

Mejora en el desempeño de paneles solares usando el principio de la chimenea solar

**Marco Antonio Lagarez Oviedo
Oscar Felipe Vera Arenas**

**Trabajo de grado presentado como requisito
para optar al título de ingeniero mecánico**

**Director de propuesta
Dr. Jaid Eduardo Quiroga Méndez**

**Codirectora
Natalia Prieto Jiménez
Dra. en Ingeniería Química**

**Codirector
Omar Andrés Ardila Sánchez
Maestría en Ingeniería Mecánica**

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Bucaramanga
2021**

Contenido

Introducción	12
1 Objetivos.....	13
1.1 Objetivo general.....	13
1.1.1 Objetivos específicos	13
2 Justificación	14
3 Metodología	16
4 Antecedentes	17
4.1 Nivel internacional.....	17
4.2 Nivel nacional.	26
5 Caracterización de la chimenea solar.....	28
5.1 Elementos de una chimenea solar.....	28
5.2 Radiación solar.....	29
5.2.1 Tipos de Radiación	29
5.2.2 La Irradiancia	29
5.2.3 Años típicos meteorológicos (TMY)	30
5.2.4 Caracterización del panel solar	31
5.2.5 Potencia del panel fotovoltaico.....	32
6 Modelo matemático y numérico	32
6.1 Abordaje.....	33
6.1.1 Convección Natural	34
6.1.1.1. Convección natural sobre superficies planas	34
6.2 Modelo de ecuaciones realizados en Matlab	38
6.2.1 Modelo teórico.....	45

6.2.1.1.	Balance de energía en el panel solar	46
6.2.1.2.	Balance de energía en el aire	48
6.2.1.3.	Balance de energía de la madera.....	50
6.2.1.4.	Análisis matricial	51
6.2.1.5.	Velocidad del aire	52
6.2.1.6.	Algoritmo de solución al modelo planteado	53
7	Modelo computacional.....	54
7.1	Computational Fluid Dynamics (CFD) aplicado en chimenea solar	54
7.2	Modelo de Boussinesq	55
7.3	Modelo de Turbulencia.....	55
7.3.1	Semi-Implicit Method (SIMPLE).....	56
7.4	Geometría.....	56
7.5	Condiciones termodinámicas y propiedades de los fluidos	58
7.6	Materiales y propiedades	59
7.7	Condiciones de frontera	59
7.8	Resultados	61
7.9	Independencia numérica de la malla.....	61
7.9.1	Validación del modelo	64
7.10	Efecto de la chimenea solar	66
7.11	Efecto de la chimenea solar en Bucaramanga.....	71
8	Conclusiones	73
	Referencias Bibliográficas	77
	Apéndices.....	79

Lista de Figuras

Figura 1 Rendimiento eléctrico y dependencia de la temperatura Nota: Adaptado de (Energético 2017)	14
Figura 2 Perfil de temperaturas y velocidades de la convección natural de una placa vertical a una temperatura $T_s > T_\infty$ Fuente: (Cengel and Afshin J 2004)	35
Figura 3 Esquema del modelo termodinámico de una placa plana para el panel fotovoltaico	37
Figura 4 Esquema de modelo termodinámico global, chimenea + panel solar	38
Figura 5 Irradiancia kirkuk 21 Marzo	42
Figura 6 Irradiancia kirkuk 21 Abril	42
Figura 7 Irradiancia kirkuk 21 Mayo	42
Figura 8 Irradiancia kirkuk 21 Junio	42
Figura 9 Irradiancia kirkuk 21 Julio	43
Figura 10 Balance de energía en el panel solar	46
Figura 11 Balance de energía en el aire	49
Figura 12 Balance de energía en la madera	50
Figura 13 Diagrama de flujo solución basal, Matlab (Sánchez 2020)	53
Figura 14 Montaje de proyecto new design chimney	57
Figura 15 Vista lateral de la chimenea solar creado en Mesh ANSYS	58
Figura 16 Vista frontal de la chimenea solar creado en Mesh ANSYS	58
Figura 17 Dimensiones del panel solar creado en Mesh ANSYS	58
Figura 18 Malla computacional generada para las simulaciones numéricas	62
Figura 19 Test de independencia de malla: Temperatura del panel en función del número de elementos	63
Figura 20 Comparación de perfiles de temperaturas en función del tiempo de las pruebas obtenidas por Omer (azul) y los resultados de la simulación (naranja).	64

Figura 21 Modelo de temperatura en la placa solar	67
Figura 22 Modelo de temperatura panel solar + chimenea solar	67
Figura 23 Efecto de la chimenea solar en Kirkuk, Irak	68
Figura 24 velocidad del aire de entrada en la chimenea	69
Figura 25 velocidad del aire de salida en la chimenea.....	70
Figura 26 Curvas comparativas del coeficiente de transferencia global, convección interna e irradiancia según la hora del día para los días representativos de los meses de marzo y Julio en kirkuk	70
Figura 27 Curvas comparativas de la velocidad del aire e irradiación según la hora para los días representativos de los meses de marzo y Julio en kirkuk	71
Figura 28 Curvas comparativas del coeficiente de transferencia global, convección interna e irradiancia según la hora del día para los días representativos de los meses de marzo y Julio	72
Figura 29 Curvas comparativas de la velocidad del aire e irradiación según la hora para los días representativos de los meses de marzo y Julio.....	72
Figura 30 Efecto de la chimenea solar en Bucaramanga, Colombia	73
Figura 31 Design modeler.....	79
Figura 32 mesh.....	80
Figura 33 Body sizing.....	81
Figura 34 Setup general en fluent	81
Figura 35 Models	82
Figura 36 Viscous model	82
Figura 37 Configuración de fluido: Aire	83
Figura 38 Configuración de solido: Aluminio	84
Figura 39 Configuración de sólido: Silicio.....	85
Figura 40 Configuración para celdas: Aire.....	86

Figura 41 Configuración para celdas: Panel solar	86
Figura 42 Operating conditions	87
Figura 43 Inlet: entrada de la chimenea.....	88
Figura 44 Outlet: salida de la chimenea.....	89
Figura 45 Wall panel.....	90
Figura 46 Wall room.....	91
Figura 47 Solution Methods.....	92
Figura 48 Initialize.....	93
Figura 49 Run calculation.....	94
Figura 50 Results	95
Figura 51 Report Surface	96
Figura 52 Diagrama de flujo de independencia de malla Nota: Adaptado de Prieto, Natalia. ...	100
Fig 53 Diagrama de flujo solución Segregado SIMPLE	101
Figura 54 Velocidad vs radiación Nota: adaptado de Pruebas de Laboratorio por Ardila Sánchez, Omar	101

Lista de Tablas

Tabla 1 nomenclatura ecuaciones cálculo q_{sb}	38
Tabla 2 Nomenclatura de ecuaciones modelo chimenea solar	43
Tabla 3 Información panel / madera	46
Tabla 4 Condiciones medioambientales	58
Tabla 5 materiales y propiedades.....	59
Tabla 6 Condiciones de operación para la validación del modelo de la chimenea solar	60
Tabla 7 Número de elementos de la malla seleccionada	62
Tabla 8 Condiciones de simulación para el test de independencia de malla	62
Tabla 9 Parámetros de calidad de la malla seleccionada	63
Tabla 10 Parámetros de calidad de la malla seleccionada	64
Tabla 11 promedio de temperaturas de panel entre los meses de marzo a Julio y porcentaje de error	64
Tabla 12 Promedio por horas de Radiación normal directa en wh/m^2 en Kirkuk	96
Tabla 13 Promedio por horas de Radiación normal directa en wh/m^2 en Bucaramanga.....	98

Lista de Apéndices

Apéndices A: Configuración de independencia de malla.....	79
Apéndices B: Tablas de radiación directa, difusa y reflejada para las ciudades de Kirkuk y Bucaramanga.....	96
Apéndices C: Diagramas de flujo de Independencia de Malla y método SIMPLE.....	100
Apéndices D: Comportamiento de la velocidad media vs radiación en ensayo de laboratorio ..	101
Apéndices E: Código Matlab Cálculo modelo q_{sb}	102

Glosario

Bornes: Se trata de los contactos que se usan para conectar y así transmitir la energía producida por una pila, e identificas su polaridad con los colores rojo y negro o con los signos de + (positivo) y - (negativo), los cuales vienen grabados en cada borne o conexión de las baterías o pilas.

Confort: Condiciones materiales que proporcionan bienestar y comodidad. Según la norma ISO 7730 el confort térmico “es una condición mental en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico”.

Degradabilidad: Cualidad de un material que se desintegra o se descompone en elementos menos complejos.

Difusividad térmica: Propiedad característica de un material que representa la rapidez de propagación del calor.

Discretización: Se trata del proceso de transferir funciones continuas, modelos, variables y ecuaciones a contrapartes discretas

Equinoccio: Momento del año en que el Sol forma un eje perpendicular con el ecuador y en que la duración del día es igual a la de la noche en toda la Tierra.

Fotovoltaico: Genera una fuerza electromotriz cuando se encuentra bajo la acción de una radiación luminosa o análoga.

Incidencia: Influencia de determinada cosa en un asunto o efecto que causa en él.

Irradiancia: Es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética.

Kilowatt: Unidad de trabajo o energía de símbolo kW , que equivale a 1000 voltios

Vena contracta: Es el punto en una corriente de fluido donde el diámetro de la corriente es mínimo y la velocidad del fluido es máxima, como en el caso de una corriente que sale de una boquilla (orificio).

Resumen

Título: Mejora en el desempeño de paneles solares usando el principio de la chimenea solar.

Autores: Oscar Felipe Vera Arenas & Marco Antonio Lagarez Oviedo

Palabras claves: Energías renovables, chimenea, panel solar, ventilación natural, elementos finitos, CFD

Descripción:

El uso de modos de energía renovables como paneles solares tiene un futuro prometedor para la producción de electricidad y para el desarrollo económico y humano. Sin embargo, las células solares se ven afectadas en su rendimiento por el aumento de la temperatura en el panel especialmente en climas cálidos. Por tal razón, se propone una respuesta a la búsqueda de nuevas configuraciones y de modelos capaces de aumentar la eficiencia y la calidad en el funcionamiento de los paneles solares.

El modelo propuesto implica el principio de una chimenea solar en conjunto con un panel solar en la superficie colectora, de manera que el efecto de flotación dentro de la chimenea genera un sistema de ventilación natural capaz de disminuir la temperatura del panel. El modelo es desarrollado y simulado mediante el uso de elementos finitos en CFD, donde se analizan los parámetros más significativos de la chimenea en la temperatura superficial del panel, con el objetivo de optimizarlos y propagarlos para el desarrollo e implementación de las energías renovables.

Para la validación del modelo computacional se hace uso del proyecto titulado *New design of chimney (Case study)*, este proceso consiste en realizar una simulación con parámetros similares a los de este caso, obtener los resultados y compararlos con el caso de estudio. La validación se hace a través del cálculo de los porcentajes de error con un margen no mayor al 5%, una vez conseguida está validación de resultados se procede a realizar un proceso de simulación similar, pero esta vez, bajo las condiciones de la ciudad de Bucaramanga.

Trabajo de grado

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Jabid Eduardo Quiroga Méndez. Codirectora Natalia Prieto Jiménez. Codirector Omar Andrés Ardila Sánchez

Abstract

Title: Improvement in the performance of solar panels using the principle of the solar chimney.

Authors: Oscar Felipe Vera Arenas & Marco Antonio Lagarez Oviedo

Keywords: Renewable energies, chimney, panel solar, natural ventilation, finite elements, CFD.

Description:

The use of renewable energy such as solar panels has a promising future for the production of electricity and for economic and human development, however solar cells are affected in their performance by the increase of the temperature in the panel especially in hot climates; For this reason, a response is proposed to the search for new configurations and models capable of increasing the efficiency and quality in the operation of solar panels.

The proposed model involves the principle of a solar chimney in conjunction with a solar panel on the collector surface so that the floating effect inside the chimney generates a natural ventilation system capable of reducing the temperature of the panel. The model is developed and simulated through the use of finite elements in CFD, where the most significant parameters of the chimney in the surface temperature of the panel are analyzed in order to optimize and propagate them for the development and implementation of renewable energies.

For the validation of the computational model, the project entitled New design of chimney (Case study) is used, this process consists in realize a simulation with parameters similar to those of this case to obtain the results and compare them with the case study. This validation is done through the calculation of the error percentages with a margin no upper than 5%, once achieved this validation of results, a similar simulation process is realized, but this time, under the conditions of the city of Bucaramanga.

Undergraduate Thesis

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Jabid Eduardo Quiroga Méndez. Codirectora Natalia Prieto Jiménez. Codirector Omar Andrés Ardila Sánchez

Introducción

Actualmente, la humanidad afronta un gran problema relacionado con el cambio climático y daño ambiental. Una de las alternativas para frenar el avance del calentamiento global resulta del recurso de utilizar nuevas fuentes de energía tales como las denominadas energías renovables. El uso de este tipo de energía tiene un futuro prometedor para el desarrollo económico y humano. Un caso particular es el de la energía solar para la producción de electricidad.

Se pretende entonces aprovechar la energía del sol a través de la implementación de paneles solares los cuales están compuesto por células solares. La eficiencia de las células solares se ve afectada por el aumento de la temperatura del panel especialmente en climas cálidos; es decir, el aumento de la temperatura provoca en la celda una reducción de su eficiencia eléctrica. Debido a la necesidad de ventilación o enfriamiento del panel solar, un sistema de ventilación pasivo como la chimenea solar puede generar mejores resultados en términos de potencia, en comparación con el panel expuesto en condiciones libres al medio ambiente.

Una chimenea solar es una cavidad ventilada alargada, que calienta el aire al interior, lo cual incrementa las fuerzas de flotación, que a su vez dirigen el aire a la parte superior y posteriormente al exterior. El desarrollo del concepto ha incluido la investigación de nuevos métodos para aumentar la energía y la eficiencia tales como el reemplazo de la superficie captadora de la radiación por celdas solares. La ventilación pasiva de la chimenea genera una reducción de temperatura del panel. Si bien una ventilación forzada podría generar mejores resultados, también hay que destacar que el sistema para este tipo de ventilación tiene un alto consumo de energía, lo cual es un aspecto negativo pues parte de la energía ganada por el panel tendría que ser usada para su propio funcionamiento.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de un panel solar en la zona ecuatorial cuando opera con una chimenea solar mediante una simulación con CFD, buscando innovación científica, tecnológica y social, creando con ello un modelo capaz de generar oportunidades para la sociedad, contribuyendo de esta manera con la misión de la universidad industrial de Santander.

1.1.1 *Objetivos específicos*

- Realizar una compilación de las distintas configuraciones de chimeneas solares usadas en distintos escenarios o aplicaciones y a partir de la mejor configuración en términos de efectividad, simplicidad en materiales, construcción y economía, proponer para el caso de estudio.
- Identificar los parámetros y las variables del modelo térmico de una chimenea solar de tal manera que se permita implementar un algoritmo que cuantifique la ventilación natural (convección natural) que puede inducir la radiación solar en la chimenea escogida cuando esta opera en el lugar de estudio y a las condiciones ambientales de éste.
- Diseñar una chimenea solar usando el modelo térmico y la configuración escogida que ofrezca el mejor rendimiento en relación con su temperatura de operación de una celda fotovoltaica
- Simular el proceso termo físico asociado a la chimenea solar operando en conjunto con el panel solar teniendo como entrada la radiación incidente, la convección natural, las condiciones ambientales y como salida la cantidad de calor que puede retirar el sistema usando el software ANSYS con lo que se podrá determinar el rendimiento del panel en relación con su temperatura de operación.
- Validar la simulación propuesta tomando como referencia los resultados experimentales encontrados en el trabajo New design of solar chimney (case study) por Omer Khalil Ahmeda, Abdullah Sabah Husseiny, y, basados en ellos ajustar la propuesta del modelo para, a partir del ajuste, diseñar una chimenea solar para las condiciones de la ciudad de Bucaramanga y que sea efectiva en el mejoramiento del desempeño del panel.

2 Justificación

La idea del presente trabajo nace inicialmente de la curiosidad e inquietud de investigar el comportamiento de los paneles solares y las variables que afectan su rendimiento, haciendo énfasis en la temperatura. A su vez, se encontró que una fuente de energía renovable como la solar es una excelente alternativa que, de cara al futuro, irá ocupando más espacio a nivel mundial; por lo que empezar a conocer este campo desde ahora es importante. También se cree que el impulsar este proyecto podría ayudar a algunos sectores de la población colombiana que sufren por falta de recursos, como la energía eléctrica, adicionalmente, podría ser una fuente de empleo.

El desempeño de un panel solar depende de las condiciones ambientales y geográficas donde se encuentre ubicado, estas variables son: La altitud, la temperatura, el tiempo y las condiciones de radiación del lugar. Ubicarlo en una zona privilegiada en cuanto a altos niveles de radiación solar hace que su producción sea alta, pero puede decaer si hace mal tiempo (clima nublado). Por otra parte, la temperatura influye de manera negativa, si el panel solar se calienta demasiado, su rendimiento disminuye, lo cual se puede "amortiguar" con el uso de un sistema de ventilación para conseguir mayores potencias.

En la Figura 1 se puede observar el rendimiento de un panel y su dependencia a la temperatura. Con el aumento de la temperatura en la placa, la producción disminuye, según la mayoría de fabricantes, por encima de 40°C su rendimiento se encuentra alrededor del 80%; por ende, si el panel está operando para 10 Kilowatts, realmente se estarán produciendo 8 Kilowatts (Energético 2017).

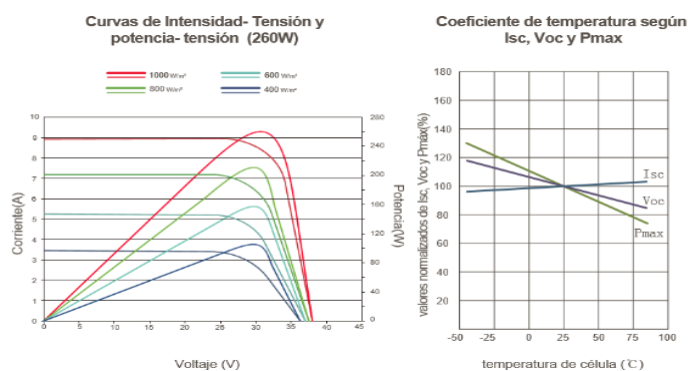


Figura 1 Rendimiento eléctrico y dependencia de la temperatura
Nota: Adaptado de (Energético 2017)

En las chimeneas solares se puede encontrar que su desempeño, además de las condiciones físicas del entorno en el que se instale, también será afectado por la geometría de la misma (Haghighat et al. 2019)

Por otra parte, como se mencionó anteriormente, en la comparación entre un sistema de chimenea por convección natural contra una por convección forzada, resulta más eficiente el sistema por medio forzado, sin embargo, este resulta en un gasto extra de energía. (Klimes, Charvát, and Hejčík 2018) argumentó:

Los resultados indican que los ventiladores fotovoltaicos superan significativamente a las chimeneas solares en términos de convertir la energía solar en energía cinética del movimiento del aire (hasta tres veces más altas en comparación con una chimenea solar para la misma área de incidencia solar).

Otra variable que es importante en el rendimiento de una chimenea es la configuración de los distintos elementos que la componen, dado que el principal desafío de una chimenea solar es optimizar su rendimiento con el menor costo. Según "(Shi et al. 2018):

Se obtuvieron trece factores influyentes clave y se clasificaron en cuatro grupos, que incluyen la configuración, las condiciones de instalación, el uso del material y el entorno

"Las acciones del viento determinan la carga más importante en el diseño de los sistemas de soporte de los paneles solares, donde sea que se encuentren, en techos planos o inclinados o al nivel del suelo. "(Baetu et al. 2013)

En su experimento Baetu, concluye que los valores de succión son mayores para las direcciones del viento de 30°, 45°, 60° y 135° debido a que el flujo incidente crea vórtices cónicos en la superficie de la matriz solar. La velocidad del viento considerada fue de 18 m/s y la intensidad de turbulencia del 10%.

