, misma que se estabiliza a los 3000 [s] (50 [min]) para la primera hora de simulación y a los 6500 [s] (1[h], 49 [min]) para la segunda hora de simulación, aproximadamente, cuando se alcanza el equilibrio todas las tuberías alcanzan valores similares, esto se puede apreciar en la Figura 4.26. El valor de estabilización de la temperatura de salida para el HTF cuando se consideran dos horas de baja radiación solar es de aproximadamente 355 [K].

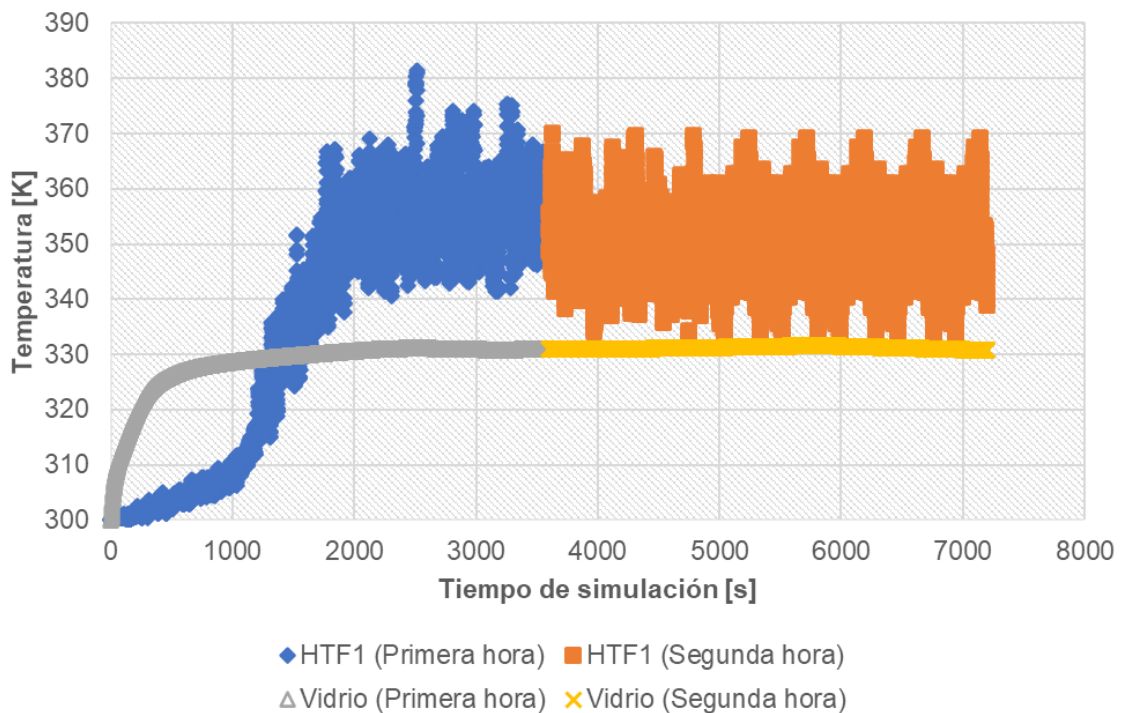


Figura 4.24 Temperaturas del sistema. Radiación solar baja:

menor a $100 \frac{W}{m^2}$

Fuente: Autor

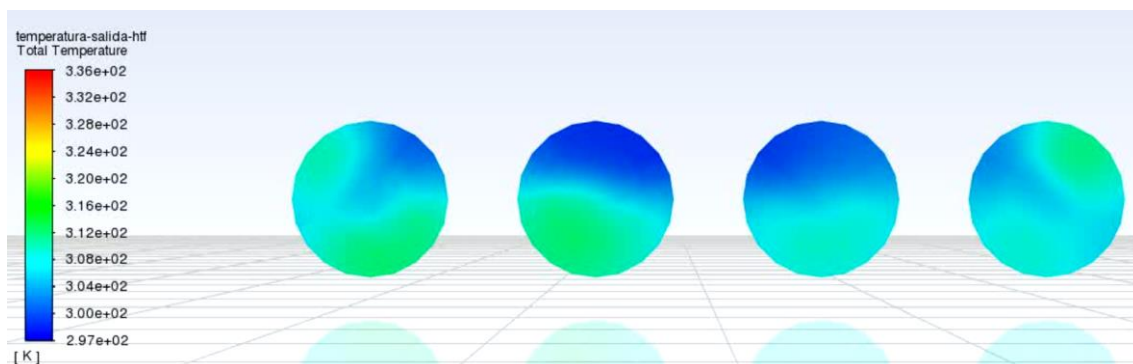


Figura 4.25 Temperaturas de salida del HTF. Minuto 20 de la simulación

Fuente: Autor

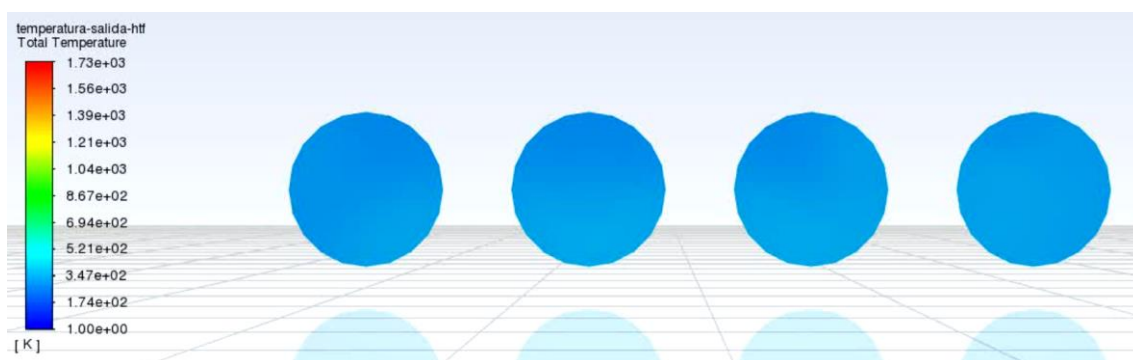


Figura 4.26 Temperaturas de salida del HTF cuando se alcanza el equilibrio basado en el tiempo de simulación

Fuente: Autor

Todas las tuberías de transporte del HTF tienen un comportamiento similar, la Figura 4.27 muestra el detalle de la temperatura de salida del HTF en los primeros 1000 [s] de simulación, se puede apreciar que el HTF entre cada tubería de transporte varía por menos de 1[K], este comportamiento se repite en todo el dominio de simulación,

sin embargo, no se lo expone gráficamente para facilitar la visualización del comportamiento térmico del HTF.