(Giraldo and Herrera 2017) en su proyecto de ventilación pasiva y confort térmico en viviendas de interés social en clima ecuatorial, concluyen que:

En particular las chimeneas solares resultaron muy efectivas por la inducción de corrientes de aire durante el periodo de viento en calma, las condiciones de radiación solar alta (típica de la zona ecuatorial ~ 847 W/m²) y viento en calma (Vair ~ 0 m/s)

potencializan el uso de chimeneas solares como una técnica pasiva efectiva, pues provee renovación de aire, retiro de carga térmica y de paso da sombra a la cubierta. La efectividad de las chimeneas mejora si se proyectan en la dirección del viento, pues el efecto de vena contracta contribuye a la succión.

Por otra parte (Ahmed and Hussein 2018) en su proyecto propone dos configuraciones de chimenea solar + panel solar, en un sistema A, el panel está dentro del recinto de la chimenea recibiendo la radiación a través de un vidrio, en un sistema B, el panel se encuentra en la parte superior de la zona del recinto de la chimenea, mientras dentro del recinto se encuentra madera absorbente. En los resultados se aprecia que el caso B resulta óptimo. El promedio diario de energía eléctrica del sistema B es de 75.6 W más que el sistema A, esto se debe a que el panel del sistema A tiene mayor ganancia térmica que el caso B, provocando una disminución en el potencial de salida.

3 Metodología

En esta investigación se busca probar el desempeño del panel usando la chimenea solar, al estudiar los fenómenos y variables que influyen en el desempeño de un panel usando chimenea solar, puede llegar a ser un proceso largo y exhaustivo, por ello es de suma importancia delimitar el alcance de la investigación.

En primer lugar, la introducción resume los antecedentes y la situación-problema que se va a desarrollar, a su vez, presenta la justificación o motivo que impulsó la realización de este proyecto.

En el capítulo 5 se realiza una caracterización de la chimenea solar y del panel fotovoltaico, identificando los parámetros de diseño que influyen en el funcionamiento del sistema y que buscan satisfacer el objetivo principal.

En el capítulo 6 se realiza el modelamiento matemático y numérico, en el que se analiza la convección natural del panel expuesto al medio ambiente como una placa inclinada y luego se procede a analizar la convección en el sistema híbrido (chimenea + panel solar), incluyendo las aproximaciones que rigen ambos casos.

En el capítulo 7 se realiza el modelamiento computacional implementando una herramienta informática de simulación, la cual genera resultados que se validan con la literatura existente. Para ello se realiza la geometría en *Designmodeler*[®] de ANSYS *Workbench*. Posterior a esto, se realiza el mallado correspondiente en la herramienta *Meshing*[®] de *Workbench* cumpliendo con un test de independencia numérica para obtener los resultados. Una vez se realiza un correcto mallado de la geometría se inicializa en la herramienta *Mesh* de ANSYS las características de las propiedades de los materiales y del fluido, y a su vez se realiza la configuración de las condiciones de operación que más se adecuan a la simulación dentro de sus condiciones frontera.

Para la validación de los resultados es necesario realizar la independencia de la malla y posteriormente comparar los resultados con la literatura, en este caso se usa como punto de comparación el artículo *New design of solar chimney* (caso de estudio) por (Ahmed and Hussein 2018).

Una vez validados los resultados se prosigue a analizar la temperatura del panel para los valores de radiación en Bucaramanga con la misma geometría que hizo parte del caso estudio de manera que se visualice el funcionamiento y la diferencia en los parámetros y variables del sistema al realizar el cambio de las condiciones ambientales de la región.

Por último, en el capítulo 8 se hace una recopilación de conclusiones y recomendaciones para el uso de una chimenea solar en conjunto a un panel fotovoltaico.

4 Antecedentes

4.1 Nivel internacional.

Análisis de dinámica de fluidos para diferentes ubicaciones de paneles fotovoltaicos en chimenea solar. (Haghighat et al. 2019)

En el trabajo presentado por Haghighat nos encontramos ante la idea de conseguir realizar un sistema solar híbrido que pueda ayudar a mejorar aprovechamiento de la energía solar, es puesta en marcha la combinación de los paneles solares y la chimenea solar, dos métodos muy conocidos para el uso de la energía solar. Haghighat y los demás implicados en este trabajo diseñaron un modelo en el que se usan paneles solares y chimeneas solares, que a su vez utilizan el flujo de aire creado abajo del colector de la chimenea solar para enfriar los paneles solares, mientras que la

energía térmica disipada por los paneles se usa para calentar el aire debajo del colector. Las variables principales que se tuvieron en cuenta fueron la ubicación y el ancho de los paneles solares en la chimenea solar. El modelo se realizó para irradiación de 850 W/m^2 y temperatura de 302 K , al realizar la comparación entre el proyecto físico y la simulación se encuentra que la diferencia de temperatura promedio es inferior al 6%, así mismo, la diferencia de velocidad es inferior al 7%.

El modelado se realizó para cuatro modos diferentes de combinar (posiciones A, B, C y D) los paneles fotovoltaicos híbridos y la chimenea solar en tres anchos diferentes de 70, 50, 30 cm para los cuatro modos.

Prueba A: En este caso, los paneles fotovoltaicos se utilizan con el colector transparente. Los paneles fotovoltaicos tienen diferentes anchos, incluidos 30, 50 y 70 cm. La superficie del colector está cubierta con paneles fotovoltaicos en un 36, 56 y 71%, respectivamente. En este caso, la zona absorbente está destinada solo a la superficie debajo del colector transparente. El flujo solar, recibido por los paneles fotovoltaicos, se convierte en electricidad y energía térmica. Dado que la superficie superior de los paneles fotovoltaicos está en contacto con el aire ambiente, los paneles fotovoltaicos disipan una parte del calor al aire ambiente. Al aumentar la superficie de los paneles fotovoltaicos, la temperatura máxima del aire debajo de la superficie del colector disminuye. La velocidad del aire debajo del colector de chimenea solar es una función de la temperatura del aire debajo del colector; por lo tanto, a medida que la temperatura disminuye al aumentar la superficie de los paneles fotovoltaicos, la velocidad del flujo de fluido bajo debajo del colector disminuye. El aire caliente se mueve hacia arriba a través de la chimenea debido a la flotabilidad, lo que hace que el aire fluya debajo del colector. Debido a que la superficie de absorción es un cuerpo negro y tiene una temperatura de aproximadamente 350 K , que es más que la superficie inferior de los paneles fotovoltaicos, la transferencia de calor por radiación se intercambia desde la superficie de absorción a la superficie inferior de los paneles fotovoltaicos.

Prueba B: En este caso, los paneles fotovoltaicos se instalan entre la superficie absorbente y el colector a una altura de 3 cm del absorbente en el radio exterior. Este caso se estudia como el caso anterior, en tres anchos de 30, 50 y 70 cm. Debido al posicionamiento de los paneles fotovoltaicos entre la superficie absorbente y el colector, hay un flujo de aire desde ambos lados de los paneles fotovoltaicos (arriba y abajo). Al mover el flujo de aire, el calor disipado por los paneles solares se intercambia en ambos lados con el aire circundante. La temperatura del aire

aumenta al moverse hacia el centro de la chimenea. Después de pasar a través de los paneles solares, la temperatura del aire disminuye. Debido a que la temperatura del aire debajo de los paneles fotovoltaicos es más baja que la temperatura del aire por encima, y con la combinación de dos flujos de aire, la temperatura cae. En este caso, la combinación de paneles fotovoltaicos y chimenea solar, al aumentar la superficie de los paneles fotovoltaicos, la velocidad máxima del aire debajo del colector disminuye.

Prueba C: Los paneles se colocan en una zona en el radio interior del colector de chimenea solar. En este caso, los paneles fotovoltaicos se modelan en tres anchos diferentes de 30, 50 y 70 cm, que ocupan el 7, 16 y 28% de la superficie del colector, respectivamente. La velocidad máxima y la temperatura del aire debajo del colector están asociadas con los paneles fotovoltaicos con un ancho de 30 cm. A medida que aumenta la superficie de los paneles fotovoltaicos, la superficie de absorción debajo del colector disminuye y al aumentar el área de superficie del panel fotovoltaico, aumenta el intercambio de calor con el ambiente. Además, la temperatura máxima del aire debajo del colector disminuye al aumentar la superficie de los paneles fotovoltaicos. Como resultado, con la caída de temperatura, la fuerza de flotabilidad cae y la velocidad del flujo de aire disminuye. Debido a la alta temperatura del aire que pasa por debajo de los paneles fotovoltaicos, el intercambio de calor entre los paneles fotovoltaicos y el flujo de aire es inferior a los dos estados anteriores (A y B).

Prueba D: Como en casos anteriores, el modelado se realizó para tres modelos diferentes de paneles fotovoltaicos con un ancho de 30, 50 y 70 cm. En este caso, los paneles fotovoltaicos se colocan entre el suelo y el colector transparente a la altura de 3 cm en un corte en el radio interno del colector. Se reduce la temperatura máxima del flujo de aire debajo del colector. Al aumentar el área de superficie de los paneles fotovoltaicos, aumenta la parte del flujo de entrada. Este proceso disminuye la parte del flujo, lo que hace que el flujo de aire se caliente. Esta disminución resulta en una disminución de la temperatura del aire. Como resultado, la velocidad máxima debajo del colector se reduce, en este caso, los paneles fotovoltaicos están expuestos al aire caliente que pasa por debajo del colector y por encima de la superficie de absorción. Debido a la alta temperatura del aire que pasa por encima y por debajo de los paneles fotovoltaicos, la transferencia de calor desde los paneles fotovoltaicos se realiza a una temperatura más alta, y la temperatura a lo largo de los paneles fotovoltaicos no se modifica significativamente.

El mejor resultado que se obtuvo fue para el híbrido de paneles solares y chimenea solar de 50 cm de ancho, en lugar de una con colector transparente. En este caso, la temperatura promedio de los paneles fotovoltaicos fue 5 ° C menor que la temperatura promedio de los paneles solares sin chimenea solar. Esta disminución de la temperatura aumentaría la eficiencia de los paneles fotovoltaicos en un 1%. Además, en este modo, la velocidad de flujo máxima muestra una reducción de 0.2m / s en comparación a la de con colector transparente.

Este trabajo se relaciona con la investigación planteada, ya que muestra cómo debe realizarse el procedimiento para conseguir los objetivos propuestos, las probables variables a considerar para conseguirlos, los materiales y herramientas a tener en cuenta.

Nuevo diseño de chimenea solar. (Ahmed and Hussein 2018)

Ahmed y Hussein proponen un nuevo diseño de chimenea solar que incluye paneles fotovoltaicos con planta de chimenea solar para la generación de electricidad. 2 modelos experimentales de una chimenea solar híbrida (sistemas A&B). El sistema (A) consiste de un colector solar con una cubierta de vidrio transparente de 4 mm de espesor montada a una distancia de 10 cm de la celda solar para obtener la máxima cantidad de energía de la radiación solar y un panel fotovoltaico con dimensiones de 148 cm de largo y 67 cm de ancho con una emisividad de ($\epsilon = 0.95$) para la absorción de la radiación, con una chimenea de 2 m de altura, el panel solar se fijó dentro de una caja de aluminio completamente aislada de tres lados del colector. Se conectó verticalmente un conducto rectangular al colector para funcionar como chimenea de 200 cm de largo y 67 cm de ancho. El conducto (chimenea) estaba totalmente aislado con lana de vidrio que tenía una conductividad térmica de ($k = 0,46 \text{ W / mK}$). Las dimensiones del área del conducto en ambos sistemas fueron 67 cm * 10 cm. El sistema (B) es similar al sistema (A) con dos diferencias principales: el techo de vidrio se reemplazó con un panel fotovoltaico mientras que la base del conducto se reemplazó con madera contrachapada que tenía una conductividad térmica ($k = 0,12 \text{ W / m}^*\text{K}$).

Veinte sensores digitales de temperatura se fijaron en los dos sistemas en lugares seleccionados. Cinco sensores fueron colocados a lo largo de la corriente de aire para cada sistema; dos sensores se fijaron en la cubierta de vidrio para el sistema A, mientras que los otros dos se fijaron en el panel FV para el sistema B. Dos sensores también se fijaron en la zona abortiva (panel

FV) para el sistema A y los otros dos en el absorbedor (madera contrachapada) para el sistema B. Los dos últimos sensores se fijaron en la parte posterior del aislamiento de cada sistema para encontrar la energía térmica. Se usaron cuatro agujeros para cada diseño para medir la velocidad del aire a lo largo del conducto de aire. Para la velocidad del aire, se usó un anemómetro de alambre caliente (MY-300) para medir la velocidad de la corriente de aire a través de cuatro orificios en el conducto de cada sistema. El propósito era encontrar la energía cinética. Para las mediciones de corriente eléctrica y voltaje del panel fotovoltaico, se usaron dos tipos de multímetro (SM-20) fijados en cada sistema para medir la corriente eléctrica y un multímetro para medir el voltaje, mientras que se usaron bombillas pequeñas para alcanzar la carga máxima del panel fotovoltaico. La electricidad generada por las celdas se almacenaba en baterías. El voltaje y la corriente se midieron utilizando un voltímetro de CC y un amperímetro digital, respectivamente. La radiación solar se midió con el medidor de energía solar [Medidor solar SM206] que se colocó a la misma altura que la célula solar.

Las pruebas prácticas se realizaron en Kirkuk ($35^{\circ} 28'$ de latitud y $44^{\circ} 24'$ de longitud), en el norte de Iraq, a una altura de 350 m del nivel del mar. Ambos sistemas estaban orientados hacia el sur y el ángulo de inclinación de la célula solar en ambos sistemas era de 35° . El experimento se realizó durante cuatro meses, de marzo a julio de 2017. Los resultados mostraron que el sistema (A) tenía mayor ganancia térmica que el sistema B, mientras que el promedio diario de energía eléctrica en el sistema (B) era (75.6 W) más alto que el sistema (A) (79 W). Esto se debe a que la alta ganancia térmica aumentó la temperatura de funcionamiento del panel FV, lo que provocó una disminución en su potencia de salida. Los resultados también presentaron que el sistema (A) convirtió la energía térmica en energía cinética con un promedio diario (0.008 W) debido a la gran ganancia térmica que hizo que el aire fuera menos denso a su vez aumentó su velocidad más que el sistema (B) (0.006 W) que tenía menor potencia cinética. La potencia útil total producida por el sistema (B) es mayor que la potencia útil producida por el sistema (A).

Comparación de la eficiencia de conversión de energía de una chimenea solar y un ventilador solar fotovoltaico para aplicaciones de ventilación. (Klimes et al. 2018)

Se realizó un estudio sobre el rendimiento de una chimenea solar y un ventilador solar fotovoltaico (PV) para aplicaciones de ventilación utilizando simulaciones numéricas. El rendimiento de la chimenea solar se comparó con el de un ventilador de corriente continua (CC)

alimentado por un panel solar fotovoltaico. La comparación se llevó a cabo utilizando la misma área de la superficie irradiada: el área de la placa de absorción solar en el caso de la chimenea solar y el área del panel solar en el caso del ventilador fotovoltaico.

Se consideró un caso teórico. Solo se tuvo en cuenta la pérdida óptica (transmisibilidad y absorción) en el caso de la chimenea solar. La pérdida de calor de la chimenea solar al ambiente no fue considerada. La fricción y las pérdidas locales para el flujo de aire en la chimenea solar tampoco fueron consideradas. Como el objetivo del estudio era comparar los principios de utilización de la energía solar para la ventilación en lugar de comparar los diseños reales, la no consideración de la pérdida de calor parece justificable. Se supuso que la radiación solar absorbida por la placa de absorción solar se transfería completamente al aire en la cavidad de la chimenea solar.

El escenario simulado con el ventilador de corriente continua (CC) alimentado por energía solar fotovoltaica fue similar al escenario con la chimenea solar. Se consideró un panel solar con la misma área que el área de la placa absorbente de la chimenea solar. Se suponía que un ventilador de CC estaba conectado a un panel fotovoltaico a través de una unidad de control sin almacenamiento de energía de la batería. La unidad de control del ventilador no fue modelada en detalle. Solo se supuso que la unidad de control evitaría daños al ventilador cuando el panel solar proporcionara más potencia de la que el ventilador podía manejar. Las tasas de flujo de aire del ventilador se calcularon para un rango de intensidades de radiación solar incidente con el uso de los parámetros del panel solar y las características del ventilador de CC.

En el estudio se consideró un panel solar con un área de 1.3m^2 . El panel tenía una potencia máxima de 210 W, su corriente de potencia máxima era de 5.1 A, su voltaje de potencia máxima era de 41.3 V y el voltaje de circuito abierto era de 50.9 V. La corriente de cortocircuito del panel solar era de 5.57 A.

Los dos casos estudiados se compararon bajo diversas intensidades de radiación solar de radiación solar incidente. La radiación solar fue la única fuente de energía para el movimiento del aire considerado en el estudio. Los resultados indican que los ventiladores fotovoltaicos superan significativamente a las chimeneas solares en términos de convertir la energía solar en energía cinética del movimiento del aire (hasta tres veces más altas en comparación con una chimenea

solar para la misma área de incidencia solar). Los ventiladores fotovoltaicos se pueden usar tanto para el suministro de aire como para el escape de aire, mientras que el uso de chimeneas solares se limita al escape de aire. Otra ventaja de un ventilador de energía fotovoltaica es la colocación mucho más fácil del panel solar en términos de pendiente y acimut en comparación con una chimenea solar. Además, la electricidad de los paneles fotovoltaicos que los ventiladores no consumen de inmediato puede almacenarse en las baterías o utilizarse para otros fines.

Si bien esta tesis haría ver el proyecto planteado como inútil, se debe decir que lo que entre otras cosas se busca disminuir los gastos energéticos, si bien los ventiladores ofrecen todas esas ventajas anteriormente mencionadas también de una u otra manera implican costos, reflejados en el gasto energético, es decir, están mejorando la eficiencia del panel solar en detrimento de consumir parte de la energía recolectada por el mismo.

Determinar los factores que influyen en el rendimiento de la chimenea solar en edificios. (Shi et al. 2018)

Este proyecto, aun en investigación plantea diferentes tipos de configuración dentro de un recinto que, aplicando el principio de la chimenea solar en esos distintos tipos de configuraciones, se pueda sacar el mejor rendimiento de la misma con base a distintas variables que intervienen. El principal desafío de diseñar una chimenea solar es optimizar su rendimiento con el menor costo. Con base en la revisión de la literatura, se obtuvieron trece factores influyentes clave y se clasificaron en cuatro grupos, que incluyen la configuración, las condiciones de instalación, el uso del material y el entorno. Se realizaron pruebas al aire libre, los datos se obtuvieron mediante pruebas de un período de tiempo prolongado en un entorno exterior bajo radiación solar. Por ejemplo, se llevaron a cabo pruebas al aire libre entre las 9 a.m. y las 4 p.m. con rangos de 30 min. Se instaló una chimenea solar en el techo en una sala de 2 m (ancho) \times 3 m (largo) \times 2 m (alto), recolectando datos durante el día de 7 a.m. a 2 p.m. en varios días. Se colocó un medidor de energía solar paralelo a la cavidad de la chimenea, cuantificando la radiación solar recibida. El entorno externo podría ser significativo para los resultados experimentales, y se usaron muchas medidas para minimizar las influencias. Por ejemplo, para reducir los efectos del viento externo, se colocó una pared con un tamaño de doble altura y triple ancho en comparación con el modelo de chimenea solar en su lado de succión.

Las estadísticas de los estudios experimentales mostraron que el rango general probado aún es limitado, lo que sugiere más experimentos futuros. Para mejorar el rendimiento, se sugiere una chimenea solar con posible alta cavidad y radiación solar, un espacio de cavidad de 0.2–0.3m, entrada y salida iguales, una relación altura / espacio de alrededor de 10, un ángulo de inclinación de 45–60 ° (para la chimenea solar del techo teniendo en cuenta la latitud), una abertura adecuada de la habitación, acristalamiento doble / triple, una pared aislante de 5 cm de espesor y un absorbedor solar con mayor capacidad de absorción y emisividad. Estos valores óptimos pueden no ser aplicables a todas las configuraciones, ya que son interdependientes. Aunque el viento externo muestra una influencia significativa en la chimenea solar, el diseño de la chimenea solar puede realizarse sin tener en cuenta los efectos del viento.

Este proyecto puede proporcionar información útil para la predisposición o configuración del proyecto físico a realizar, además de los modelados para simular.

Simulación numérica de la acción de viento en un arreglo de paneles solares para diferentes direcciones de viento. (Baetu et al. 2013)

Las acciones del viento determinan la carga más importante en el diseño de los sistemas de soporte de los paneles solares, donde sea que se encuentren, en techos planos o inclinados o al nivel del suelo. El objetivo fue estimar el flujo complejo del viento y las presiones que actúan sobre su superficie. En el estudio presentado aquí, se simula la presión del viento que actúa sobre 12 paneles solares. Los paneles solares se colocan en una matriz regular, se montan a nivel del suelo y se inclinan a 30 °.

Se simularon y analizaron cinco casos para las direcciones del viento (con ángulos de ataque de 0°, 30°, 45°, 135°, 180°) con el código de computadora ANSYS 12 CFX. La matriz solar tiene 17.641 m² y consta de 12 paneles solares. La matriz se levanta a 0,6 m de altura desde el nivel del suelo. Las dimensiones de los paneles solares son: 1.482 m de largo, 0.992 m de ancho y 0.045 m de espesor.

La distribución de presión se evaluó para toda la matriz y también para cada panel solar individual. En la superficie de la matriz, la presión se mide en 144 puntos para cada cara, alineada en 9 filas.

Durante la sesión de simulación numérica, la velocidad del viento considerada fue de 18 m/s y la intensidad de turbulencia del 10% para los cinco casos analizados.

Para todos los casos analizados se ejecutó un análisis global para determine la presión promedio en el conjunto solar y un análisis local para identificar los paneles críticos (sujetos a las mayores presiones de viento) del conjunto solar. De todos los casos analizados, se ha señalado que la dirección del viento tiene una influencia importante en la distribución de presión en la matriz solar. Los valores de succión son mayores para las direcciones del viento de 30°, 45°, 60° y 135°, debido al flujo incidente que crea vórtices cónicos en la superficie de la matriz solar. Estos vórtices se manifiestan simétricamente en pares, uno en cada borde de la matriz solar, y en el centro de cada vórtice se produce un área de altas succiones.

Desarrollo de un sistema para la medición de la eficiencia energética de celdas solares. (Almanza, García Fernández, and García Reina 2019)

Este proyecto a cargo de Almanza, García Reina y García Fernández, muestra el desarrollo de un sistema para la medición de la potencia luminosa solar y la potencia eléctrica generada por las celdas solares de un panel fotovoltaico, con el fin de evaluar la eficiencia energética en la conversión de la energía luminosa en energía eléctrica. Para esto lo primero es calibrar la potencia luminosa que emite una lámpara de tungsteno, teniendo en cuenta la temperatura del filamento y la emitancia del tungsteno en función de la temperatura y la longitud de onda. La temperatura del filamento se determina midiendo la resistencia en función del voltaje y el amperaje de alimentación del filamento y usando la dependencia de la resistividad del tungsteno con la temperatura. La potencia luminosa que emite el filamento es calibrada con fototransistores y fotodiodos patrones Siemens, en unidades fotoeléctricas (en lux) y en unidades energéticas (W/m^2). Con las características I-V de la celda, el voltaje a circuito abierto V_{oc} y la intensidad de la corriente en cortocircuito I_{sc} se determina la potencia eléctrica máxima suministrada por la celda, la cual dividida entre la potencia luminosa proporciona el valor de la eficiencia de conversión de energía luminosa en eléctrica por la celda fotovoltaica. Las celdas estudiadas tienen un voltaje a circuito abierto (V_{oc}) de 4,6 V, una intensidad de la corriente en cortocircuito (I_{sc}) de 87 mA y una eficiencia de 12,4% con una irradiación de 399,6 W/m^2 .

Para realizar este proyecto se usó un Bombillo Tungsteno 12 Voltios, Sensor de luz B04, un fototransistor de referencia ST-1KL3A y una resistencia comercial de $10K\Omega$ de precisión (Se midió la resistencia en el equipo XJ2811C LCR METER, dando como resultado $9,991 K\Omega$), en paralelo a esa resistencia se encuentra un capacitor cerámico, comercial de 103 (Se midió el capacitor en el equipo XJ2811C LCR METER (dando como resultado $8,787 pF$). Una celda solar de Tamaño $54.50mm \times 54.50 mm$, Máxima potencia (P_m) = $0.414W$, Máximo voltaje de trabajo óptimo (V_m) = $4.6V$, Máxima corriente activa óptima (I_m) = $90mA$, Voltaje de circuito abierto (VOC) = $5V$, Corriente de corto circuito (ICC) = $100mA$, dos servomotores de serie Towardpro MG9965, Arduino Mega 2560

Se concluye que la eficiencia de conversión de la energía solar en energía eléctrica por las celdas solares fue de $12,4\%$. Se estudiaron 4 celdas solares de alta calidad para las que se obtuvieron como valores medios un voltaje a circuito abierto $V_{oc} = 4,6 V$, una intensidad de la corriente en cortocircuito I_{sc} de $87 mA$, con una irradiación de $399,6 W/m^2$.

4.2 Nivel nacional.

Ventilación pasiva y confort térmico en vivienda de interés social en clima ecuatorial. (Giraldo and Herrera 2017)

En general, el confort y la calidad de aire no son tenidos en cuenta por los diseñadores de viviendas de interés social (VIS), ni lo son tampoco los asuntos de sostenibilidad ecológica como, por ejemplo, la ventilación natural. Dos condiciones empeoran esta situación: la primera, que se desconoce el manejo científico del confort a través de estrategias pasivas, y la segunda, que no es redituable para los constructores ni para el Estado. En las zonas tropicales cercanas al Ecuador, climatizar con ventilación natural se complica con la alta insolación al mediodía ($870 W/m^2$) y el viento en calma. En el proyecto a cargo de Giraldo y Herrera se propone una solución que ofrece confort y calidad de aire a través de manejo de ventilación y carga térmica; su desempeño y efectividad se evaluó en un prototipo experimental que simula una habitación de VIS en Cali (Colombia). Se llevó a cabo una estación experimental, la cual está constituida por tres módulos con semejanza geométrica y térmica, que suponen una habitación de VIS. La calibración se establece evaluando y comparando simultáneamente (es decir, bajo las mismas condiciones) la temperatura del aire, humedad relativa, temperatura media radiante, y velocidad del aire, si estos parámetros resultan similares en magnitud, se puede afirmar que los módulos son térmicamente

semejantes. Posteriormente se implementan las estrategias pasivas en dos de estos espacios (Módulos 1 y 2), dejando como testigo de referencia el Módulo 3, sin ninguna modificación.

Para los módulos de prueba, estos se construyeron en una azotea abierta libre de perturbaciones y sombras, con muros en panel-yeso y cubierta de fibrocemento (2.44 x 2.44 x 3.58 m). Teniendo en cuenta que las habitaciones de una VIS se caracterizan por ventilarse tan solo por una cara con vanos muy pequeños, los espacios se hicieron con una sola ventana (vano 0.6 x 0.6 m) y una puerta de acceso (madera, 0.8 x 2.10 m).

Para disminuir la carga térmica por cubierta y muros, y para proveer adecuada renovación de aire, se implementaron las siguientes estrategias: pintar de blanco la cubierta para disminuir la absorptividad de radiación (fibrocemento original $\alpha = 0.9$, pintura blanca $\alpha = 0.4$, con lo cual se refleja mayor cantidad de carga que de otra manera entraría al sistema); instalación de barrera radiante con película (foil) de aluminio (emisividad Efibrocemento= 0.95, Ealuminio =0.05 casi eliminando la transmisión de calor por radiación); disposición de entretecho con cielo falso en panel-yeso, con aislamiento de lana de vidrio, dejando espacio para circulación con levantamiento de la cumbrera para salida de aire (control de la carga convectiva); y por último, implementación de chimeneas solares (para renovación de aire y evacuación de calor).

La medición de velocidad del aire, V_{air} , se efectuó con anemómetros de hilo caliente marca CEM DT-8880 rango 0.125 m/s, resolución 0.01 m/s, precisión $\pm 5\%$. Para la medición de T_{air} y H_r se usaron Termo-higrómetros dataloggers marca EXTECH rHT10 con rango de humedad 0 a 100 %, precisión de $\pm 3.5\%$. La temperatura de las superficies se midió con termómetro infrarrojo marca EXTECH 42500 de precisión $\pm 2\%$.

Para comprobar la semejanza térmica entre módulos se realizaron mediciones durante cinco días consecutivos, registrándose T_{air} y H_r cada 60 minutos; los dataloggers fueron ubicados tres en el centro de cada módulo y uno al aire libre, a una altura de 1.50 m. La velocidad del aire se midió, para el interior, en el centro de las ventanas, y para el exterior a 1.50 m del piso. La temperatura media radiante T_{mr} fue calculada con los registros, hora a hora, del termómetro infrarrojo, y usando los factores de forma correspondientes al módulo.

Se encontró que, en la configuración original típica, las VIS son completamente inhabitables durante la mayor parte del día, pero con algunas modificaciones de bajo presupuesto

es posible mejorarlas hasta niveles aceptables en términos de confort y salubridad. En particular las chimeneas solares resultaron muy efectivas por la inducción de corrientes de aire durante el periodo de viento en calma, las condiciones de radiación solar alta (típica de la zona ecuatorial ~ 847 W/m²) y viento en calma ($V_{air} \sim 0$ m/s) potencializan el uso de chimeneas solares como una técnica pasiva efectiva, pues provee renovación de aire, retiro de carga térmica y de paso da sombra a la cubierta. La efectividad de las chimeneas mejora si se proyectan en la dirección del viento, pues el efecto de vena contracta contribuye a la succión.

5 Caracterización de la chimenea solar

La chimenea solar es un sistema con cero impactos ambientales estudiado y diseñado para mejorar la ventilación y el confort térmico en las viviendas, utilizando la convención natural del aire calentado por la energía solar.

La chimenea solar consta de un colector solar y un eje de ventilación. El colector solar es una superficie orientada a captar la mayor cantidad de radiación por lo tanto se sitúa en la parte superior de la chimenea y suele pintarse de negro para aumentar las características absortivas del material.

El eje de ventilación de la chimenea abarca las dimensiones y geometría de la misma, el llamado tiro de la chimenea que es la altura de salida del aire por el cual se canaliza el área de entrada y salida, son elementos influyentes en el rendimiento de la chimenea. A continuación, se definen los elementos que componen una chimenea solar.

5.1 Elementos de una chimenea solar

Área del colector solar: Esta superficie se sitúa en la parte superior de la chimenea para recibir los rayos provenientes del sol. La radiación es captada por el receptor, permaneciendo en el interior incrementando el calor.

Tiro de chimenea: Corresponde a la altura de la torre de salida del aire y afecta la eficiencia de esta. Sus características principales son: esbeltez, estanqueidad y geometría rectangular. A mayor esbeltez, mayor será la diferencia de altura entre sus aberturas y más alta la diferencia de presión.

Receptor: Su función es absorber la mayor cantidad de radiación por lo que su característica principal es el color oscuro negro mate. Tiene un coeficiente de absorbencia de 0,9.

Aislante: Cumple dos funciones: la primera parte es una barrera para ofrecer mayor resistencia al flujo de calor hacia el exterior, y de esta forma conservar la mayor cantidad de la energía en el interior de la chimenea, incrementando de esta forma su temperatura. La segunda, evita que entren agentes externos.

Salida de Aire: Para permitir la salida de aire del interior de la chimenea deberá existir una salida de aire superior por donde se exhala el aire precalentado en el cuerpo de la misma.

Entrada de Aire: Su función es reemplazar el aire que expulsa la chimenea por su abertura superior.

5.2 Radiación solar

El Sol, nuestra principal fuente de energía, es un cuerpo esférico de diámetro $D = 1,39 \times 10^9$ m y una masa de $m = 2 \times 10^{30}$ kg, se encuentra ubicado a $1,50 \times 10^{11}$ m de la tierra y emite una radiación aproximada de $3,8 \times 10^{26}$ Watts, aunque solo alrededor de $1,7 \times 10^{17}$ Watts chocan con la tierra.

5.2.1 Tipos de Radiación

Existen tres tipos: **Radiación directa, difusa y reflejada**. La primera llega directamente del sol sin haber sufrido cambio en su dirección, la segunda es absorbida por las nubes, polvo atmosférico, montaña o árboles y luego es reflejada, como consecuencia de esto va en todas direcciones y finalmente, está la tercera que es aquella que es reflejada por la superficie terrestre. La suma de las tres radiaciones anteriores se le denomina, radiación global.

5.2.2 La Irradiancia

La irradiancia H_s corresponde al valor acumulado en un intervalo de tiempo determinado, medido por las redes de estaciones meteorológicas las cuales almacenan y filtran los datos que son puestos a disposición de los usuarios. En los diseños de sistemas solares y en el presente proyecto se recurrió a las bases de datos dispuestos por la NASA y por el *JRC photovoltaic Geographical Information System* para la zona de Bucaramanga y Kirkuk.

La capa de ozono absorbe casi por completo la radiación ultravioleta y algo de la radiación visible. La radiación infrarroja está dominada por el vapor de agua y por el dióxido de carbono. Aquellas partículas suspendidas en la atmósfera también emiten radiación. Aun cuando esta emisión es poca, conviene tratar a la atmósfera como un cuerpo con una temperatura ficticia más baja llamada *temperatura efectiva de cielo*, T_{sky} . La temperatura efectiva del cielo varía alrededor de 283 K para zonas de cielo cálido.

Las partículas de polvo y otros contaminantes absorben también parte de la radiación por lo cual a la superficie terrestre llega alrededor de 950 W/m^2 en un día claro. Los valores de radiación promedio en la ciudad de Bucaramanga están alrededor de los 450 W/m^2 .

5.2.3 Años típicos meteorológicos (TMY)

Para la realización de la simulación en ANSYS de este proyecto, fue necesario conocer la cantidad de radiación que llegaba del sol al lugar donde se lleva a cabo el experimento, es decir, este proyecto parte de una base la cual consiste en simular las condiciones del proyecto previo *New design of solar chimney* (caso de estudio) por Omer Khalil Ahmeda, Abdullah Sabah Hussein. Dado que no se conocían los datos de radiación, fue necesario consultarlos en una base de datos. Estos son los años típicos meteorológicos por sus siglas en inglés TMY (*Typical Meteorological Year*), que no es más que una recopilación de datos climatológicos representativos para una localidad específica, estructurados de manera horaria o mensual para un período de un año.

Inicialmente los datos a consultar fueron los correspondientes a los meses de marzo, abril, mayo, junio y Julio. En el artículo se menciona que fueron 4 meses desde marzo hasta Julio; sin embargo, no especifican el día de inicio del mes de marzo y el día final de Julio, por ende, se decidió tomar los 5 meses.

Aparte de los datos de radiación de las TMYs, se pueden consultar datos relacionados a la temperatura ambiente y la presión atmosférica del lugar. Para este proyecto los datos fueron tomados de **JRC photovoltaic Geographical Information System**.

En la segunda fase, una vez comparados los resultados de nuestra simulación con los del proyecto *New design of solar chimney*, comprobando que el porcentaje de error esté dentro del rango válido, se procede a simular para la ciudad de Bucaramanga.

5.2.4 *Caracterización del panel solar*

Los paneles solares son módulos fotovoltaicos individuales que captan la energía que proporciona el sol convirtiéndola en electricidad. Están formados por celdas solares que a su vez contienen células solares individuales hechas de materiales semiconductores como el silicio (cristalino y amorfo) que transforma la luz (fotones) en energía eléctrica (electrones).

Cuando hay radiación, una célula solar se comporta casi como una batería. La luz solar recibida separa los electrones de modo que forman una capa de carga positiva y una de carga negativa en la célula solar; esta diferencia de potencial genera una corriente eléctrica.

Los paneles solares se clasifican según (AAWP 2019) en:

Policristalino: Se componen de múltiples cristales de silicio. Este hecho implica un menor rendimiento comparado a los monocristalinos. Su color es azulado.

Monocristalino: Compuestos de un único cristal de silicio. Es más eficiente que el policristalino. Su color es un azul oscuro, casi negro.

El tipo monocristalino suele funcionar muy bien a bajas temperaturas. Sin embargo, el tipo policristalino funciona mejor a temperaturas altas. Por lo que fue seleccionado para el proyecto.

Un panel solar está envuelto de ciertos elementos que lo ayudan a proteger de agentes externos y la vez lo convierten en un elemento rígido para acoplarse al espacio o estructura donde va a operar. Estos elementos son:

Encapsulante: Formado por un material con buena transmisión a la radiación y baja degradabilidad a la acción de los rayos solares.

Cubierta exterior de vidrio templado: Elemento de vidrio especial, con un tratamiento para altas temperaturas que, además, en su cara interior dispone de un tratamiento que hace dos funciones. La primera es dejar pasar hacia el interior la radiación solar y la segunda es no dejar salir la radiación que es reflejada por el panel metálico, produciendo así el efecto invernadero en el interior del captador por lo que aumenta considerablemente el rendimiento del mismo. La cubierta también sirve para reducir las pérdidas por conducción y convección.

Cubierta posterior: Constituida normalmente por varias capas opacas que reflejan la luz que ha pasado entre los intersticios de las celdas, haciendo que vuelvan a incidir otra vez sobre éstas.

Marco de metal: Usualmente es de aluminio, le da rigidez al panel y lleva las perforaciones o elementos necesarios para realizar el montaje

Caja de terminales: Incorpora los bornes para la conexión del módulo.

Diodo de protección: Impiden daños por sombras parciales en la superficie del módulo.

5.2.5 *Potencia del panel fotovoltaico*

Las condiciones establecidas como estándar para las pruebas de módulos fotovoltaicos consisten en una irradiancia de 1000 W/m^2 y 25°C de temperatura del panel. A simple vista, podemos pensar que, si la temperatura promedio de nuestra ubicación es templada, no afectará al panel. Pero se debe considerar que estará expuesto a la radiación directa del sol durante todo el día, y probablemente se encuentre que la cara expuesta estará por encima de los 40°C la mayor parte del día.

La potencia que produce un panel solar varía considerablemente a medida que aumenta su temperatura, se estima en una pérdida de aproximadamente 1% por cada 2°C sobre la temperatura estándar.

El rendimiento de panel según (3amper energía renovable 2017) bajo condiciones de medida estándar:

$$\text{Desempeño} = \frac{Pot_{out}}{I * A_s} \quad (1)$$

Donde Pot_{out} es la potencia salida del panel, I la irradiancia y A_s área superficial del panel en m^2

6 Modelo matemático y numérico

En este capítulo se deducen las ecuaciones sobre la base de la conservación de la masa, de la cantidad de movimiento y de la energía. Se obtienen soluciones para el flujo del aire sobre una

placa plana, considerando el caso particular de la configuración de un panel expuesto al ambiente y de igual manera se obtiene la solución correspondiente al panel junto con la chimenea solar.

6.1 Abordaje

Con base en conocimientos de mecánica de fluidos se debe plantear un modelo que describa la dinámica del fluido y con ello la solución que muestra el comportamiento en términos de partículas en su estado estacionario y transitorio. Posteriormente, se procede a desarrollar el modelo a partir de las ecuaciones de fluidos viscosos con características homogéneas de Navier-Stokes. Estas ecuaciones se obtienen aplicando los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen de control.

Balance de masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

Donde ρ es la masa específica y \vec{v} el vector de velocidad

Balance de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = \vec{\nabla} \vec{T} + \rho \vec{g} \quad (3)$$

Donde \vec{T} es el tensor tensión y \vec{g} la fuerza de la gravedad

Balance de energía:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(U + \frac{1}{2} v^2 \right) + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v} \left(U + \frac{1}{2} v^2 \right) = \vec{\nabla} \cdot \left(\vec{T} \cdot \vec{v} - \vec{q} \right) + (\vec{g} \cdot \vec{v} + \dot{q}) \quad (4)$$

Donde U , \vec{q} y \dot{q} representan la energía interna, el flux de calor y la fuente de calor de respectivamente, estos dos últimos términos conforman los efectos térmico y mecánico del sistema.