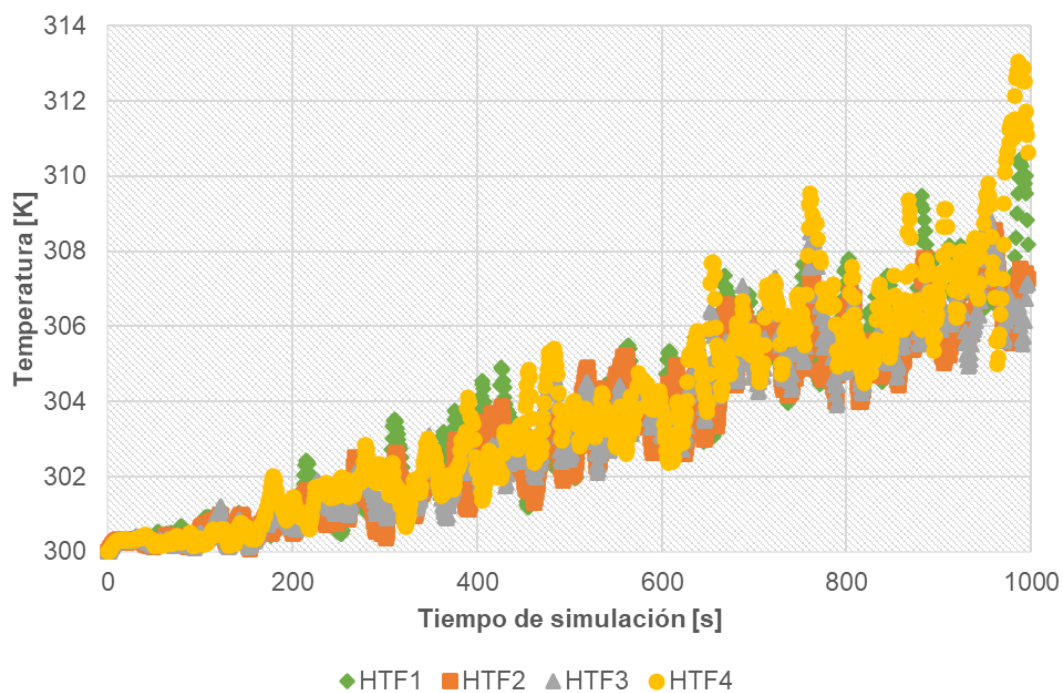


Figura 4.27 Temperaturas de salida del HTF en cada tubería con radiación solar baja. Detalle de los primeros 1000 [s]

Fuente: Autor

Los resultados obtenidos para el calor concentrado en la cubierta de vidrio durante el análisis de las dos horas con más alta radiación solar en el día se muestran en la Figura 4.28, se aprecia que para la primera hora el flujo de calor se estabiliza a los 2700 [s] (45 [min]) y en la segunda hora se estabiliza a los 6000 [s] (1 [h], 40 [min]), aproximadamente. Las UDF utilizadas para esta simulación se muestran en la Ecuación 28 para la primera hora, y la Ecuación 29 para la segunda hora. En el Anexo B se muestra el código de programación de la UDF empleada en la simulación.

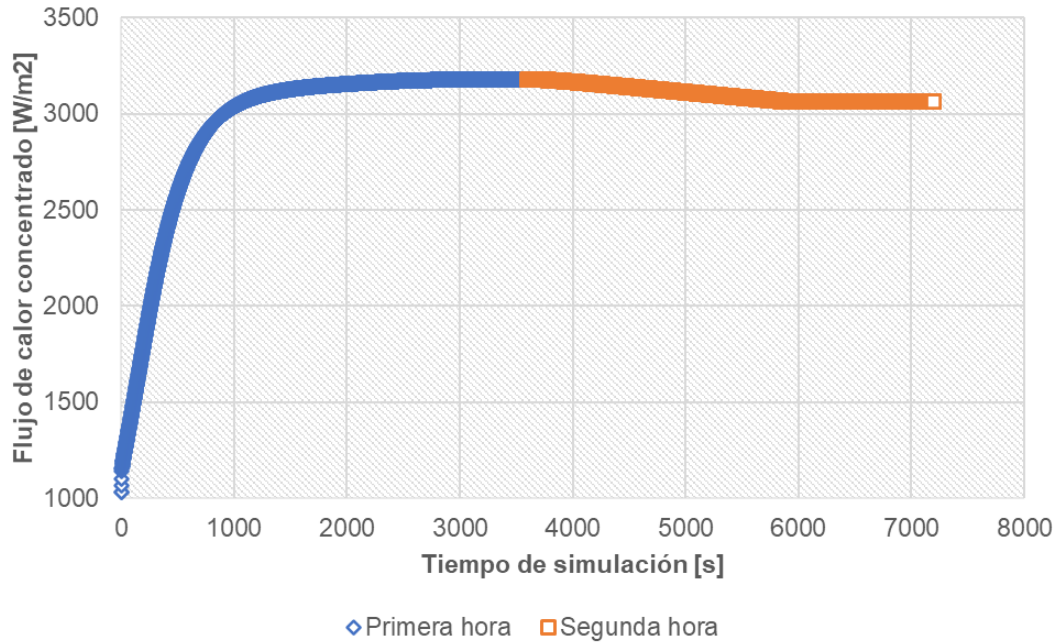


Figura 4.28 Flujo de calor concentrado en la cubierta de vidrio para valores de radiación solar altos: superiores a $800 \frac{W}{m^2}$