6.1.1 *Convección Natural*

En la convección natural el movimiento del fluido es causado por medios naturales, como el efecto de flotación, el cual se manifiesta como la subida del fluido caliente y la caída del fluido frío. El efecto chimenea se debe a la flotación que induce el flujo hacia arriba de los gases calientes, esta fuerza que actúa sobre el fluido es proporcional a la diferencia entre las densidades de los gases calientes que están en ella y el aire más frío del exterior.

La convección también se clasifica por el tipo del flujo, dependiendo si se obliga a fluir sobre una superficie o por dentro de un canal, por lo cual, podemos asegurar si el flujo es interno o externo.

La transferencia de calor por convección es complicada porque comprende el movimiento del fluido, este movimiento mejora la transferencia de calor, ya que pone en contacto porciones más calientes y más frías del fluido. Por lo tanto, la velocidad de la transferencia de calor a través de un fluido es mucho más alta por convección que por conducción. De hecho, entre más alta es la velocidad del fluido, mayor es la velocidad con que se transfiere el calor.

De manera conveniente, la transferencia de calor por convección está expresada por la ley de Newton de enfriamiento así:

$$Q_{Convección} = hA_s(T_s - T_{\infty})$$

(5)

Donde:

h: Coeficiente de transferencia de calor por convección, $W/m^2 \text{ } ^\circ C$

A_s : Área superficial de transferencia de calor, m^2

T_s : Temperatura de la superficie, $^\circ C$

T_{∞} : Temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie, $^\circ C$

En general, el coeficiente de transferencia de calor por convección (h) varía a lo largo de la dirección del flujo, en ese caso el coeficiente se determina al promediar de manera adecuada los coeficientes locales sobre toda la superficie

6.1.1.1 **Convección natural sobre superficies planas**

La transferencia de calor por convección natural sobre una superficie depende de la configuración geométrica de esta, así como su orientación, variación de temperatura sobre la superficie y de las propiedades termofísicas del aire.

Una superficie plana vertical caliente expuesta a un fluido sin movimiento genera un espesor de capa límite que aumenta en la dirección del flujo como se puede observar en la Figura 2, generando los perfiles de velocidades y temperaturas mostradas. La velocidad es nula en el borde exterior de la superficie de la placa y fuera de la capa límite, mientras que la temperatura es máxima en la superficie y decrece hasta la temperatura del fluido.

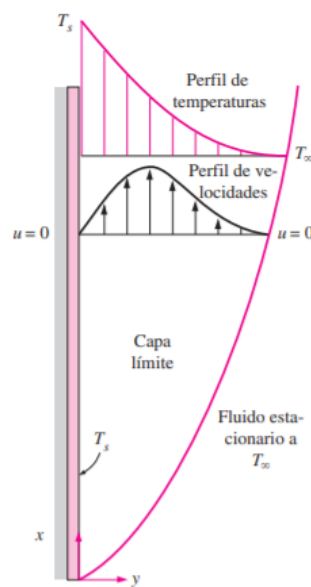


Figura 2 Perfil de temperaturas y velocidades de la convección natural de una placa vertical a una temperatura $T_s > T_\infty$

Fuente: (Cengel and Afshin J 2004)

Para determinar un modelo que satisfaga las condiciones en las que se encuentra el aire dentro de la capa límite se busca el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección. Para ello es práctico reducir el número de variables totales y agruparlos en números adimensionales de manera que se pueda caracterizar el fluido.

Número de Nusselt (N_u):

$$Nu = h * \frac{L_c}{k}$$

(6)

Donde h es el coeficiente de convección y k es el coeficiente de conducción

Longitud característica (L_c) (7)

$$L_c = \frac{A_s}{p}$$

Donde A_s es el área superficial y p el perímetro

Número de Rayleigh (R_a):

$$Ra = \frac{[g_l * \beta(T_s - T_\infty) * L^3 * Pr]}{\nu^3} \quad (8)$$

Donde β y ν son el coeficiente de expansión volumétrica y la viscosidad cinemática respectivamente, evaluados a la temperatura de película

Gravedad en superficies inclinadas (g_l) (9)

$$g_l = g * \cos\theta \rightarrow \text{para } 0 < \theta < 60^\circ$$

Coficiente de expansión volumétrica (β):

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (10)$$

Temperatura de película (T_f):

$$T_f = \frac{(T_s + T_\infty)}{2} \quad (11)$$

Donde T_s es la temperatura de superficial y T_∞ es la temperatura suficientemente lejos de la superficie

Para la simulación posterior fue necesaria la implementación de 2 modelos matemáticos. El primer modelo consta del panel tratado como una placa inclinada como se ilustra en la Figura 3 donde se introducen los valores de radiación hora por hora del día característico de los meses en los cuales se realizaron las pruebas experimentales y de allí se obtienen los coeficientes de

transferencia por convección propios del panel. Es decir, se obtiene un valor de h de panel para cada hora del día.

Para el segundo modelo se analiza el problema completo abarcando la chimenea solar junto con el panel (Figura 4), allí se introducen los valores de los coeficientes de transferencia obtenidos y los valores de radiación, y se obtienen los coeficientes de transferencia globales del sistema. Así es posible introducir estos coeficientes como condiciones de frontera para el modelo computacional.

Para hallar el coeficiente de transferencia por convección en el panel se realizó un código en Matlab.

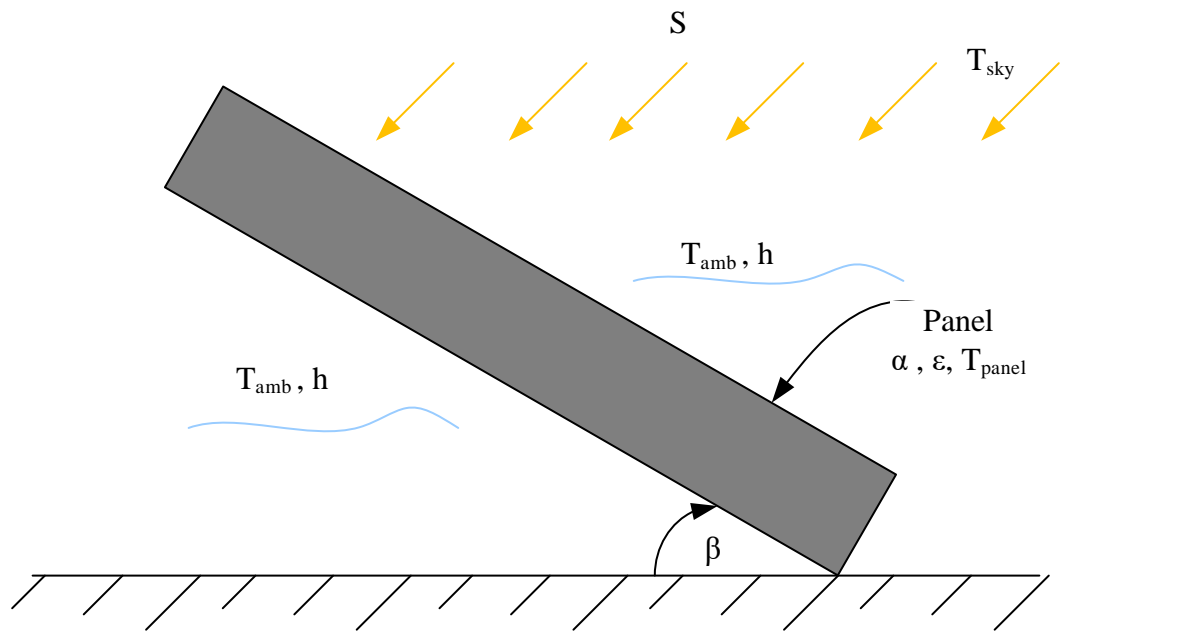


Figura 3 Esquema del modelo termodinámico de una placa plana para el panel fotovoltaico

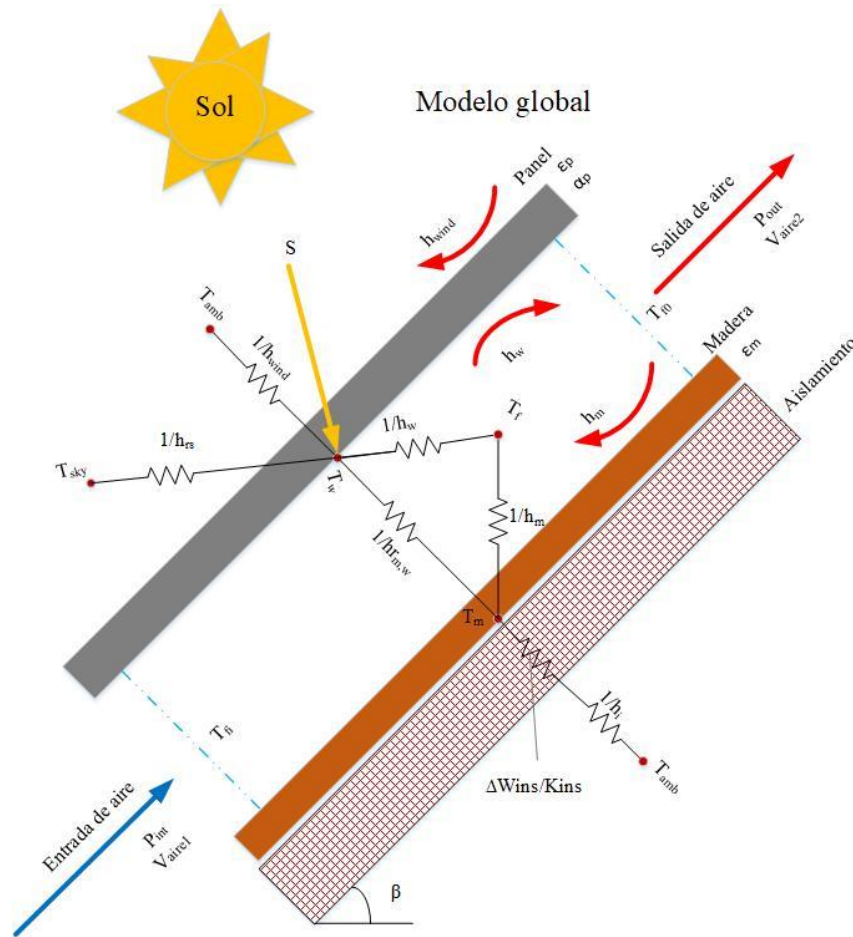


Figura 4 Esquema de modelo termodinámico global, chimenea + panel solar

6.2 Modelo de ecuaciones realizados en Matlab

Tabla 1 nomenclatura ecuaciones cálculo q_{sb}

Ítem	Símbolo	Definición
1	φ	Latitud Local terrestre
2	LSM	Meridiano estándar, define la hora del país
3	LON	Meridiano local
4	n	Día del año
5	β	Ángulo de inclinación superficial

6	ρ	Reflectividad del medio ambiente en el sitio de estudio (adimensional)
7	H_b	Radiación solar directa en un plano horizontal $\left(\frac{w}{m^2}\right)$
8	H_d	Radiación solar difusa medida en un plano horizontal $\left(\frac{w}{m^2}\right)$
9	C_1	Factor para calcular la declinación
10	ET	Ecuación del tiempo
11	LST	Hora local estándar
12	AST	Hora solar aparente
13	δ	Declinación solar para el día del año seleccionado
14	ω	Ángulo horario seleccionado
15	α	Ángulo altitud solar
16	θ_z	Ángulo cenital
17	θ	Angulo de incidencia
18	q_{sb}	Irradiancia sobre una superficie plana inclinada sobre la superficie terrestre

Irradiancia sobre una superficie plana inclinada sobre la superficie terrestre(q_{sb})

Para el cálculo de q_{sb} se necesita determinar los componentes de la radiación directa, la radiación difusa y la radiación reflejada. De esta forma se determina a partir de la siguiente ecuación (Cortes and Paredes 2014):

$$q_{sb} = H_b * \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} + H_d * \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) + H * \rho * \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (12)$$

Se tiene varias opciones para realizar o conocer el valor de q_{sb} , para este caso se usará un modelo de Matlab, el cual trabaja con datos de entrada en el que los componentes de la radiación directa, la radiación difusa y la radiación reflejada son obtenidas de una tabla de datos climatológicos (*TMY*) **JRC photovoltaic Geographical Information System** (European Commission n.d.) correspondientes a la base de datos *PVGIS-SARAH* en Kirkuk y la base de datos *PVGIS-NSRDB* en Bucaramanga.

Ángulo cenital en superficies horizontales

Para una superficie horizontal el ángulo de incidencia de la radiación solar es igual al ángulo cenital ($\theta_z = \theta$), ya que el ángulo de inclinación de la superficie es cero y la normal de la superficie es el mismo eje vertical o zenit.

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta) \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega) \quad (13)$$

Superficies inclinadas

$$\cos(\theta) = \sin(\delta) \sin(\varphi - \beta) + \cos(\delta) \cos(\varphi - \beta) \cos(\omega) \quad (14)$$

$$C_1 = 360 \left[\frac{n - 1}{365} \right] \quad (15)$$

Equation of time ET es la diferencia resultante de la posición rotacional a lo largo del año, es la ecuación (D.1) del libro *load calculation applications manual*

$$ET = 2.2918[0.0075 + 0.1868 \cos(C_1) - 3.2077 \sin(C_1) - 1.4615 \cos(2C_1) - 4.089 \sin(2C_1)]; \quad (16)$$

El tiempo solar aparente $AST(Solar_{time})$, se caracteriza la posición relativa de la tierra respecto al sol (El sol se dirige hacia el sol o hacia el sur en una AST al mediodía). Corresponde a la ecuación (D.5) del libro *load calculation applications manual*

$$AST = LST + \left(\frac{ET}{60}\right) + \frac{(LSM - LON)}{15} - 1 \quad (17)$$

Debido a que la tierra gira alrededor del sol el ángulo de declinación δ varía. El ángulo δ es el ángulo entre el polo de la tierra y un vector de la tierra al sol. Corresponde a la ecuación (D.7) del libro *load calculation applications manual*

$$\begin{aligned} \delta = & 0.3963723 - 22.9132745 \cosd(C_1) + 4.0254304 \sind(C_1) \\ & - 0.387205 \cosd(2C_1) + 0.05196728 \sind(2C_1) \\ & - 0.1545267 \cosd(3C_1) + 0.08479777 \sin(3C_1) \end{aligned} \quad (18)$$

El ángulo horario h , es calculado de la AST. La ecuación de h corresponde a la ecuación (D.6) del libro *load calculation applications manual*

$$\omega = 15(Solar_{time} - 12) \quad (19)$$

Ecuación de cálculo de la altitud de sol

$$\sin(\alpha) = \cos(\varphi)\cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (20)$$

El ángulo cenital θ_z también se puede conocer como el complemento de la altitud solar α

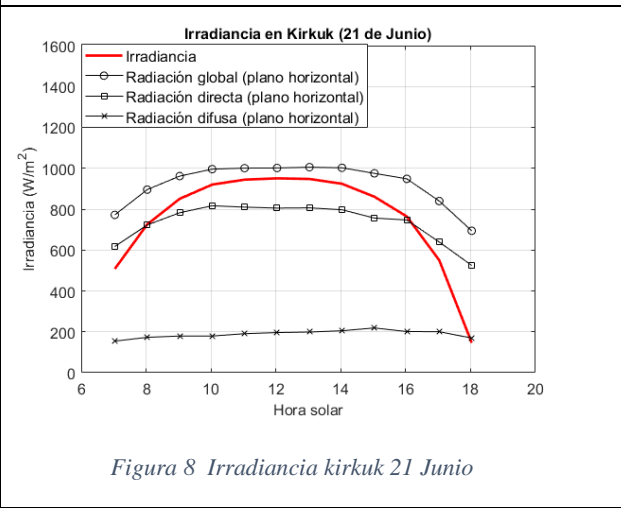
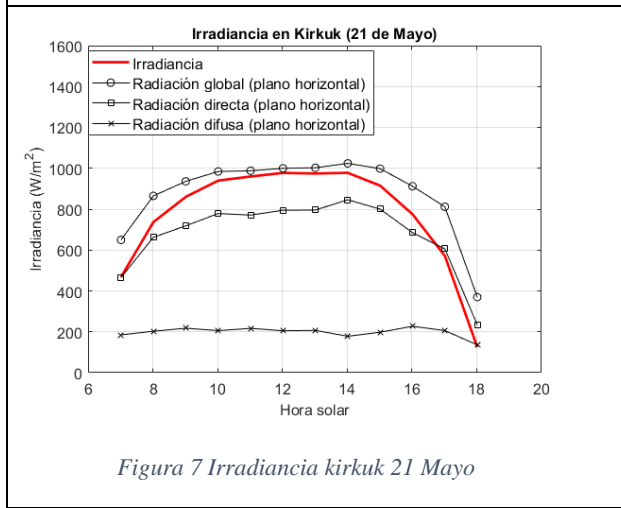
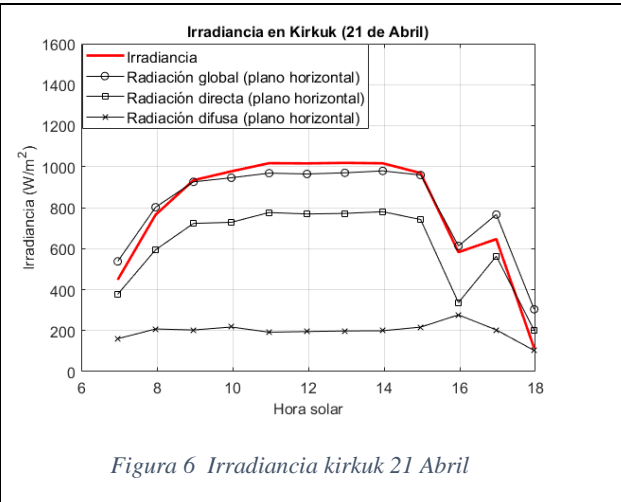
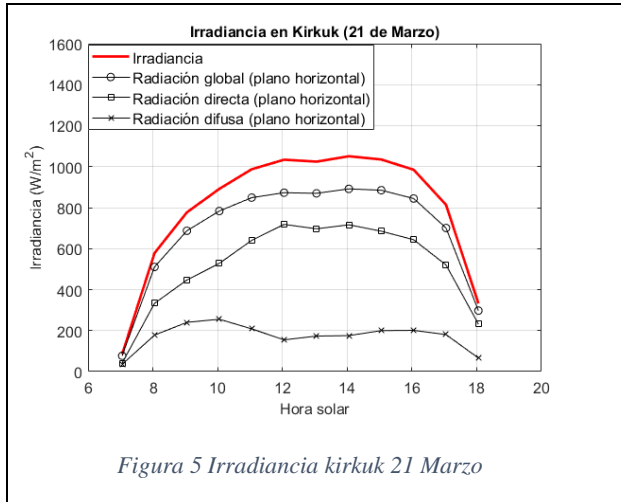
$$\theta_z = 90 - \alpha \quad (21)$$

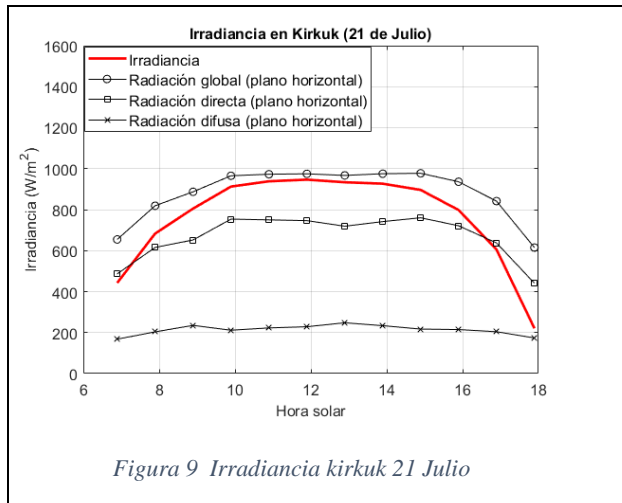
Radiación global

Resulta de la suma de la componente vertical de la radiación directa más la radiación difusa

$$H = H_b + H_d$$

Nota: En la sección de anexos 0, se anexó el código de Matlab para el cálculo del q_{sb}





Se puede observar que la irradiancia va a disminuyendo a medida que se acerca al mes de julio, esto se debe principalmente al ángulo de declinación solar que a su vez influye en el ángulo de incidencia (θ), el cual varía a lo largo del año y la hora del día.

Tabla 2 Nomenclatura de ecuaciones modelo chimenea solar

Ítem	Símbolo	Definición
1	T_w	Temperatura del panel solar en estados estable(K)
2	T_m	Temperatura de la madera en estados estable(K)
3	T_f	Temperatura del aire en el canal de la chimenea (K)
4	T_a	Temperatura ambiente exterior (K)
5	T_{sky}	Temperatura de cielo (K)
6	T_{fo}	Temperatura de salida del aire de la chimenea (K)
7	T_{fi}	Temperatura de entrada del aire en la chimenea (K). Se asume igual a T_a
8	h_{c1}	Coeficiente de transferencia de calor por conducción para el panel solar $\left(\frac{W}{m^2k}\right)$

9	h_{c2}	Coefficiente de transferencia de calor por conducción para la madera $\left(\frac{W}{m^2k}\right)$
10	h_{rwm}	Coefficiente de transferencia de calor por radiación entre el panel solar y la madera $\left(\frac{W}{m^2k}\right)$
11	h_w	Coefficiente de convección entre el panel solar y el aire en el interior de la chimenea $\left(\frac{W}{m^2k}\right)$
12	h_{rs}	Coefficiente de transferencia de calor por radiación entre el panel solar y el ambiente $\left(\frac{W}{m^2k}\right)$
13	h_m	Coefficiente de convección entre la madera y el aire en el interior de la chimenea $\left(\frac{W}{m^2k}\right)$
14	h_{wind}	Coefficiente de convección debido al viento exterior sobre el panel solar $\left(\frac{W}{m^2k}\right)$
15	u_b	Coefficiente global de pérdidas desde la madera al el ambiente $\left(\frac{W}{m^2k}\right)$
16	u_t	Coefficiente global de pérdidas desde el panel solar al ambiente $\left(\frac{W}{m^2k}\right)$
17	S_w	Calor de radiación solar por unidad de área absorbido por el panel $\left(\frac{W}{m^2k}\right)$
18	A_i/A_o	Área de sección transversal entrada / salida en la chimenea
19	A_w/A_m	Relación superficie panel solar / superficie madera
20	L	Longitud de la chimenea (m)
21	β	Angulo de inclinación de la chimenea (deg)
22	γ	Coefficiente de aproximación de temperatura media (0.74)
23	α_w	Absortividad del panel solar
24	ε_m	Emisividad de la madera
25	ε_w	Emisividad del panel solar

26	σ	Constante de Steffan Boltzmann $\left(5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 k^4}\right)$
27	\dot{m}	Flujo másico de aire en la chimenea / recinto (kg/seg)
28	v	Velocidad del aire en la chimenea (m/seg)
29	g	Aceleración de la gravedad (9.81 m/seg ²)
30	c_d	Coefficiente de descarga de la entrada del canal de aire (0.57)
31	c_p	Calor específico del aire
32	ρ	Densidad del aire del aire (kg/m ³)

6.2.1 *Modelo teórico*

(Bansal 1993), fue pionero en proponer un modelo matemático para predecir el flujo másico de aire inducido por la chimenea solar. Los modelos propuestos por (Mathur 2006) y (Saleem et al. 2016) que a su vez se basan en el modelo Bansal, hacen las siguientes suposiciones:

- Condiciones de estado estacionario en el sistema (para una determinada hora del día).
- Transferencia de calor unidimensional para todos los procesos de transferencia de energía en el panel solar.
- Transferencia de calor unidimensional entre el panel solar y el canal de aire.
- La temperatura del aire que ingresa a la chimenea es igual a la temperatura ambiente.
- Solo se considera la fuerza de flotabilidad.
- Flujo laminar en el interior de la chimenea.
- El panel solar y la madera se encuentran en planos paralelos.
- Las propiedades del aire se calcularon según la tabla A-9 del libro *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones* Cengel, Yunus & Cimbala Jhon

Con estos supuestos se puede obtener una solución matemática al resolver simultáneamente las ecuaciones gobernantes de transferencia de calor en el panel solar, la madera y el aire en el interior de la chimenea.

Tabla 3 Información panel / madera

Información de panel solar		Información madera		Información Aislante	
Dimensiones	148x67 cm	Dimensiones	1,48 m x 0,67 m	k	0,037 w/m2k
emisividad	0,9	emisividad	0,8	$\Delta x_{\text{aislante}}$	0,05 m
absortividad	0,8	absortividad	0,25	$\text{Área}_{\text{aislante}}$	148x67 cm

6.2.1.1. Balance de energía en el panel solar

Para el panel solar se tiene que el calor ganado por radiación solar (irradiancia incidente en la superficie inclinada del panel solar multiplicada por el área del panel) debe igualar a las pérdidas de calor por convección con el aire exterior, por convección con el aire interior y por radiación con la madera, como se muestra en la Figura 10

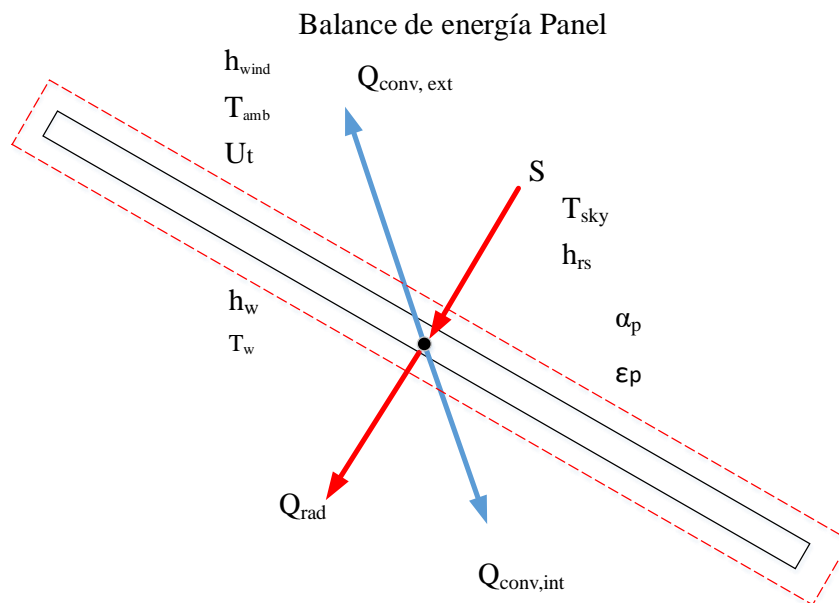


Figura 10 Balance de energía en el panel solar

Matemáticamente esto puede expresarse como:

$$S_w A_w = [h_{rwm} A_w (T_w - T_m)] + [h_w A_w (T_w - T_f)] + [U_t A_w (T_w - T_a)]$$

La anterior ecuación puede escribirse de la siguiente forma:

$$(h_w A_w + h_{rwm} A_w + U_t A_w) T_w - (h_w A_w) t_f - (h_{rwm} A_w) T_m = (S_w A_w + U_t A_w T_a) \quad (23)$$

En donde U_t es el coeficiente global de pérdidas de calor con el ambiente por los efectos combinados de convección al viento, radiación al cielo y conducción a través del panel. Este coeficiente puede ser escrito como:

$$U_t = h_{wind} + h_{rs} + h_{c1} \quad (24)$$

(Duffie and Beckman 1991) sugieren calcular el coeficiente de viento como $h_{wind} = 2.8 + 3V$ en donde V es la velocidad del viento exterior en [m/seg]. El coeficiente de transferencia de calor radiactivo desde la superficie del panel al cielo puede obtenerse como:

$$h_{rs} = \frac{\sigma \varepsilon_w (T_w + T_{sky})(T_w^2 + T_{sky}^2)(T_w - T_{sky})}{(T_w - T_a)} \quad (25)$$

En donde la temperatura de cielo puede ser evaluada según (Swinbank 1963) como $T_{sky} = 0.0552 T_a^{1.5}$. El coeficiente de transferencia de calor por conducción para el panel solar se toma como $h_{c1} = 148 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, que corresponde a la conductividad térmica del silicio. La radiación solar absorbida por el panel se calcula como $S_w = \alpha_w q_{sb}$, en donde q_{sb} es la irradiancia incidente total en el panel inclinado. El coeficiente de transferencia de calor por radiación entre el panel solar y la madera puede calcularse como:

$$h_{rwm} = \frac{\sigma (T_w^2 + T_m^2)(T_w + T_m)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_m} - 1 \right)} \quad (26)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección entre el panel solar y el aire en el interior de la chimenea está dado por:

$$h_w = \frac{Nu K_f}{L_w} \quad (27)$$

En donde Nu es el número de Nusselt para convección natural y K_f es la conductividad térmica del aire evaluada a la temperatura de película. El número de Rayleigh está dado por:

$$Ra = \frac{g\beta(T_w - T_f)L^3}{\nu^2} \quad (28)$$

En donde β y ν son el coeficiente de expansión volumétrica y la viscosidad cinemática respectivamente, evaluados a la temperatura de película. El número de Nusselt puede evaluarse como:

$$Nu = \left[0.825 + \frac{0.387Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right] \quad (29)$$

6.2.1.2. Balance de energía en el aire

Para el aire en el interior de la chimenea se tiene que la convección con el panel solar más la convección con la madera debe ser igual al calor ganado por el aire, como se muestra en la Figura 11

Matemáticamente este balance se puede expresar como:

$$[h_w A_w (T_w - T_f)] + [h_m A_m (T_m - T_f)] = q \quad (30)$$

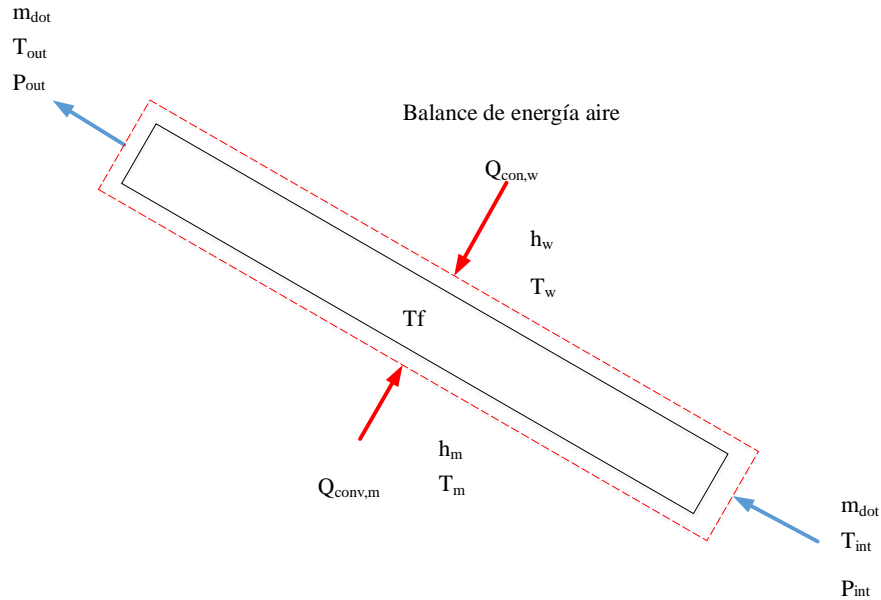


Figura 11 Balance de energía en el aire

El calor útil q ganado por el aire puede expresarse como:

$$q = \dot{m}C_p(T_{fo} - T_{fi}) \quad (31)$$

La temperatura media del aire puede calcularse como sugieren (Ong and Chow 2003) así:

$$T_f = \gamma T_{fo} + 1(1 - \gamma)T_{fi} \quad (32)$$

En donde $\gamma = 0.74$ es el coeficiente de aproximación de temperatura media, T_{fo} es la temperatura de salida del aire y T_{fi} es la temperatura de entrada del aire en la chimenea. Reemplazando la Ecuación (31) en la Ecuación (32) y asumiendo que la temperatura de entrada en la chimenea es igual a la temperatura ambiente T_a se tiene que:

$$\dot{q} = \frac{\dot{m}C_p(T_f - T_a)}{\gamma} \quad (33)$$

Finalmente reemplazando la Ecuación (33) en la Ecuación (30) y organizando términos se tiene que:

$$h_w A_w T_w - \left(h_w A_w + h_m A_m + \frac{m C_p}{\gamma} \right) T_f + h_m A_m T_m = - \left(\frac{m C_p}{\gamma} \right) T_a \quad (34)$$

6.2.1.3. Balance de energía de la madera

Para la madera, se tiene que el calor ganado por radiación (intercambio entre el panel y la madera) debe igualar la suma del calor perdido por convección con el aire interior y el calor perdido por conducción, como se muestra en la Figura 12

Matemáticamente este balance se puede expresar como:

$$[h_{rwm} A_m (T_w - T_m)] = [h_m A_m (T_m - T_f)] + [U_b A_m (T_m - T_a)] \quad (35)$$

Reorganizando términos la ecuación (35) puede expresarse como:

$$(-h_{rwm} A_w) T_w - (h_m A_m) T_f + (h_{rwm} A_m + h_m A_m + U_b A_m) T_m = U_b A_m T_a \quad (36)$$

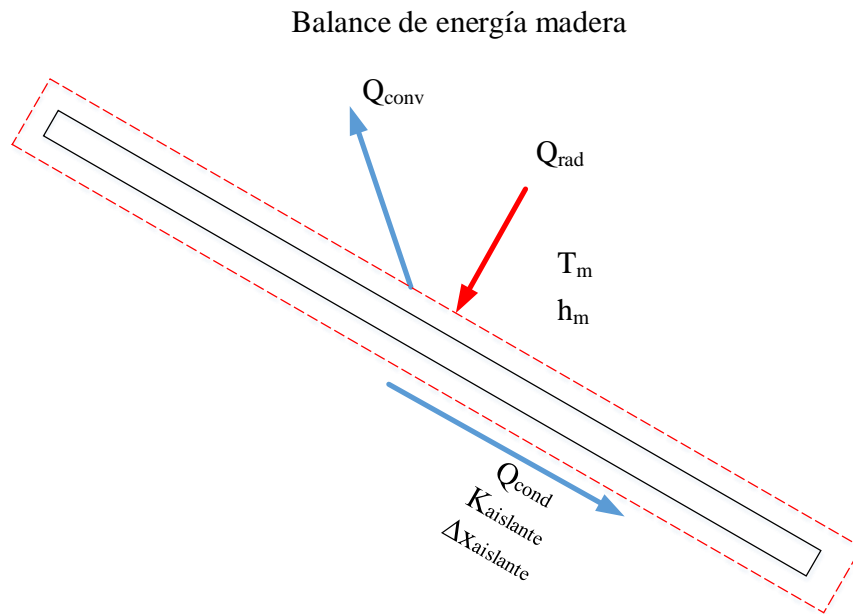


Figura 12 Balance de energía en la madera

En donde U_b es el coeficiente global de pérdidas entre la madera y el aire exterior. U_b puede calcularse de la siguiente manera

$$U_b = \frac{1}{h_i + \frac{\Delta w_{ins}}{K_{ins}}} \quad (37)$$

En donde Δw_{ins} es el espesor del aislante térmico que está bajo la madera y k_{ins} es la conductividad térmica del aislante. En este modelo se supone que h_i es muy pequeño, razón por la cual puede despreciarse (ver Apéndice C [(Mathur and Anupma 2006)]), de modo que el coeficiente global de pérdidas entre la madera y el aire exterior se calcula así:

$$U_b = \frac{1}{\frac{\Delta w_{ins}}{K_{ins}}} = \frac{K_{ins}}{\Delta w_{ins}} \quad (38)$$

6.2.1.4. Análisis matricial

Los balances de energía para el panel solar, el aire en el interior de la chimenea y la madera forman un sistema de 3 ecuaciones linealmente independientes con 3 incógnitas, representado por las Ecuaciones (23), (34) y (36) :

$$(h_w A_w + h_{rwm} A_w + U_t A_w) T_w - (h_w A_w) T_f - (h_{rwm} A_w) T_m = (S_w A_w + U_t A_w T_a)$$

$$h_w A_w T_w - \left(h_w A_w + h_m A_m + \frac{m C_p}{\gamma} \right) T_f + h_m A_m T_m = - \left(\frac{m C_p}{\gamma} \right) T_a$$

$$(-h_{rwm} A_w) T_w - (h_m A_m) T_f + (h_{rwm} A_m + h_m A_m + U_b A_m) T_m = U_b A_m T_a$$

El conjunto de ecuaciones anteriormente mencionadas puede expresarse en forma matricial como:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_w \\ T_f \\ T_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad (39)$$

Que a su vez se representa como:

(40)

$$\mathbf{Ax}=\mathbf{b}$$

En donde \mathbf{A} es la matriz de coeficientes, \mathbf{x} es el vector de incógnitas y \mathbf{b} es el vector de términos independientes. Cada término de la matriz de coeficientes puede definirse como:

$$\begin{aligned} a_{11} &= h_w A_w + h_{rwm} A_w + U_t A_w \\ a_{12} &= -h_w A_w \\ a_{13} &= -h_{rwm} A_w \\ a_{21} &= h_w A_w \\ a_{22} &= -\left(h_w A_w + h_m A_m + \frac{mC_p}{\gamma}\right) \\ a_{23} &= h_m A_m \\ a_{31} &= -(h_{rwm} A_w) \\ a_{32} &= -h_m A_m \\ a_{33} &= h_{rwm} A_m + h_m A_m + U_b A_m \end{aligned}$$

Así mismo los coeficientes del vector de términos independientes se definen como sigue:

$$\begin{aligned} b_1 &= S_w A_w + U_t A_w T_a \\ b_2 &= -\left(\frac{mC_p}{\gamma}\right) T_a \\ b_3 &= U_b A_m T_a \end{aligned}$$

6.2.1.5. Velocidad del aire

Una vez encontradas las temperaturas convergentes T_w , T_f y T_m el flujo másico de aire en el interior de la chimenea puede calcularse como:

$$\dot{m} = C_d \rho A_0 \sqrt{\frac{2g L_s \sin(\theta) (T_f - T_a)}{(1 + A_r^2) T_a}} \quad (41)$$

La velocidad del aire en la chimenea solar está dada por:

$$v_0 = \frac{\dot{m}}{\rho A_0}$$

(42)

En donde A_0 es el área de sección transversal de la chimenea.