Fuente: Autor

$$\dot{q} = -1 \cdot 10^{-11}t^4 + 9 \cdot 10^{-7}t^3 - 3 \cdot 10^{-3}t^2 + 4.1253t + 1118.4 \quad \text{Ecuación 28}$$

$$\dot{q} = -2 \cdot 10^{-12}t^4 + 5 \cdot 10^{-8}t^3 - 4 \cdot 10^{-4}t^2 - 1.4668t + 1339.1 \quad \text{Ecuación 29}$$

La Figura 4.29 muestra el comportamiento de la temperatura de salida del HTF en cada tubería que compone el receptor y en la cubierta de vidrio; la variación en los datos de salida como se explicó previamente se debe a la forma de cómputo de la temperatura sobre la superficie de salida. El comportamiento general es similar a la temperatura de la cubierta de vidrio, misma que se estabiliza a los 3000 [s] (50 [min])

para la primera hora de simulación y a los 5600 [s] (1[h], 34 [min]) para la segunda hora de simulación, aproximadamente. El valor de estabilización de la temperatura de salida para el HTF cuando se consideran dos horas de baja radiación solar es de aproximadamente 370 [K].

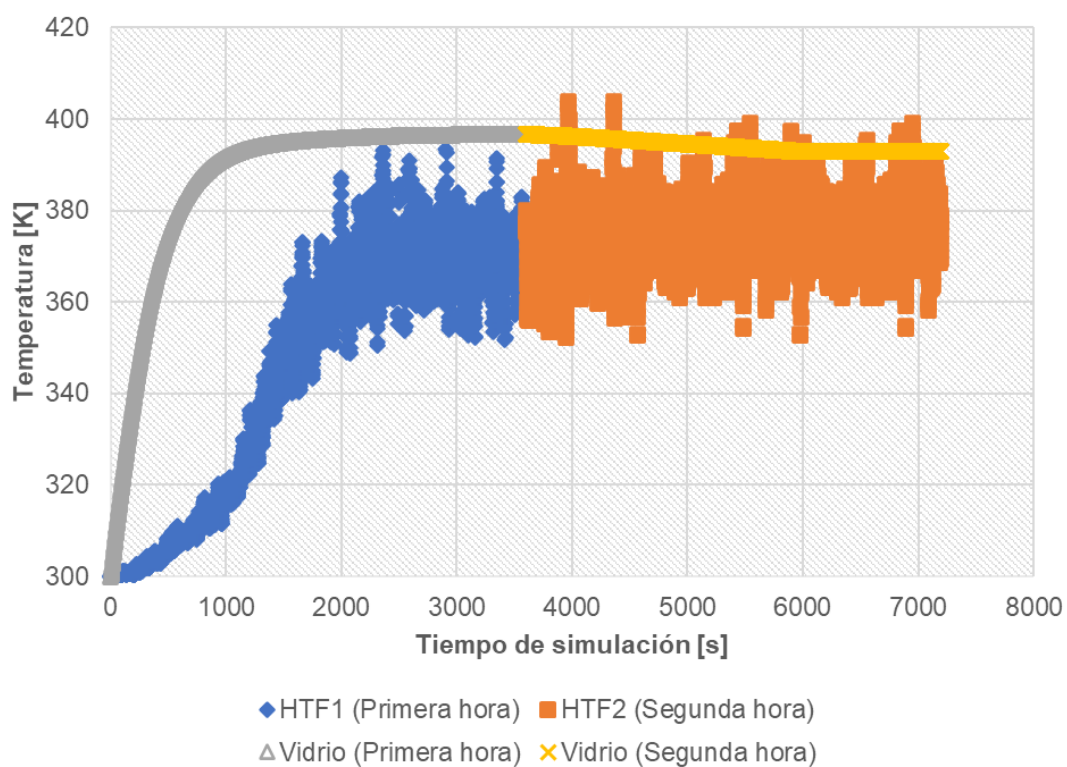


Figura 4.29 Temperaturas del sistema. Radiación solar alta:

superiores a $800 \frac{W}{m^2}$

Fuente: Autor

La Figura 4.30 muestra el detalle de la temperatura de salida del HTF en los primeros 1000 [s] de simulación, se puede apreciar que el HTF entre cada tubería de transporte varía por menos de 1[K], este comportamiento se repite en todo el dominio de

simulación, sin embargo, no se lo expone gráficamente para facilitar la visualización del comportamiento térmico del HTF.