6.2.1.6. Algoritmo de solución al modelo planteado

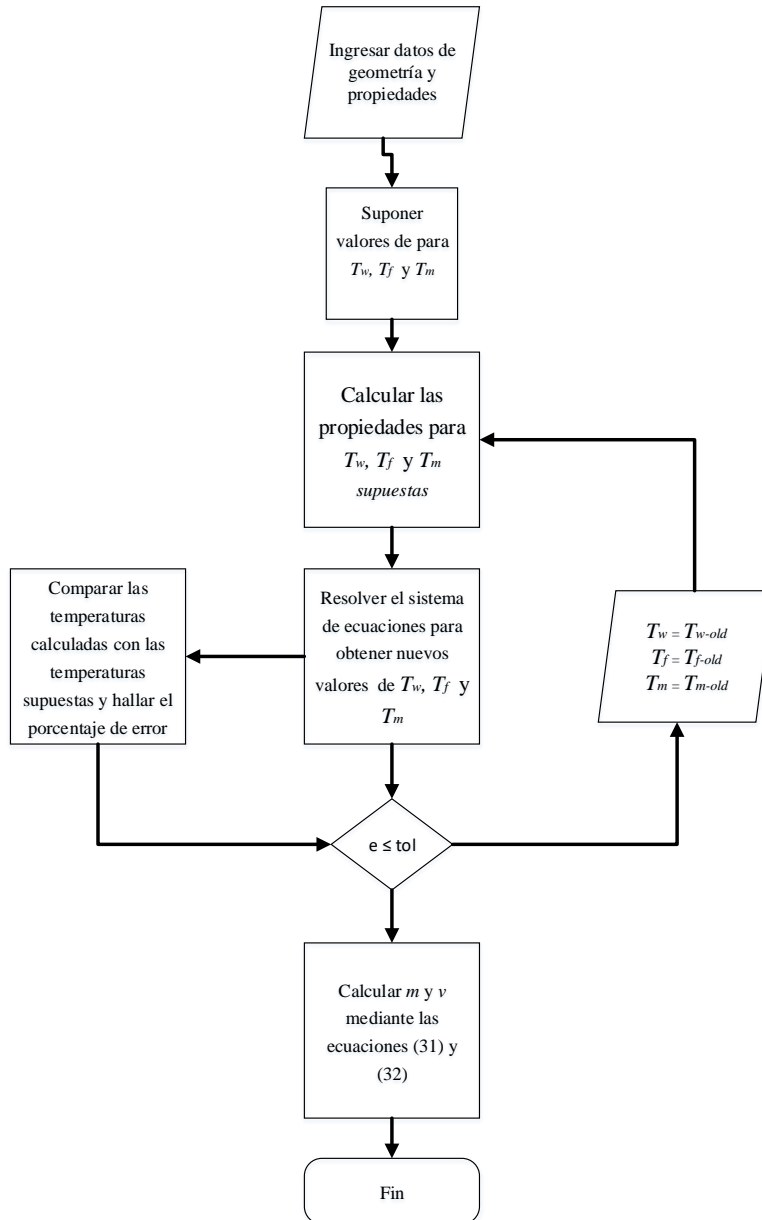


Figura 13 Diagrama de flujo solución basal, Matlab (Sánchez 2020)

Las temperaturas de madera, recinto y panel son asumidas en un inicio, para ejecutar por primera vez el programa en Matlab y comenzar la iteración.

En el apartado dimensional del modelo en ANSYS, se encuentran las áreas de panel, madera y chimenea que poseen dimensiones iguales al caso de estudio *New design of solar chimney*. Por otra parte, la altura efectiva de la chimenea corresponde a la altura del panel por el seno de un ángulo de inclinación, que es aquella inclinación en la que se encuentre el panel en ese momento.

Finalmente se tienen los coeficientes de transferencia de calor correspondientes a: coeficiente entre panel y aire exterior, coeficiente entre panel y aire interno, coeficiente entre panel y el aire interno, madera y aire interno, y coeficiente de pérdidas totales en el ambiente, además de los coeficientes por radiación.

7 Modelo computacional

En este capítulo se comenta el desarrollo y la configuración del modelo computacional aplicado a la simulación de una chimenea solar seleccionada en conjunto con un panel policristalino. Las simulaciones numéricas y la visualización del modelo de mecánica de fluidos para evaluar la temperatura del panel y las condiciones de salida del flujo de aire, fueron desarrolladas en el software comercial ANSYS-FLUENT®. Este código usa el método de volúmenes finitos (FVM) *cell-centered* en mallas no estructuradas para discretización de la ecuación de energía. Para el acoplamiento presión-velocidad se utiliza el algoritmo segregado SIMPLE *Semi-Implicit Method for Pressure-linked Equations*, desarrollado por Patankar and Spalding (1983). Los términos convectivos fueron discretizados utilizando el esquema *Upwind* de segundo orden.

7.1 Computational Fluid Dynamics (CFD) aplicado en chimenea solar

CFD es una herramienta computacional diseñada para resolver diversos problemas del campo asociado a la mecánica de fluidos. CFD tiene la capacidad de resolver de manera aproximada y discreta ecuaciones de fluidos tales como: de continuidad, de energía o de cantidad de movimiento.

La precisión en CFD depende de varios factores: condiciones de entorno, discretización, independencia de malla, capacidad del software, etc. Por ello, no existe un método estandarizado para encontrar la solución a cada problema, haciendo necesario un estudio profundo de las condiciones y propiedades de cada situación planteada, y, por consiguiente, una validación con datos experimentales en la mayoría de los casos.

7.2 Modelo de Boussinesq

Para muchos flujos de convección natural, puede obtenerse una convergencia más rápida con el modelo de Boussinesq que la que puede obtenerse configurando el problema con la densidad del fluido en función de la temperatura. Este modelo trata la densidad como un valor constante en todas las ecuaciones resueltas, excepto para el término de flotabilidad en la ecuación de cantidad de movimiento:

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0)g \quad (43)$$

Donde ρ_0 es la densidad (constante) del fluido, T_0 es la temperatura de funcionamiento y β es el coeficiente de expansión térmica. La ecuación (43) se obtiene utilizando la aproximación de Boussinesq para eliminar del término de flotabilidad. Esta aproximación es precisa siempre que los cambios en la densidad real sean pequeños; específicamente, la aproximación de Boussinesq es válida cuando:

$$\rho = \rho_0(1 - \beta\Delta T) \quad \rho \beta(T - T_0) \ll 1 \quad (44)$$

El modelo no debe usarse si el diferencial de temperaturas en el dominio es mayor de 100 grados Celsius

7.3 Modelo de Turbulencia

Para la aplicación del CFD en la chimenea solar se deben tener en cuenta varios aspectos en la elección del modelo. El modelo elegido recomendado por la literatura es el modelo de turbulencia k-epsilon ($k-\epsilon$), basado en las ecuaciones de transporte de energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación (ϵ).

El modelo de turbulencia utilizado en estas simulaciones fue (k-ε) estándar. Este modelo es semi-empírico, utilizado en la práctica de ingeniería para el cálculo de flujos en el tiempo.

Para la energía cinética turbulenta (k):

$$\frac{\partial(pk)}{\partial t} + \frac{\partial(pku_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (45)$$

Para disipar epsilon (ε):

$$\frac{\partial(p\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(p\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (46)$$

Donde:

μ_i : representa el componente de velocidad en la dirección correspondiente; E_{ij} : representa el componente de la tasa de deformación; μ_t : representa la viscosidad de los remolinos

Las ecuaciones también constan de algunas constantes que se ajustan. Los valores de estas constantes se han obtenido de la iteración (Launder and Spalding 1974) en los ajustes de datos para una variedad de flujos turbulentos y son:

$$\begin{aligned} C_\mu &= 0.09 & \sigma_k &= 1.00 & \sigma_\varepsilon &= 1.30 \\ C_{1\varepsilon} &= 1.44 & C_{2\varepsilon} &= 1.92 & & \end{aligned}$$

7.3.1 *Semi-Implicit Method (SIMPLE)*

El método SIMPLE incluye: supuestos, grados de libertad, discretización y correcciones de presión y velocidad. El método de solución se da en forma de diagrama de flujo. Este trabajo asume que el problema CFD es incompresible. Esta suposición es válida en una variedad de problemas cuando las velocidades de flujo no son demasiado altas.

7.4 Geometría.

La selección de la geometría se realiza con base a la necesidad de disminuir la temperatura de las células solares puesto que el aumento de ésta causa la reducción en la eficiencia eléctrica

del sistema. El sistema consta de una chimenea solar en conjunto con el panel policristalino, cuyas dimensiones fueron parte de un tema de estudio antes realizado en Kirkuk, Irak.

En la Figura 14 se observa la configuración seleccionada y en las Figura 15, Figura 16 y Figura 17 el valor de sus dimensiones.

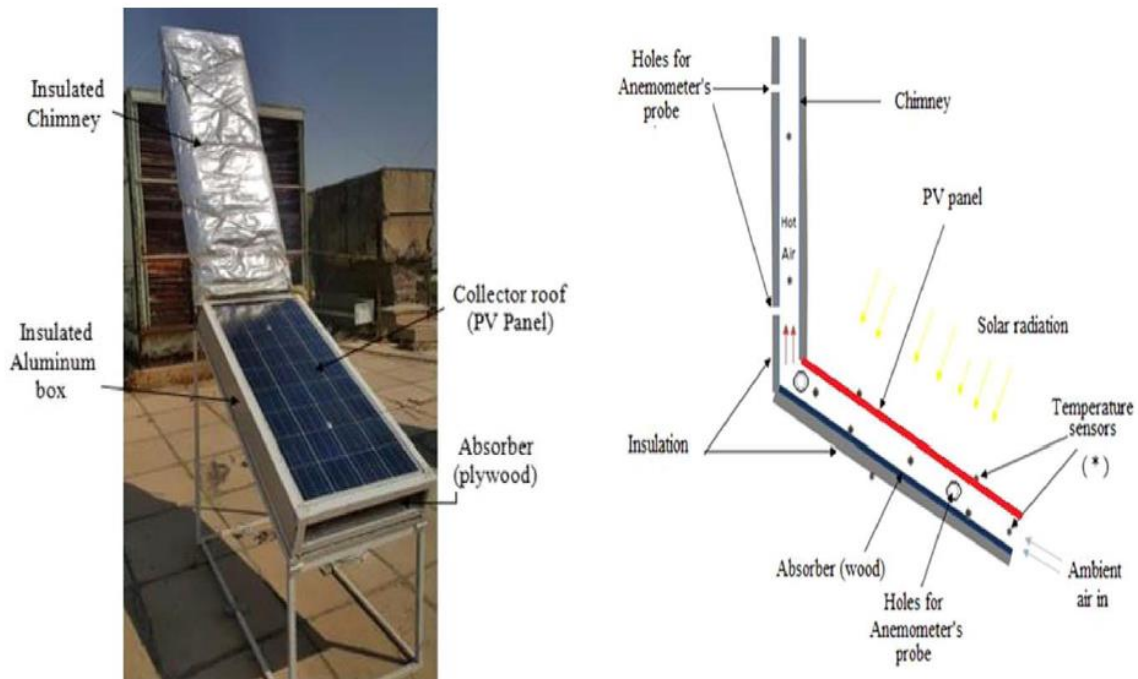


Figura 14 Montaje de proyecto new design chimney

Para realizar la simulación se debió realizar la representación del dominio fluido del modelo con la ayuda de la herramienta de Solidworks. Para contrastar la simulación con proyectos previos, las dimensiones de la chimenea inicialmente fueron, altura 2 m, Longitud del colector de 1.48 m, con un perfil de entrada con un ancho de 67 cm y alto de 10 cm.

El panel por su parte posee dimensiones de 1.48 m de largo con 0.67 m de ancho y un espesor de 4 mm.

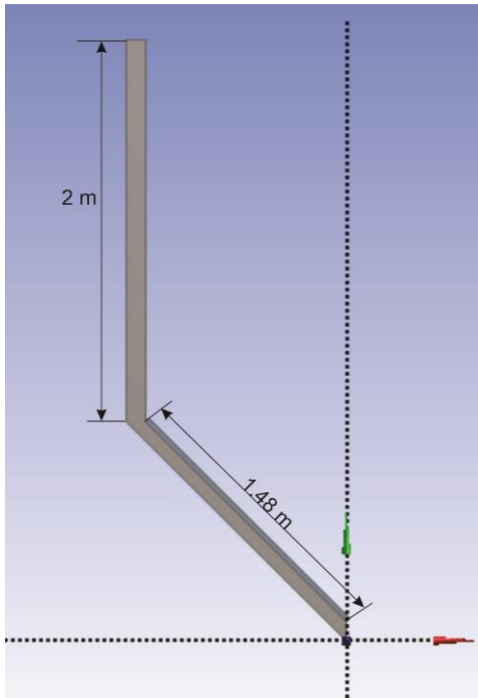


Figura 15 Vista lateral de la chimenea solar creado en Mesh ANSYS

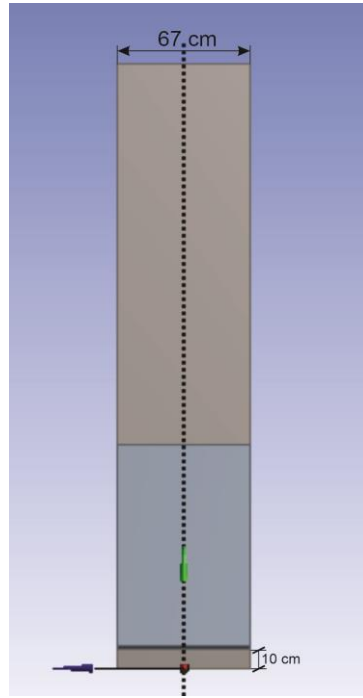


Figura 16 Vista frontal de la chimenea solar creado en Mesh ANSYS

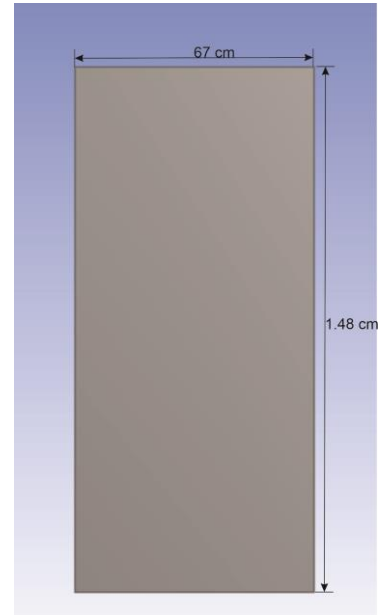


Figura 17 Dimensiones del panel solar creado en Mesh ANSYS

7.5 Condiciones termodinámicas y propiedades de los fluidos

Para la validación de los modelos matemáticos se utilizaron los datos experimentales obtenidos por el caso de estudio. La configuración experimental fue construida y probada en la ciudad de Kirkuk al norte de Irak a una altura de 400 metros del nivel del mar, orientado al sur y con ángulo de inclinación de 45° y condiciones medioambientales de la zona mostradas en la Tabla 4.

Tabla 4 Condiciones medioambientales

Locación	Kirkuk, Irak
Geográficas coordenadas	$35.475769^\circ, 44.476089^\circ$
Zona horaria	UTC+03, Asia/Baghdad
Elevación	400 m
Presión atmosférica	98125.3 [pa]
Temperatura ambiente	22,4 °C

7.6 Materiales y propiedades

En la Tabla 5 se presentan los materiales con los que se realizaron las pruebas experimentales y de las propiedades involucradas en la simulación

Tabla 5 materiales y propiedades

Materiales	
Aire	Tipo: Fluido
Densidad [Kg/m ³]	1,225
Calor específico [J/Kg-k]	1006,43
Conductividad [W/m-k]	0,0242
Aluminio	Tipo: Sólido
Densidad [Kg/m ³]	2719
Calor específico [J/Kg-k]	871
Conductividad [W/m-k]	202,4
Silicio	Tipo: Sólido
Densidad [Kg/m ³]	2330
Calor específico [J/Kg-k]	712
Conductividad [W/m-k]	148
Madera	Tipo: Sólido
Densidad [Kg/m ³]	545
Calor específico [J/Kg-k]	1,21
Conductividad [W/m-k]	0,12

7.7 Condiciones de frontera

En la entrada de la chimenea se considera velocidad del aire nula, presión manométrica de 0 pascal y la temperatura ambiente de 298 K. Para el cálculo de las variables de turbulencia se considera intensidad de turbulencia de 1% y diámetro hidráulico de 0.174 m.

A la salida se considera presión manométrica de 0 pascal y no retorno del flujo de aire. En las paredes del recinto se impone como coeficiente de transferencia de calor los valores generados en el sistema de ecuaciones mediante Matlab de la misma manera para el panel solar.

Para la condición de frontera de radiación se selecciona un término fuente de energía en el cuerpo del panel solar que asemeja el flujo de calor para cada radiación en unidades de W/m²*K

En la Tabla 6. Se visualiza los modelos, las condiciones de frontera, los métodos de solución y la inicialización de la simulación

Tabla 6 Condiciones de operación para la validación del modelo de la chimenea solar

Modelos			
Viscous Model		k-epsilon	
	k epsilon model	standard	
	near-wall treatment	standard wall function	
Energía	on		
Condiciones de contorno			
Entrada		presión de entrada	
	Indicador total de presión	0 pascal	
	temperatura	298 K - 25 °C	
Salida	indicador de presión	0 pascal	
Pared absorbente		Pared	
	temperatura	298 K - 25 °C	
Pared del recinto		Pared	
	convección	temperatura de corriente libre	298 K - 25 °C
		coeficiente de transferencia de calor	8 w.m ⁻² .k ⁻¹
Pared del panel		Pared	
	flujo de calor	700 w/m ²	
	convección	temperatura de corriente libre	298 K - 25 °C
		coeficiente de transferencia de calor	8 w.m ⁻² .k ⁻¹
Métodos de solución			
Acoplamiento presión-velocidad	SIMPLE		
discretización espacial	presión	segundo orden	
	momentum	segundo orden contraviento	
	razón de disipación de la turbulencia	primer orden contraviento	
	energía cinética de la turbulencia	primer orden contraviento	
Inicialización			
Método de inicialización	estándar		

x-velocidad, y-velocidad, z-velocidad	0 m.s ⁻¹
temperatura	298 K - 25 °C
indicador de presión	0 pascal

7.8 Resultados

Primero se realizaron las pruebas de independencia de malla. En segundo lugar, fue realizada la validación de la simulación mediante la comparación de los resultados obtenidos y los datos experimentales del caso de estudio encontrados en la literatura. Por último, con el modelo validado, se analizó el efecto de la chimenea solar en la temperatura del panel mediante dos sistemas: panel con chimenea solar y solo panel.

7.9 Independencia numérica de la malla

En el anexo (Figura 52) se muestra un diagrama metodológico utilizado en todos los tests de independencia numérica de las mallas de las diferentes configuraciones geométricas. El mallado se genera en el software *Mesh* disminuyendo progresivamente el tamaño del elemento. Por otra parte, se realiza *un body sizing* en la zona del panel solar con un tamaño del elemento menor al recinto de la chimenea, con el objetivo de un mayor refinamiento tal como se muestra en la Figura 18.

En la Tabla 8 se pueden encontrar Condiciones de simulación para el test de independencia de malla

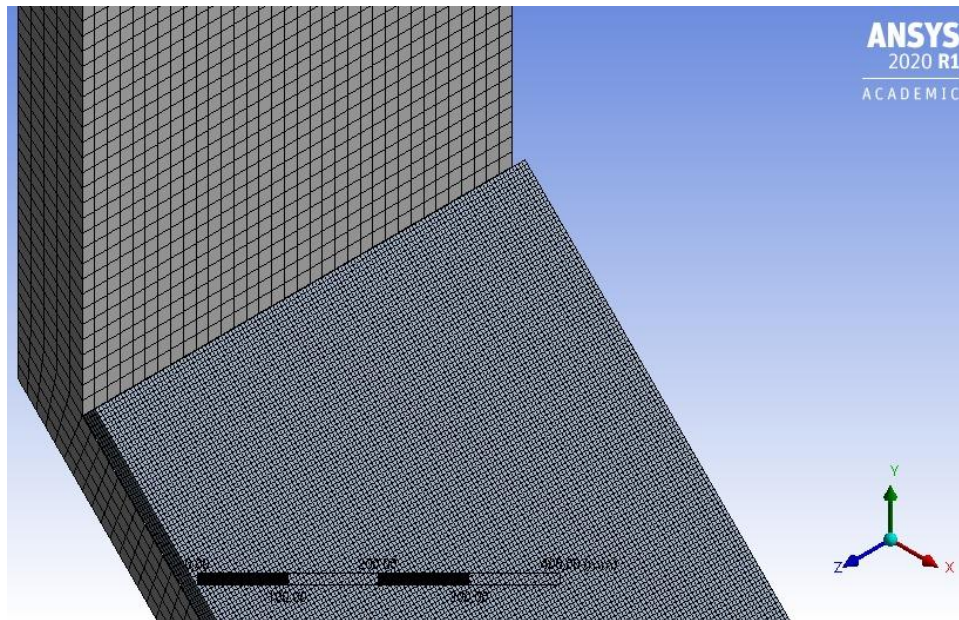


Figura 18 Malla computacional generada para las simulaciones numéricas

Se observa que a medida que disminuye el tamaño del elemento, hay un incremento en el número de estos con sus respectivos resultados de temperatura de panel en la Tabla 7. La malla con número de elementos de 223775 fue seleccionada para realizar las simulaciones luego de observar que las mallas de mayor número de elementos, presentaban un comportamiento similar y constante respecto a la variable (temperatura) con el fin de disminuir tiempo de cálculo.