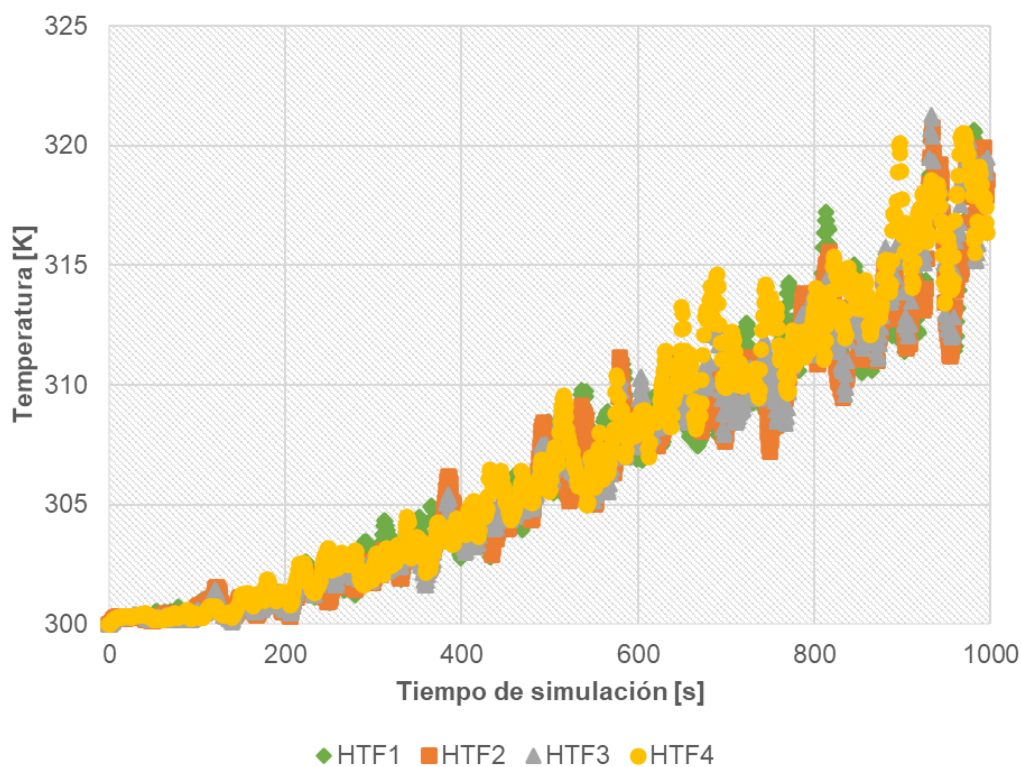


Figura 4.30 Temperaturas de salida del HTF en cada tubería con radiación solar alta. Detalle de los primeros 1000 [s]

Fuente: Autor

Al finalizar la simulación en estado transitorio se aprecia que el HTF alcanza una temperatura promedio de 355 [K] con valores de radiación solar baja y 370 [K] con radiación solar alta, estas temperaturas están sobre la necesidad del usuario (323 [K]), por lo que la aplicación de un concentrador solar lineal Fresnel de 7 [m] de longitud con 14 reflectores primarios puede satisfacer las demandas energéticas del secado de granos de maíz en zonas rurales de la ciudad de Guayaquil y sus alrededores. En

este estudio no se realizó un análisis de pérdidas de calor debido al transporte del HTF desde el concentrador lineal hasta el secador de alimentos, sin embargo, debido al uso eficiente de los sistemas, dichas pérdidas no deben superar el 10%, por lo que el sistema presentado en esta investigación satisface la problemática planteada.

CAPÍTULO 5

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

1. La baja calidad de los productos agrícolas sometidos al proceso de secado tradicional motiva a la implementación de nueva tecnología, que de preferencia utilice recursos renovables como principal fuente energética; los secadores solares que emplean concentradores lineales Fresnel son una alternativa para los agricultores rurales de la región Costa del Ecuador debido a su inversión inicial, fácil mantenimiento y diversidad de productos que pueden ser procesados con esta tecnología; este proyecto detalla las principales ventajas y desventajas de este tipo de concentradores y expone simulaciones CFD para el secado de granos de maíz y productos con similares condiciones de humedad inicial y residual utilizando como fuente energética el recurso solar disponible en la provincia de Guayas y sus alrededores.
2. A partir de simulaciones CFD se analizó el comportamiento térmico de un concentrador solar de media temperatura tipo Fresnel con cavidad receptora de múltiples tuberías de geometría trapezoidal que puede ser empleado por agricultores rurales de la provincia de Guayas en el secado de granos de maíz, con base en estas simulaciones se realizaron estudios paramétricos para definir las mejores condiciones geométricas y las fluctuaciones en el comportamiento térmico al variar parámetros de entrada y finalmente se realizó un estudio cualitativo en estado transitorio para definir el tiempo en el que el sistema propuesto alcanza el equilibrio término; en base a lo descrito previamente se

puede concluir que se cumplieron los objetivos principales y específicos de la tesis de grado propuesta.

3. La razón de concentración del sistema propuesto es de aproximadamente 3, sin embargo, en la Tabla 1 se menciona que la tecnología Fresnel alcanza razones de concentración entre 10 y 40; la diferencia de estos valores radica en la longitud del concentrador, como se mencionó en los estudios paramétricos a mayor longitud del concentrador la razón de concentración aumenta pero también se requiere más espacio geográfico lo que implica menor espacio para siembra del producto a procesarse.
4. El número de elementos del mallado define el tiempo de simulación y la exactitud de los resultados obtenidos, a mayor número de elementos el tiempo de simulación puede llegar a crecer de manera exponencial, sin embargo, existe un límite en el que los resultados obtenidos no tienen una variación significativa, definir este punto es indispensable para la selección de la malla a utilizarse. En este trabajo se realizó el estudio de malla con 6 mallas diferentes, mismas que fueron seleccionadas en función de las superficies de interés y del número de elementos que permite la licencia ANSYS disponible, seleccionando la malla 4 que tiene aproximadamente 660000 elementos para todo el sistema estudiado y requiere 1100 [s] de tiempo computacional en la simulación de estado estable, dicha malla fue la que brindó una buena relación entre el tiempo computacional consumido por la simulación y la estabilidad y exactitud de los resultados obtenidos.
5. Debido a los efectos de sombreado parcial, mismos que se producen por el ángulo de reflexión del rayo solar incidente sobre los reflectores primarios, en la cubierta del receptor no se concentra el calor de manera uniforme, generando dos zonas de menor flujo de concentración: el primer segmento longitudinal del receptor y el último segmento, ambos con una longitud aproximada de 1[m].