Tabla 7 Número de elementos de la malla seleccionada

Body sizing [mm]	8	7	6	5	4	3,85
Element size [mm]	25	22	21	20	18	17,9
Número de elementos	61956	106134	136960	223775	415686	510672
Temperatura del panel K	325,58	325,36	325,35	331,09	331,09	331,09

Tabla 8 Condiciones de simulación para el test de independencia de malla

Test de independencia de malla	
Software	Ansys Fluent 2020 R1
Tipo de Simulación	Estado estable, 3D

Modelo de turbulencia	k- ϵ SST
Transferencia de calor	Flujo de calor convectivo
Fluido	Aire
Presión de operación	98125.3 [pa]
Intensidad turbulenta	1%
Diámetro hidráulico	0.174 [m]

La Figura 19 muestra el perfil de temperatura del panel en función del número de elementos de la malla en las mismas condiciones. Se observa la línea de convergencia de los resultados y el mínimo valor de los elementos el cual es independiente de la configuración de la malla, de manera que se conserve el balance entre la precisión de los resultados y el esfuerzo computacional.

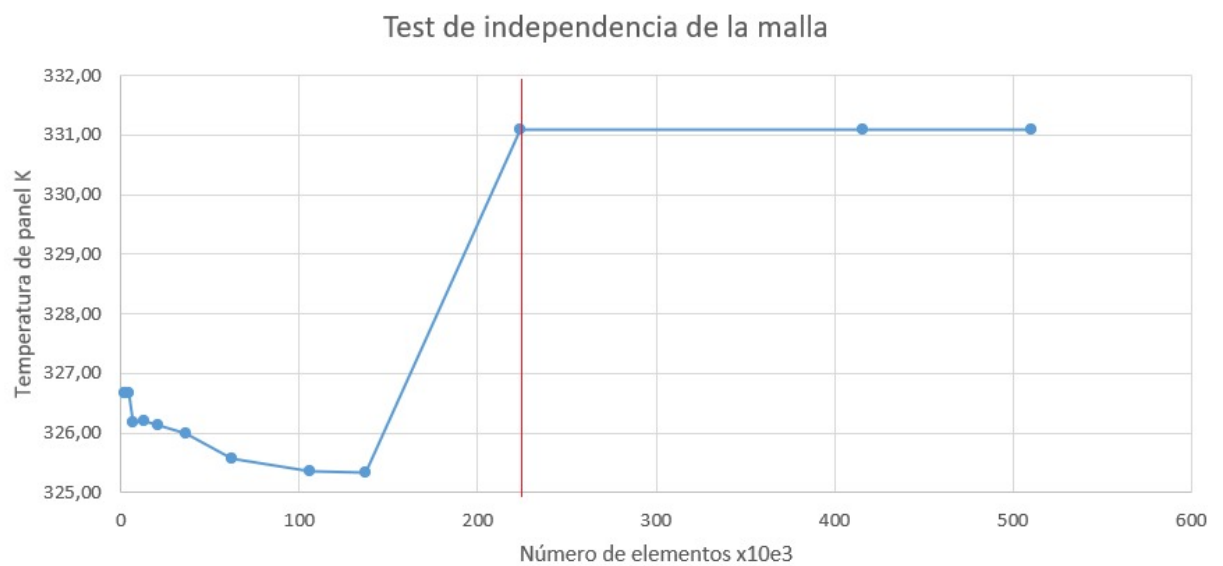


Figura 19 Test de independencia de malla: Temperatura del panel en función del número de elementos

Los parámetros de calidad de la malla seleccionada se presentan en la Tabla 9 y la Tabla 10, tomados de los histogramas generados por el *software*, donde se observa la oblicuidad y ortogonalidad (apéndice 1) de los elementos. Como resultado obtenemos un 0% de elementos de mala calidad para ambos parámetros.

Tabla 9 Parámetros de calidad de la malla seleccionada

Oblicuidad/Skewness			
Min	Max	Promedio	Desviación estándar
2,76E-09	0,5	4,44E-02	0,12196

0,0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0
89,04%	6,15%	4,88%	0%	0%

Tabla 10 Parámetros de calidad de la malla seleccionada

Calidad ortogonal/Orthogonal quality				
	Min	Max	Promedio	Desviación estándar
	0,70754	1	0,9799	6,00E-02
0,0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0
0%	0%	0%	5,50%	94,50%

7.9.1 Validación del modelo

Para la validación de los resultados obtenidos por la simulación, se comparan con las pruebas experimentales del caso de estudio (Omer Khalil Ahmed), lo cual se muestra en la Figura 20, los datos de color azul indican el perfil de temperaturas en función del tiempo en horas del día durante los meses que se realizó la toma de los datos.

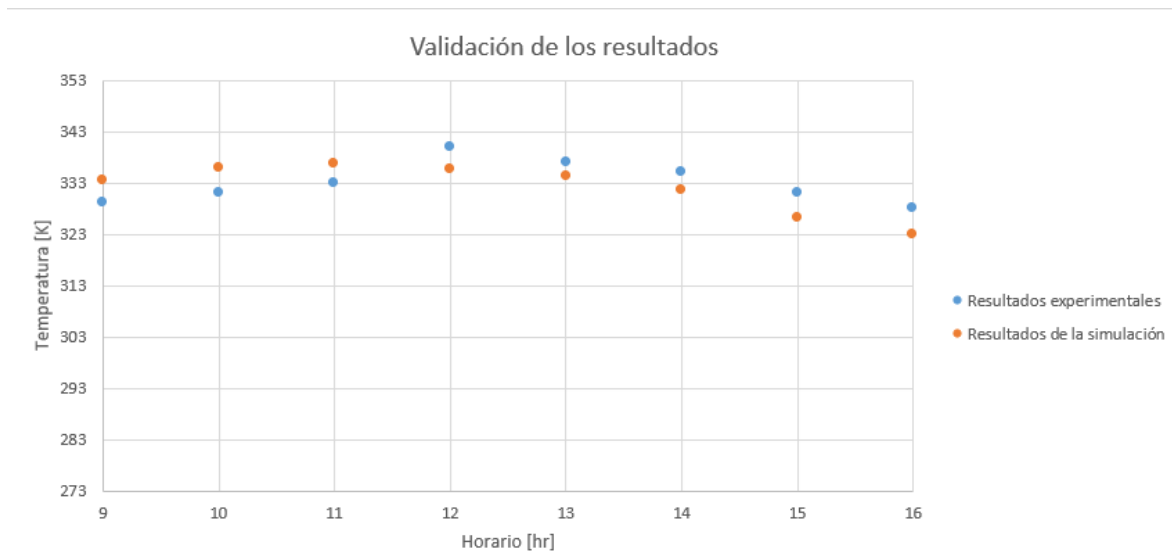


Figura 20 Comparación de perfiles de temperaturas en función del tiempo de las pruebas obtenidas por Omer (azul) y los resultados de la simulación (naranja).

Tabla 11 promedio de temperaturas de panel entre los meses de marzo a Julio y porcentaje de error

Horas del día	Promedio Artículo	Promedio simulación	% de error
9	329	333,287	1,303
10	331	335,872	1,472

11	333	336,700	1,111
12	340	335,696	1,266
13	337	334,129	0,852
14	335	331,612	1,011
15	331	326,223	1,443
16	328	323,006	1,523

Para realizar la validación de la simulación se calcula el porcentaje de error entre los resultados de temperaturas presentados por el artículo de Ahmed & Hussein, estos resultados muestran la temperatura de panel en promedio de los meses de marzo hasta Julio, durante las horas del día mostradas (9 am- 4 pm). Como se puede observar el porcentaje de error es menor al 2%, lo cual indica un margen de error aceptable, en la variable de mayor interés.

El resultado de la energía eléctrica que entrega el panel de potencia nominal de 150W indicado por el artículo, presenta en su sistema un alcance de 108 W en su máxima temperatura de 67°C. En términos de porcentaje, el panel alcanza a entregar el 72% de su potencia nominal, esta energía eléctrica es función de la radiación solar y de la ganancia de calor.

Para calcular la energía eléctrica que entrega el panel en la simulación nos valemos de la ecuación de ineficiencia por temperatura, la cual es un factor que multiplica la potencia nominal del panel en relación con la temperatura descrita de la siguiente manera:

$$\text{Ineficiencia por temperatura} = 1 - 0.008(T_p - 25)$$

(47)

Usamos la temperatura máxima de los resultados simulados y se obtiene un factor de 0.696, valor que al multiplicar la potencia nominal se obtienen 69.6 W, lo cual indica que el panel alcanza a entregar 104.4W, alrededor del 70% de su potencia nominal. Como se puede observar la diferencia es del 2%, un margen de error aceptable.

En cuanto a la velocidad del aire, los resultados muestran discrepancias debido a la dirección y velocidad del aire en las pruebas experimentales, por lo tanto, no se realiza la validación respecto a esta variable, sin embargo, presenta el mismo comportamiento de velocidad dependiente de la radiación.

Buscando la validación de los resultados hemos obtenido el desarrollo simulado del proceso termo físico de un sistema chimenea y panel solar, el cual puede ser usado para cualquier tipo de configuración de la chimenea o para proyectos a gran escala sin necesidad de construcción de un prototipo representando un ahorro de tiempo y materiales.

7.10 Efecto de la chimenea solar

Para el análisis del efecto de la chimenea solar en la temperatura del panel solar se realizó una comparación de dos modelos. El primer modelo consta únicamente del panel, es decir, sin chimenea ver (Figura 21). El segundo modelo está compuesto del panel y la chimenea solares ver (Figura 22). Ambos modelos están expuestos a las mismas condiciones de temperatura ambiente, presión y a los mismos valores de radiación. Cada modelo está sujeto a un código respectivo generado, este código resuelve para calcular el correspondiente coeficiente global de transferencia de calor, como resultado de estas dos simulaciones se encuentra que el coeficiente de transferencia de calor en la chimenea es mayor comparado al modelo sin chimenea. Por tanto, la chimenea demuestra tener un efecto positivo en el desempeño del panel solar

En la Figura 23 se observan los perfiles de temperaturas del panel en función del tiempo en horas del día. Los valores de temperatura son el promedio de los resultados de la simulación en las horas del día durante los meses que se realizaron las pruebas experimentales (marzo-Julio).

El valor máximo de temperatura en el primer modelo en donde se encuentra el panel únicamente es de 76 ° Celsius mientras que el valor de la temperatura en el modelo del panel con chimenea se encuentra en 64 ° Celsius.

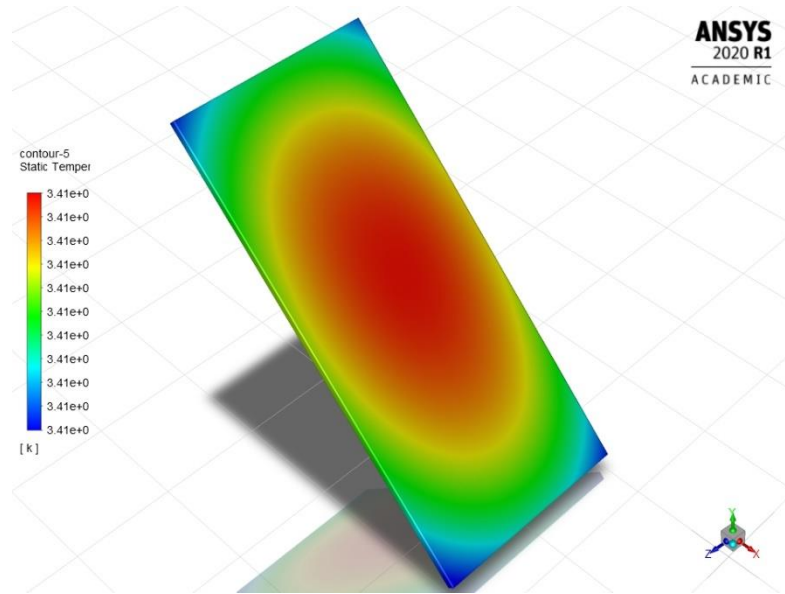


Figura 21 Modelo de temperatura en la placa solar

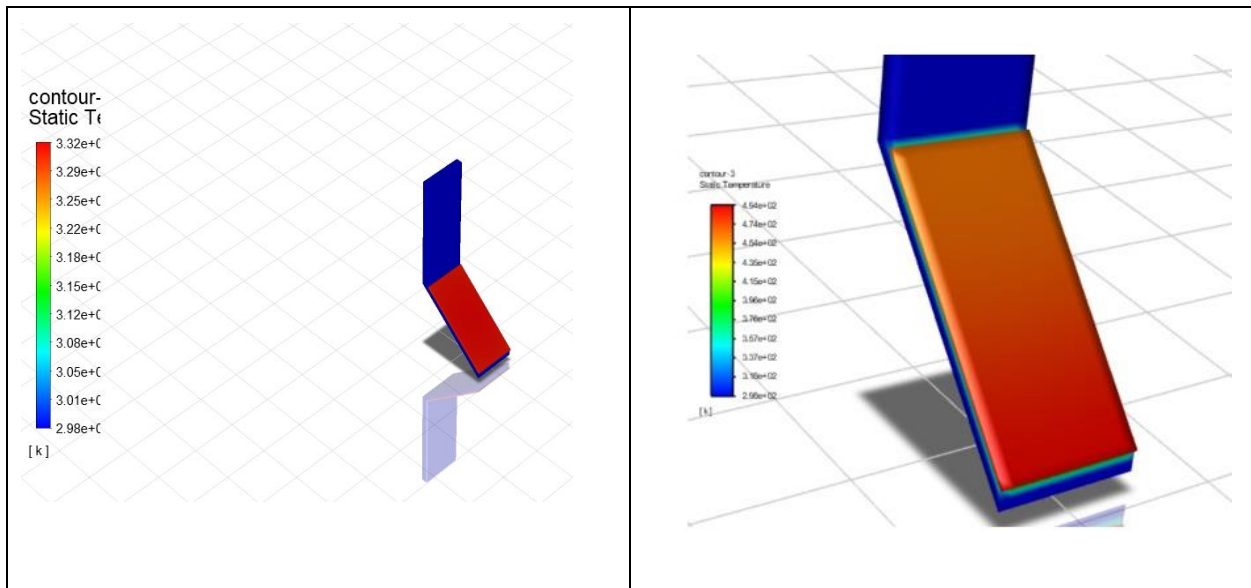


Figura 22 Modelo de temperatura panel solar + chimenea solar

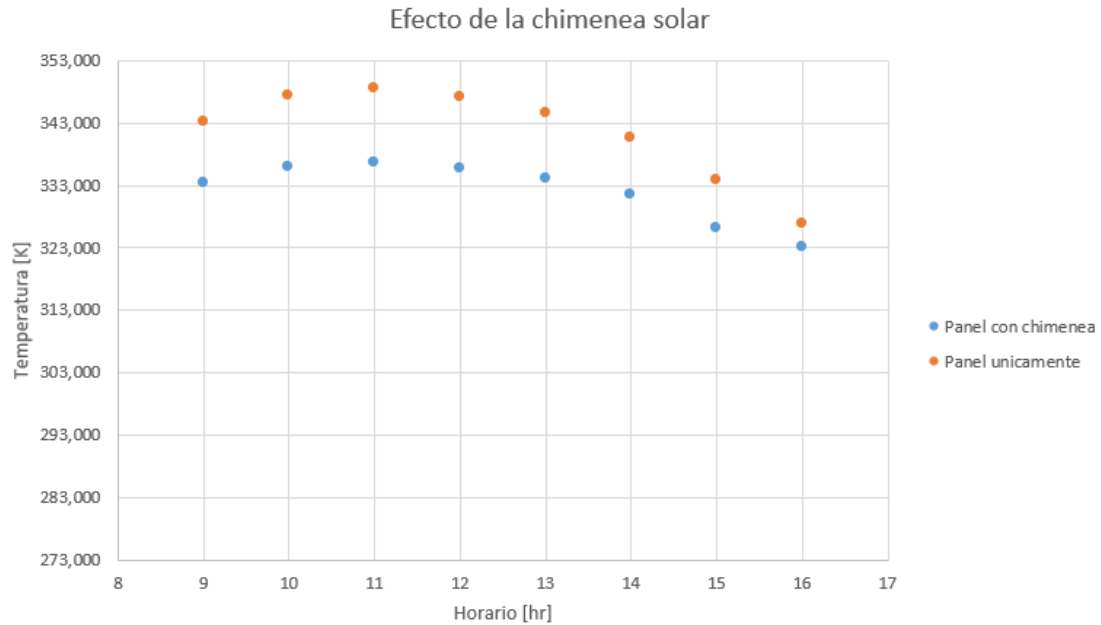


Figura 23 Efecto de la chimenea solar en Kirkuk, Irak

El efecto de la chimenea se evidencia en el diferencial máximo de temperatura que ocurre en el valor máximo de radiación, con un delta de 12° Celsius alrededor de las 11 a.m. y un decaimiento en el valor del diferencial de temperatura después de las 3 p.m. Puede decirse entonces que después de las 4 p.m. la chimenea no tiene ninguna influencia dentro de la temperatura del panel.

El desempeño del panel solar se puede observar de igual manera si se busca el factor de ineficiencia por temperatura, para ello recurrimos de la ecuación (47) donde se usa los resultados de la temperatura máxima obtenidos para cada modelo.

Para el primer modelo se obtuvo una temperatura máxima de panel de 76°C , reemplazando en la ecuación resulta un factor de 0.592, el valor es multiplicado por la potencia nominal del panel para obtener la potencia real suministrada por dicho panel. Como resultado, el panel de potencia nominal de 150 W, entrega realmente 88.8 W.

Para el segundo modelo reemplazamos la temperatura de panel de 64°C en la ecuación, allí se encontró un factor de 0.688, lo cual indica que el panel entrega 103.2 W. La diferencia de energía eléctrica entre ambos modelos es de 14 W.

La tendencia de la eficiencia del panel está ligada a la diferencia de temperaturas, esto sucede por la presencia de la chimenea solar que proporciona un efecto de enfriamiento al panel fotovoltaico de manera que su temperatura disminuye y entrega mayor energía eléctrica a un mismo valor de radiación.

La velocidad del aire es un parámetro importante para visualizar la transferencia de calor por todo el cuerpo fluido, allí se observa el efecto producido por la flotación como el flujo natural del aire con respecto a las paredes del sistema.

En la Figura 24 se observa la velocidad de entrada de aire al ducto de la chimenea, en la parte inferior del área de entrada se visualiza el valor máximo de velocidad identificado con el color rojo y se encuentra alrededor de los 0,03 [m/s]. Esto sucede debido a que la superficie receptora ubicada en la placa de madera (parte posterior al panel) contiene la mayor energía térmica, creando succión de aire cuando la velocidad del aire exterior es de 0 [m/s].

En la Figura 25 se observa la velocidad de salida del aire de la chimenea, se visualiza el flujo máximo en la mitad del área de la salida. El valor de velocidad promedio en la salida está alrededor de los 0.015 [m/s] sin presentarse flujo invertido.