6. En el análisis térmico de la cavidad receptora se identificó que la superficie más caliente es la cubierta de vidrio puesto que esta recibe directamente el flujo de calor concentrado, y transfiere este calor por efectos de conducción entre el material y convección con aire al interior de la cavidad. En las salidas del HTF se aprecia que las tuberías 3 y 4 tienen los gradientes más altos de temperatura, variando aproximadamente 10 [K] de los valores de temperatura obtenidos en las tuberías 1 y 2; esta diferencia radica principalmente en el modelo de radiación utilizado y en la forma de cálculo de este parámetro según la configuración de ANSYS, otros modelos de radiación brindan mayor precisión de los resultados en las paredes de la geometría o analizan a más detalle los fenómenos de radiación, sin embargo, esto requiere mayor demanda computacional.
7. El número de reflectores primarios determina la cantidad de energía concentrada en la cavidad receptora, el estudio paramétrico realizado muestra que, a partir de los 14 reflectores, distribuidos simétricamente con relación a la cavidad receptora, el flujo de calor concentrado y por lo tanto la temperatura del HTF se mantiene constante. El flujo de calor concentrado en la cubierta de vidrio es de $1950 \frac{W}{m^2}$, mientras que la temperatura del HTF a la salida de cada tubería tiene un valor promedio de 356 [K].
8. El estudio paramétrico basado en la longitud del receptor establece que la relación existente entre este parámetro y la temperatura de salida del HTF es logarítmica, de tal forma que existe un límite en la longitud del concentrador que permite un crecimiento significativo en la temperatura, aproximadamente este valor ronda los 200 [m] con una temperatura de salida de 535 [K]. Al considerar un concentrador de 7 [m] de longitud, valor seleccionado debido a las limitaciones de la licencia ANSYS, la temperatura de salida del HTF que puede alcanzarse es de 362 [K].

9. El estudio paramétrico sobre el flujo másico de HTF mostró que la temperatura del HTF es inversamente proporcional al flujo másico, según el comportamiento mostrado en las ecuaciones obtenidas a partir de la simulación CFD, cuando el flujo másico de HTF necesario supera los 0.6 [kg/s] el fluido no incrementa su temperatura, es decir, se mantiene en 300 [K].
10. El estudio paramétrico sobre la radiación solar incidente muestra que la temperatura de salida del HTF y el flujo de calor concentrado en la cubierta de vidrio son directamente proporcionales al parámetro de ingreso, la temperatura máxima alcanzable según este comportamiento es de 382 [K], con un valor de radiación solar incidente de 1530 [$\frac{W}{m^2}$] y un flujo de calor concentrado de máximo 3000 [$\frac{W}{m^2}$].
11. Los resultados obtenidos en el análisis transitorio muestran que el flujo de calor se estabiliza a los 40 [min] en la primera hora de análisis y demoran una hora más en estabilizarse en caso de que exista una fluctuación en la radiación solar incidente, ya sea superior o inferior al valor inicial. Al tener bajos valores de radiación solar incidente se alcanza una temperatura de salida del HTF de 355 [K], mientras que con valores de alta radiación se pueden alcanzar valores de hasta 370 [K], en ambos casos se satisface la temperatura de secado del grano de maíz (323 [K]).
12. El sistema planteado en el presente proyecto pretende satisfacer la demanda de secado en zonas rurales, por lo que la inversión inicial es determinante para el agricultor, la búsqueda bibliográfica realizada expone que para este tipo de tecnología se requiere aproximadamente 1340 [$\frac{USD}{kW}$] y para alcanzar una variación de 50°C en el HTF se requieren 25 [kW] de potencia térmica; estos parámetros determinan que la inversión inicial necesaria es de aproximadamente 34 000 USD; por lo que actualmente un concentrador lineal

Fresnel es tecnología restringida a agricultores con alto poder adquisitivo. Considerando la eliminación de subsidios por parte del Estado, y la contaminación por el uso de combustibles tradicionales, la inversión en tecnología de aprovechamiento solar representa para el agricultor rural una fuente de energía constante cuyo precio no varía con el tiempo y que no depende de decisiones políticas, además de crear independencia energética en la zona de instalación.

13. El concentrador lineal Fresnel planteado puede alcanzar temperaturas máximas en el HTF de 370 [K] con valores de radiación solar altos (superiores a $800[\frac{W}{m^2}]$), la potencia térmica obtenida es de aproximadamente 37[kW], asumiendo que se pierde un 10% de esta energía en el transporte de la misma desde el concentrador hasta la cámara de secado y que el producto agrícola es maíz, y que el secador de alimentos tiene una eficiencia del 50%; el sistema propuesto tiene una capacidad de secado de $600[\frac{kg}{h}]$.

5.2. Recomendaciones

1. El Ecuador es un país que cultiva gran diversidad de granos, frutas y vegetales que en su mayoría son secados a través de procesos tradicionales, se pueden utilizar las simulaciones presentadas en este trabajo como base para futuras investigaciones en diversas regiones del país y con varios productos agrícolas según las necesidades del agricultor local.
2. Si se desea tener un análisis más exacto del impacto que tiene la radiación solar incidente en el concentrador solar se pueden emplear los datos de estaciones meteorológicas instaladas cerca de la zona de actuación donde se realiza el estudio, estos datos pueden ser tratados por hora o promedios diarios según las necesidades del investigador.

3. El grano de maíz, según sus curvas de secado experimentales, requiere al menos 20 horas del proceso térmico de secado, considerando que existen buenas condiciones climáticas en la zona de actuación el concentrador solar deberá proveer de energía por al menos 4 días a un equipo de secado. Dado que las fluctuaciones de radiación solar son varias a lo largo del día se debe considerar la instalación de un sistema energético principal para que suministre energía de manera constante para evitar la degradación del producto tratado.
4. Las simulaciones CFD son dependientes del recurso computacional disponible y de la licencia del programa seleccionado, para optimizar tiempo de simulación y calidad de los resultados se recomienda que al realizar futuras simulaciones se utilice una estación de investigación con procesadores diseñados para simulaciones CFD y se utilicen licencias académicas o industriales del programa seleccionado.
5. La selección de los modelos de radiación y turbulencia en el programa CFD puede alterar los resultados obtenidos, para una correcta interpretación de los datos se deben comparar los métodos seleccionados y los resultados obtenidos con trabajos experimentales o con trabajos publicados por otros investigadores.
6. Durante el procesamiento de datos del estado transitorio se recomienda calcular la temperatura de salida del HTF como un promedio superficial para obtener el valor en la salida y como un promedio volumétrico para analizar el comportamiento del HTF a lo largo de la tubería de transporte.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdel-Dayem, Adel M., y M. A. Mohamad. 2001. "Potential of solar energy utilization in the textile industry-a case study". *Renewable Energy* 23(3-4):685-94. doi: 10.1016/S0960-1481(00)00154-3.
- Abraham, Pleasa Serin, y Haripriya Gundimeda. 2014. "Barriers to the Deployment of Low Carbon Technologies: Case Study of Arun&sup>TM&sup>; 160 Solar Concentrator for Industrial Process Heat". *Low Carbon Economy* 05(03):117-25. doi: 10.4236/lce.2014.53012.
- Alvarez, Doris, y Xavier Serrano. 2017. "Evaluación de la orientación y el ángulo de inclinación óptimo de una superficie plana para maximizar la captación de irradiación solar en Cuenca-Ecuador". Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.
- Andersen, Elsa, y Simon Furbo. 2009. "Theoretical variations of the thermal performance of different solar collectors and solar combi systems as function of the varying yearly weather conditions in Denmark". *Solar Energy* 83(4):552-65. doi: 10.1016/j.solener.2008.10.009.
- ANSYS. 2012a. "ANSYS Fluent Theory Guide". 15317(November):514. doi: 10.1016/0140-3664(87)90311-2.
- ANSYS. 2012b. "ANSYS FLUENT User's Guide". *ANSYS FLUENT User's Guide* 15317(November):2498. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- Arce, Nathaly, y Raúl Reyna. 2020. "Diseño de un sistema híbrido para la deshidratación de frutas". Escuelaa Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil.
- Asoegwu, Sabbas, Kevin N. Nwaigwe, Nwakuba N. R, SN Asoegwu, y KN Nwaigwe. 2016. *Energy requirements for drying of sliced agricultural products: A review*. Vol. 18.
- Bellos, Evangelos. 2019. "Progress in the design and the applications of linear Fresnel

reflectors – A critical review”. *Thermal Science and Engineering Progress* 10:112–37.

Bellos, Evangelos, y Christos Tzivanidis. 2018. “Development of analytical expressions for the incident angle modifiers of a linear Fresnel reflector”. *Solar Energy* 173(April):769–79. doi: 10.1016/j.solener.2018.08.019.

Bellos, Evangelos, Christos Tzivanidis, y Angelos Papadopoulos. 2018. “Optical and thermal analysis of a linear Fresnel reflector operating with thermal oil, molten salt and liquid sodium”. *Applied Thermal Engineering* 133(December 2017):70–80. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.01.038.

Bennamoun, Lyes, y Azeddine Belhamri. 2003. “Design and simulation of a solar dryer for agriculture products”. *Journal of Food Engineering* 59(2–3):259–66. doi: 10.1016/S0260-8774(02)00466-1.

Benyakhlef, S., A. Al Mers, O. Merroun, A. Bouatem, N. Boutammachte, S. El Alj, H. Ajdad, Z. Erregueragui, y E. Zemmouri. 2016. “Impact of heliostat curvature on optical performance of Linear Fresnel solar concentrators”. *Renewable Energy* 89:463–74. doi: 10.1016/j.renene.2015.12.018.

Blanco Cano, Lucía, Laura Valdecabres Sanmartín, y Tecnun Universidad de Navarra. 2016. “Guía para el Desarrollo de Proyectos de Secado Solar en Comunidades Rurales”. *Energía sin fronteras*.

Cabascango, Omar, y Juan De la Vega. 2018. “Manual de deshidratación”.

Chen, Yulong, Jincai Zhao, Zhizhu Lai, Zheng Wang, y Haibin Xia. 2019. “Exploring the effects of economic growth, and renewable and non-renewable energy consumption on China’s CO₂ emissions: Evidence from a regional panel analysis”. *Renewable Energy* 140:341–53. doi: 10.1016/j.renene.2019.03.058.

Coronel, Juan. 2005. *Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor*. Vol. 3. Versión 3. Sevilla: Universidad de Sevilla.

- Dávalos, Emilio, Edwin Casa, y Ximena Hidalgo. 2020. "Modelo numérico CFD del túnel de carga, tubería a presión y distribuidores utilizando el paquete computacional ANSYS FLUENT. Caso de aplicación Proyecto Hidroeléctico Sopladora". Escuela Politécnica Nacional.
- Delgado-Plaza, Emérita, Miguel Quilambaqui, Juan Peralta-Jaramillo, Hector Apolo, y Borja Velázquez-Martí. 2020. "Estimation of the energy consumption of the rice and corn drying process in the equatorial zone". *Applied Sciences (Switzerland)* 10(21):1–21. doi: 10.3390/app10217497.
- Delgado, Emérita, Juan Peralta, y A. Barriga. 2018. "Secadores solares - térmicos para granos y frutas para utilizarlo en zonas remotas". *ESPOL* 3(2):1–3.
- De Dios, Carlos Alberto, y FAO. 1996. *Secado de granos y secadoras*. editado por Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Ellabban, Omar, Haitham Abu-Rub, y Frede Blaabjerg. 2014. "Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39:748–64. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.113.
- FAO. 2021. "Food and Agricultural Organization". Recuperado (<http://www.fao.org/home/es/>).
- Fudholi, Ahmad, Kamaruzzaman Sopian, B. Bakhtyar, Mohamed Gabbasa, Mohd Yusof Othman, y Mohd Hafidz Ruslan. 2015. "Review of solar drying systems with air based solar collectors in Malaysia". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51:1191–1204. doi: 10.1016/j.rser.2015.07.026.
- García, Maribel, Armando Alvis, y Carlos García. 2015. "Modelado De La Cinética De Secado De Mango Pre-Tratadas Con Deshidratación Osmótica Y Microondas". *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 13(2):22. doi: 10.18684/bsaa(13)22-29.

- Giovannelli, A. 2015. "State of the art on small-scale concentrated solar power plants". *Energy Procedia* 82:607–14. doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.008.
- Haberle, Andreas, Michael Berger, Stephan Scherer, y Johannes Farian. 2014. *La Tecnología CSP Fresnel. El estado de la tecnología y una visión general del mercado*. Santiago de Chile.
- Hereher, Mohamed, y Ahmed M. El Kenawy. 2020. "Exploring the potential of solar, tidal, and wind energy resources in Oman using an integrated climatic-socioeconomic approach". *Renewable Energy* 161:662–75. doi: 10.1016/j.renene.2020.07.144.
- Horta, Pedro, Christoph Brunner, Korbinian Kramer, y Elimar Frank. 2016. "IEA/SHC T49 Activities on Process Heat Collectors: Available Technologies, Technical-Economic Comparison Tools, Operation and Standardization Recommendations". *Energy Procedia* 91:630–37. doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.217.
- IEA. 2021. "International Energy Agency". Recuperado (<https://www.iea.org/>).
- Incropera, Frank, David Dewitt, Theodore Bergman, y Adrienne Lavine. 2002. *Fundamentals of Heat and Mass transfer*. Séptima Ed. Estados Unidos: Jhon Wiley & Sons.
- Inzunza, J. 2015. "Radiacion solar y terrestre". *Ciencias integradas* 15.
- IRENA. 2020. "Renewable Energy Technologies". *Data & Statistics*. Recuperado (<https://www.irena.org/>).
- Jaramillo, Daniela Carolina, y Freddy Ordoñez. 2017. "Modelación y simulación del comportamiento térmico de un receptor de media temperatura tipo Fresnel de geometría trapezoidal." Escuela Politécnica Nacional.
- Kalogirou, Soteris A. 2004. *Solar thermal collectors and applications*. Vol. 30.
- Kalogirou, Soteris A., Sotirios Karellas, Konstantinos Braimakis, Camelia Stanciu, y Viorel Badescu. 2016. "Exergy analysis of solar thermal collectors and

- processes". *Progress in Energy and Combustion Science* 56:106–37. doi: 10.1016/j.pecs.2016.05.002.
- Kramer, Korbinian. 2012. "Interaction of regulation and innovation: Solar air heating collectors". *Energy Procedia* 30:1311–21. doi: 10.1016/j.egypro.2012.11.144.
- Kumar, Anil, Mamta Sharma, Pankaj Thakur, Vijay Kumar Thakur, Sameer S. Rahatekar, y Rajesh Kumar. 2020. "A review on exergy analysis of solar parabolic collectors". *Solar Energy* 197(September 2019):411–32. doi: 10.1016/j.solener.2020.01.025.
- Kumar, Laveet, M. Hasanuzzaman, y N. A. Rahim. 2019. "Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review". *Energy Conversion and Management* 195(May):885–908. doi: 10.1016/j.enconman.2019.05.081.
- Kumar, Vinod, R. L. Shrivastava, y S. P. Untawale. 2015. "Fresnel lens: A promising alternative of reflectors in concentrated solar power". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44:376–90.
- Leonidivna, Olena, y Paúl Torres. 2018. *Introducción al análisis térmico y de fluidos mediante ANSYS*. 1ra Edició. Cuenca-Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Leonzio, Grazia. 2017. "Solar systems integrated with absorption heat pumps and thermal energy storages: state of art". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70(November 2016):492–505. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.117.
- Li, Qiyuan, Cheng Zheng, Ali Shirazi, Osama Bany Mousa, Fabio Moscia, Jason A. Scott, y Robert A. Taylor. 2017. "Design and analysis of a medium-temperature, concentrated solar thermal collector for air-conditioning applications". *Applied Energy* 190:1159–73. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.01.040.
- Lutz, K., W. Mühlbauer, J. Müller, y G. Reisinger. 1987. "Development of a multi-purpose solar crop dryer for arid zones". *Solar and Wind Technology* 4(4):417–

24. doi: 10.1016/0741-983X(87)90016-6.

Madridsolar. 2006. "Guía de la Energía Solar". 26 7:66.

Malagueta, Diego, Alexandre Szklo, Rafael Soria, Ricardo Dutra, Roberto Schaeffer, y Bruno Soares Moreira Cesar Borba. 2014. "Potential and impacts of Concentrated Solar Power (CSP) integration in the Brazilian electric power system". *Renewable Energy* 68(April):223–35. doi: 10.1016/j.renene.2014.01.050.

MERNNR. 2021. "Balance Energético Nacional 2020". *Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables* Primera Ed:15–16.

De Michelis, Antonio, y Elizabeth Ohaco. 2015. "Deshidratación y desecado de frutas, hortalizas y hongos".

Miller, W. F., y Wm H. Reed. 1977. "Ray-Effect Mitigation Methods for Two-Dimensional Neutron Transport Theory." *Nuclear Science and Engineering* 62(3):391–411. doi: 10.13182/NSE62-391.

Miranda Lugo, Pedro José, Keimer Alonso Martínez Padilla, Ramiro Torres Gallo, Jorge Mario Mendoza Fandiño, y Rafael David Gómez Vasquez. 2018. "Evaluación experimental del secado de yuca variedad venezolana por medio de un sistema híbrido de calentamiento de aire". *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería* 26(2):329–38. doi: 10.4067/s0718-33052018000200329.

Modest, Michael. 2013. *Radiative Heat Transfer*. Third Edit. New York: Elsevier Inc.

Moghimi, M. A., K. J. Craig, y J. P. Meyer. 2015. "A novel computational approach to combine the optical and thermal modelling of Linear Fresnel Collectors using the finite volume method". *Solar Energy* 116:407–27. doi: 10.1016/j.solener.2015.04.014.

Moghimi, M. A., A. Rungasamy, K. J. Craig, y J. P. Meyer. 2016. "Introducing CFD in the optical simulation of linear Fresnel collectors". *AIP Conference Proceedings* 1734(May 2016). doi: 10.1063/1.4949039.

- Morato, María Pantín. 2019. "Análisis bidimensional de la influencia de la separación entre los tubos del receptor de una central termosolar tipo torre". Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.
- Naciones Unidas. 2015. "Objetivos de Desarrollo Sostenible". Recuperado el 16 de diciembre de 2021 (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>).
- NASA. 2021. "NASA Prediction of Worldwide Energy Resources". *The POWER Project*.
- NREL. 2020. "Advancing the Science of Solar Data | National Solar Radiation Database (NSRDB)". *CPS Projects by Technology*. Recuperado el 20 de diciembre de 2021 (<https://nsrdb.nrel.gov/>).
- OLADE, BID, IRENA, y CEPAL. 2021. "HUB de Energía. América Latina y El Caribe". *Generación primaria con energías renovables*.
- Peinado Gonzalo, Alfredo, Alberto Pliego Marugán, y Fausto Pedro García Márquez. 2019. "A review of the application performances of concentrated solar power systems". *Applied Energy* 255.
- Pijush K. Kundu, Ira M. Cohen, y David R Dowling. 2016. *Fluid Mechanics (6th edition)*.
- Portal Frutícola. 2016. "Cómo hacer un deshidratador solar paso a paso". Recuperado el 16 de diciembre de 2021 (<https://www.portalfruticola.com/noticias/2016/07/23/como-hacer-un-deshidratador-solar-paso-a-paso/>).
- REN21. 2020. "Renewables 2021 Global Status Report". 1–371.
- Rodríguez, Francisco. 2021. "Ficha Informativa de Proyecto 2021". 15.
- Rodríguez, Juan, y Ricardo Bartosik. 2006. "Secado de granos".
- Sansaniwal, Sunil Kumar, Vashimant Sharma, y Jyotirmay Mathur. 2018. "Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications: A comprehensive

- review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82(May):1576–1601. doi: 10.1016/j.rser.2017.07.003.
- Sarmiento, Pedro. 2007. *Energía solar en arquitectura y construcción*. editado por R. Editores. Santiago: RIL.
- Shahabuddin, M., M. A. Alim, Tanvir Alam, M. Mofijur, S. F. Ahmed, y Greg Perkins. 2021. "A critical review on the development and challenges of concentrated solar power technologies". *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 47.
- Sharma, Ashish K., Chandan Sharma, Subhash C. Mullick, y Tara C. Kandpal. 2017. "Solar industrial process heating: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 78(January):124–37. doi: 10.1016/j.rser.2017.04.079.
- Sharma, Atul, C. R. Chen, y Nguyen Vu Lan. 2009. "Solar-energy drying systems: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(6–7):1185–1210. doi: 10.1016/j.rser.2008.08.015.
- Solar Payback. 2017. "Solar heat for industry". *Federal Ministry for the environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety* 18.
- Stiling, James, Simon Li, Pieter Stroeve, Jim Thompson, Bertha Mjawa, Kurt Kornbluth, y Diane M. Barrett. 2012. "Performance evaluation of an enhanced fruit solar dryer using concentrating panels". *Energy for Sustainable Development* 16(2):224–30. doi: 10.1016/j.esd.2012.01.002.
- Tian, Y., y C. Y. Zhao. 2013. "A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications". *Applied Energy* 104:538–53. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.11.051.
- El Tiempo. 2022. "Radiación solar en Guayaquil". Recuperado el 23 de febrero de 2022 (<https://www.tutiempo.net/radiacion-solar/guayaquil.html>).
- Vaca, Diego, y Freddy Ordoñez. 2019. "Mapa Solar del Ecuador 2019". *SCINERGY* 1–30.

- Venegas, Christian, y Rodrigo Barraza. 2019. "Diseño y construcción de un concentrador Lineal Fresnel". Universidad Técnica Federico Santa María.
- Villar, Rafael. 2012. "Estudio del rendimiento óptico de un captador Fresnel". Universidad de Sevilla.
- Weather Atlas. 2021. "Previsión metereológica y clima mensual Guayaquil - Ecuador". *Pronóstico del tiempo*.
- Xie, W. T., Y. J. Dai, R. Z. Wang, y K. Sumathy. 2011. "Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(6):2588–2606. doi: 10.1016/j.rser.2011.03.031.
- Yu, Jinna, Yuk Ming Tang, Ka Yin Chau, Raima Nazar, Sajid Ali, y Wasim Iqbal. 2022. "Role of solar-based renewable energy in mitigating CO2 emissions: Evidence from quantile-on-quantile estimation". *Renewable Energy* 182:216–26. doi: 10.1016/j.renene.2021.10.002.
- Zhang, H. L., J. Baeyens, J. Degrève, y G. Cacères. 2013. "Concentrated solar power plants: Review and design methodology". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22:466–81. doi: 10.1016/j.rser.2013.01.032.

ANEXOS

ANEXO A

CÓDIGO DE LA UDF UTILIZADO EN LA SIMULACIÓN DE BAJA RADIACIÓN SOLAR

```
#include "udf.h"

DEFINE_PROFILE(surfaceincident,t,i)
{
    real surface;
    real time;
    face_t f;

    time= CURRENT_TIME;

    if ((time>=0)&&(time<3600))
    {
        surface=-3e-11*(time*time*time*time)+2e-07*(time*time*time)-
        0.0006*(time*time)+0.7826*(time)+1164.9;
    }
    if ((time>=3600)&&(time<=7200))
    {
        surface-1e-09*(time*time*time)+2e-05*(time*time)-0.0998*(time)+1684.7;
    }

    begin_f_loop(f,t)
    {
        F_PROFILE(f,t,i)=surface;
    }
    end_f_loop(f,t)
}
```

ANEXO B

CÓDIGO DE LA UDF UTILIZADO EN LA SIMULACIÓN DE ALTA RADIACIÓN SOLAR

```
#include "udf.h"

DEFINE_PROFILE(surfaceincident,t,i)
{
    real surface;
    real time;
    face_t f;

    time= CURRENT_TIME;

    if ((time>=0)&&(time<3600))
    {
        surface=-1e-10*(time*time*time*time)+9e-07*(time*time*time)-
        0.003*(time*time)+4.1253*(time)+1118.4;
    }
    if ((time>=3600)&&(time<=7200))
    {
        surface=-2e-12*(time*time*time*time)+5e-8*(time*time*time)-
        0.0004*(time*time)+1.4668*(time)+1339.1;
    }

    begin_f_loop(f,t)
    {
        F_PROFILE(f,t,i)=surface;
    }
    end_f_loop(f,t)
}
```