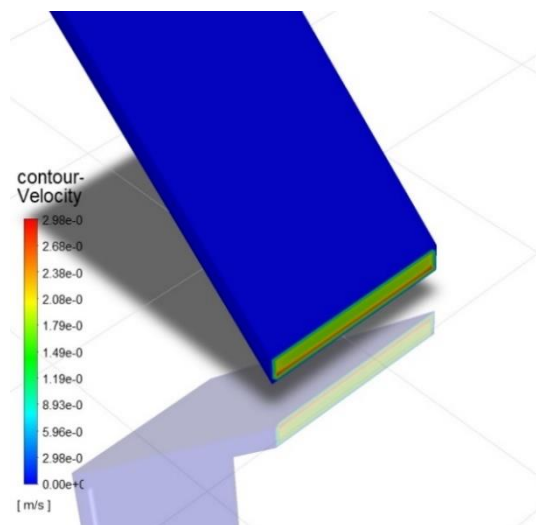


Figura 24 velocidad del aire de entrada en la chimenea

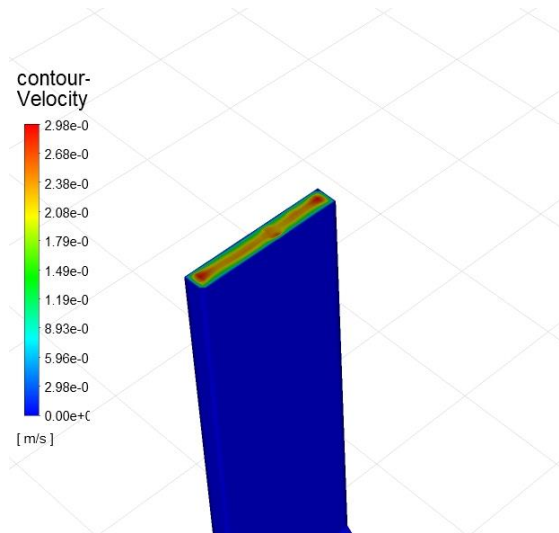


Figura 25 velocidad del aire de salida en la chimenea

En la Figura 26 se muestran también las curvas del comportamiento de los coeficientes de transferencia e irradiancia en las horas del día. Se puede observar como el coeficiente de convección interna sufre efectos significativos en su comportamiento debido a la influencia de la irradiancia por otra parte el coeficiente global mantiene un comportamiento más estable. Además, la irradiancia no presenta picos debido a la poca presencia de nubes

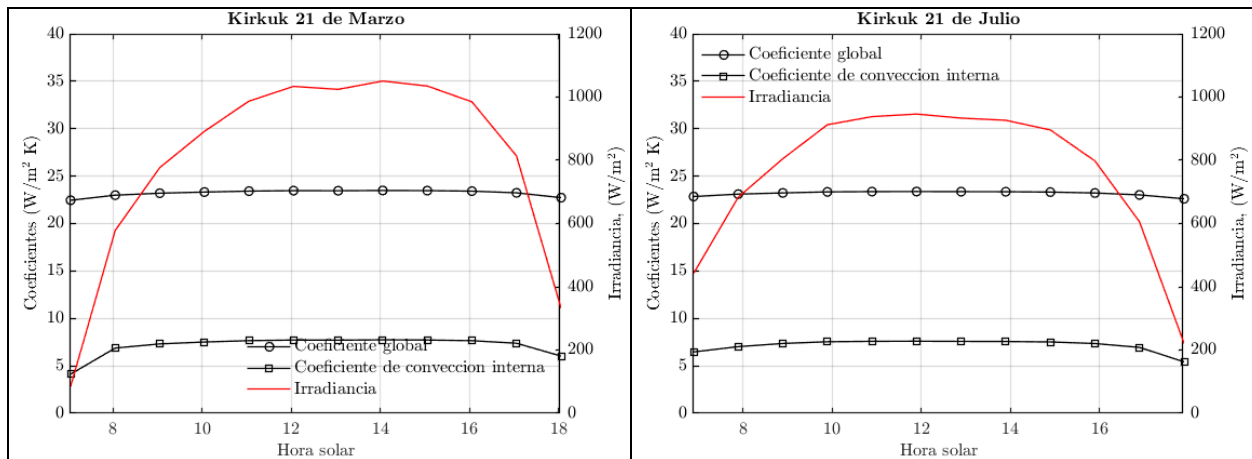


Figura 26 Curvas comparativas del coeficiente de transferencia global, convección interna e irradiancia según la hora del día para los días representativos de los meses de marzo y Julio en kirkuk

En la Figura 27 se muestran también las curvas del comportamiento de la velocidad del aire vs la irradiancia, a lo largo del día. Se observa una irradiancia con forma de parábola, es decir, hay poca presencia de nubes que influyan en la llegada de los rayos solares a la superficie, a su

vez, debido a que la irradiancia afecta directamente la velocidad del aire, la velocidad también muestra un comportamiento de parábola.

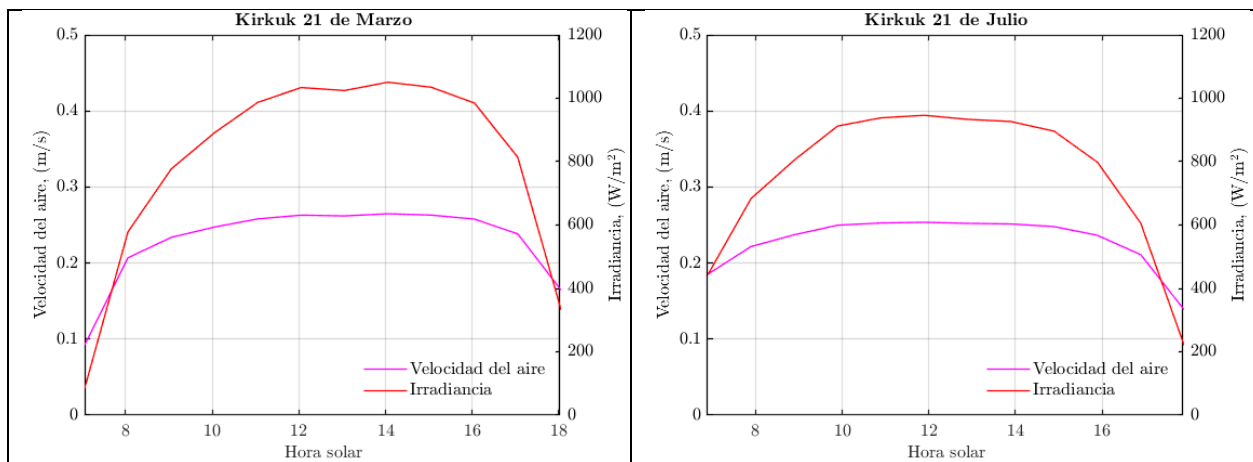


Figura 27 Curvas comparativas de la velocidad del aire e irradiancia según la hora para los días representativos de los meses de marzo y Julio en Kirkuk

7.11 Efecto de la chimenea solar en Bucaramanga.

Para visualizar el efecto de la chimenea en la ciudad de Bucaramanga se tomaron los valores de radiación para los mismos meses, de las bases de datos del *JRC photovoltaic Geographical Information System*, mostrados en el anexo Tabla 13. Para dar evidencia del efecto se compara de igual manera que en el caso de Kirkuk, dos modelos donde en el primer caso se encuentra el panel únicamente expuesto a las condiciones climáticas de Bucaramanga y en el segundo caso se encuentra el panel con la misma chimenea solar cuya configuración fue tomada del caso de estudio.

En la Figura 28 se muestran las curvas del comportamiento de los coeficientes de transferencia e irradiancia en las horas del día. A diferencia de Kirkuk, en Bucaramanga se muestran la presencia de picos, esto debido a la presencia de nubes en el cielo que impiden la llegada de los rayos solares.

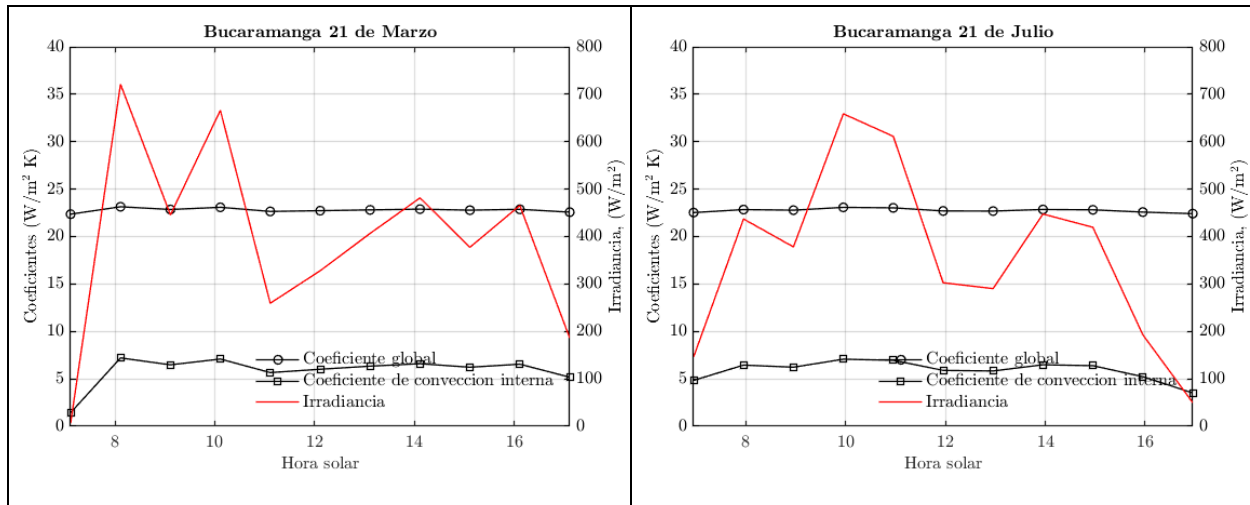


Figura 28 Curvas comparativas del coeficiente de transferencia global, convección interna e irradiancia según la hora del día para los días representativos de los meses de marzo y Julio

Además, se muestran también las curvas del comportamiento de la velocidad del aire vs la irradiancia, a lo largo del día (Figura 29). Una vez más, la presencia de nubes hace que el comportamiento de la irradiancia sea en forma de picos o sierra, como la irradiancia afecta directamente a la velocidad del aire, si la irradiancia crece la velocidad crece, si la irradiancia decrece, la velocidad también disminuye, aunque sus picos no son tan pronunciados como en el comportamiento de la irradiancia.

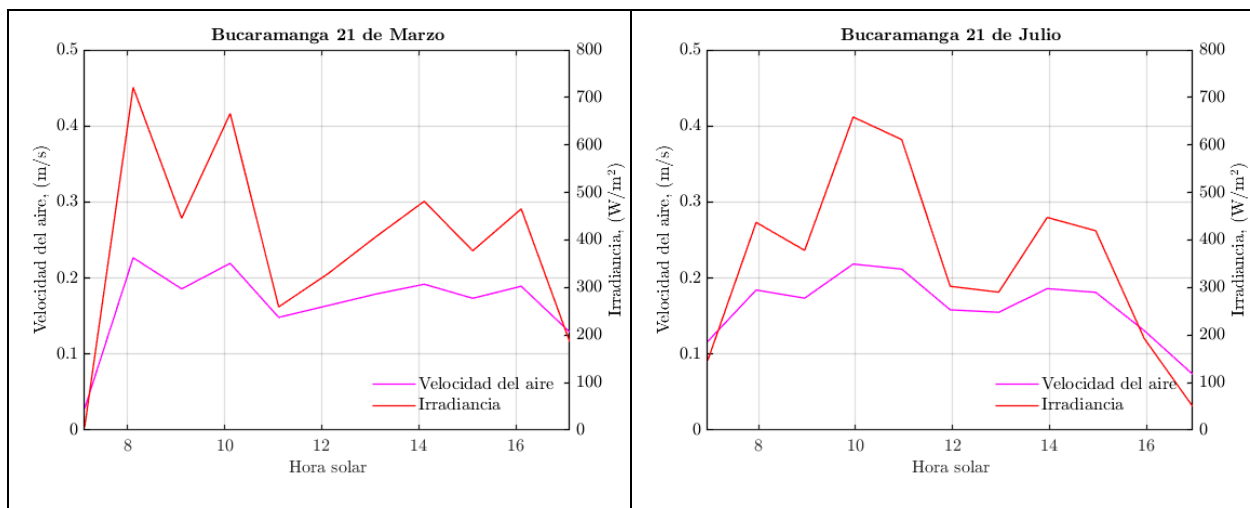


Figura 29 Curvas comparativas de la velocidad del aire e irradiancia según la hora para los días representativos de los meses de marzo y Julio.

En la Figura 30 se observan los perfiles de temperaturas del panel en función del tiempo en horas del día. Los valores de temperatura son el promedio de los resultados de la simulación en las horas del día durante los meses que se realizaron las pruebas experimentales (marzo-Julio).

El valor máximo de temperatura en el primer modelo en donde se encuentra el panel únicamente es de 63 ° Celsius mientras que el valor de la temperatura en el modelo del panel con chimenea se encuentra en 55 ° Celsius.

El efecto de la chimenea se evidencia en el diferencial máximo de temperatura que ocurre en el valor máximo de radiación, con un delta de 8° Celsius alrededor de las 10 a.m. y un decaimiento en el valor del diferencial de temperaturas después de las 3 p.m.

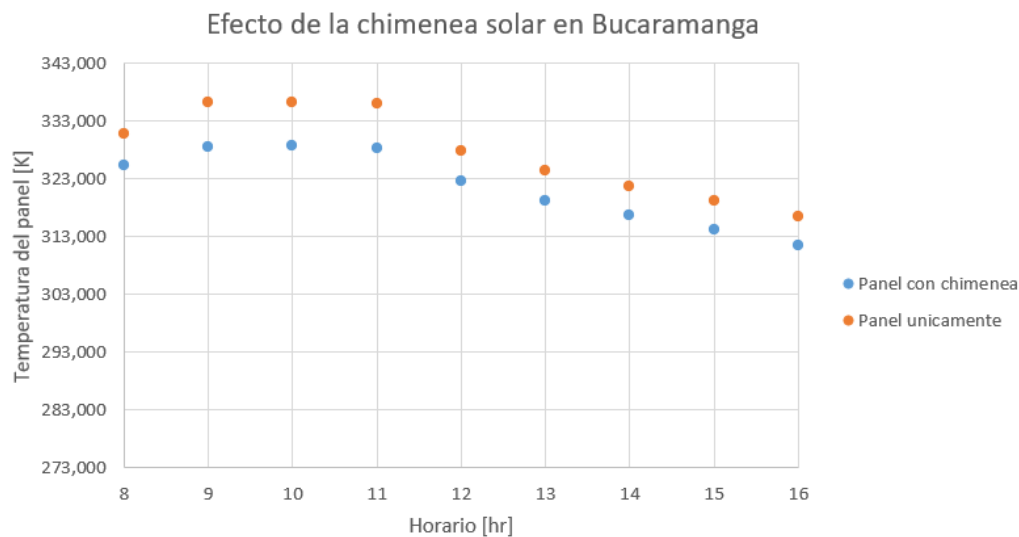


Figura 30 Efecto de la chimenea solar en Bucaramanga, Colombia

Se evalúa de igual manera el desempeño mediante la fórmula de ineficiencia por temperatura de panel para la ciudad de Bucaramanga con las temperaturas máximas obtenidas. Por consiguiente, obtenemos un valor de potencia real suministrada para el primer y segundo caso de 104.4 W y 114W, correspondiente.

8 Conclusiones

Inicialmente se tenía planeada la realización de un proyecto físico que apoyara la parte simulada; sin embargo, debido a las condiciones especiales planteadas por la pandemia covid 19, que obligó a los gobernantes del mundo entero a tomar medidas restrictivas para evitar su propagación e intentar proteger el mayor número posible de vidas humanas; la universidad se vio obligada, también, a tomar medidas restrictivas que nos hicieron replantear objetivos. Como

resultado, nos vimos forzados a omitir la realización de pruebas experimentales con un prototipo físico de la chimenea solar con panel fotovoltaico.

Por los motivos mencionados antes, el proyecto es esencialmente simulado y apoyado en proyectos previos y en pruebas realizadas por el compañero y estudiante de maestría de ingeniería mecánica Omar Andrés Ardila Sánchez, cuyo proyecto consiste en el confort térmico de una habitación mediante el uso de la chimenea solar.

Se realizaron distintas configuraciones para la chimenea solar con base en conclusiones encontradas en la literatura. Entre los parámetros más influyentes en su desempeño se ubican el tiro de la chimenea y el área de entrada de aire. La relación de áreas debe ser igual a 1 porque, de otra manera, se produciría un decaimiento del coeficiente de transferencia, provocando un aumento de temperatura en el panel. En cuanto a composición buscamos materiales de fácil adquisición, optando por el aluminio y el latón. Inicialmente se había elegido el latón por los costos físicos de fabricación, ya que el aluminio resulta más costoso al momento de una construcción física. Sin embargo, al modificar los objetivos y omitir la construcción optamos por el uso de aluminio. Este resulta dando un mejor desempeño comparado al latón, con una mejor transferencia de calor.

En cuanto a la elección del panel, se escoge de tipo policristalino por su amplio rango de tolerancia a altas temperaturas. Sin embargo, la chimenea solar disminuye la temperatura del panel de manera que el uso de un panel tipo monocristalino se puede llevar a cabo. Cabe destacar que el tipo monocristalino tiene mejor rendimiento.

Se realizó la simulación con geometría y condiciones ambientales similares a la propuesta por *New design of solar chimney* (caso de estudio) por (Ahmed and Hussein 2018). Al comparar los resultados de temperatura del panel en las pruebas experimentales, se halla un porcentaje de error menor al 2%, lo cual valida los resultados.

Se encontró que la temperatura del panel depende de diferentes variables, entre las cuales la más significativa es la radiación solar. Las demás variables ambientales, como la velocidad del aire, la temperatura ambiente y la altitud, influyen en un segundo plano. La radiación solar en la ciudad de Kirkuk dentro de los meses de estudio fue de mayor valor en comparación a los de Bucaramanga, lo cual se ve evidenciado en la temperatura del panel, por lo tanto, también su rendimiento se ve afectado.

Al evaluar el efecto de la chimenea solar en la temperatura y en el desempeño del panel se evidencia un aumento de la potencia que entrega el sistema en comparación a la potencia que entregaría si el panel no estuviese configurado a una chimenea solar. Esta diferencia de potencia se puede analizar proyectando a cinco años el uso de un panel fotovoltaico. Si bien al principio la inversión es mayor, el cálculo de la energía suministrada por el panel se ve incrementado. Supongamos que el efecto de la chimenea solar junto con el panel actúa durante ocho horas al día por cinco años, esto equivale a 14600 horas de uso, si la diferencia de potencia entre ambos sistemas (panel +chimenea vs panel únicamente) es de 6 W/h, se estarían desperdiciando 87.600 Watts.

Se encontró, además, que la velocidad del aire variaba dependiente de la radiación solar siguiendo una tendencia: a mayor radiación mayor flujo de aire; como se aprecia en la Figura 54 Velocidad vs radiación. La figura es tomada de los datos experimentales del proyecto de Omar Ardila; sin embargo, para nuestro proyecto se evidencia de una manera diferente. La Figura 24 y Figura 25 muestran velocidades promedio del aire en entrada y salida de la chimenea. Se encontró que la velocidad promedio del aire en la entrada es máxima, alrededor de los 0,02 m/s y la velocidad promedio de la salida es mínima, en torno a 0,015 m/s para un valor de radiación, lo cual se explica el efecto de flotación dentro del recinto de la chimenea. Esto indica claramente que la radiación al aumentar su valor aumenta también la velocidad del aire, la cual incrementa la transferencia de calor disminuyendo así la temperatura del panel.

Al realizar posteriores simulaciones para la ciudad de Bucaramanga, se encontró que, al variar la geometría de la chimenea, variaba el coeficiente de transferencia de calor calculado mediante la herramienta de Matlab y mejoraba el desempeño del panel en función de los cambios geométricos hechos en la chimenea. Se encontró que a mayor altura o tiro de chimenea la temperatura del panel descendía. Sin embargo, a partir de un rango de altura de chimenea, la temperatura de panel apenas variaba. Lo cual desde un punto de vista económico no vale la pena, ya que se está hablando de una altura de 4 m a 6 m, donde la temperatura del panel apenas cambiaba.

Por último, se recomienda buscar modelos futuros en la geometría de la chimenea que satisfagan un óptimo desempeño del panel jugando con los componentes más significativos que son el tiro y el área de succión. A su vez, realizar pruebas físicas que apoyen y aporten a las

simulaciones que se realicen, porque existen variables en el ambiente que no se dan en una simulación. Tal es el caso de una hora nublada que influye de manera negativa en el desempeño de un panel solar. En condiciones más favorables (no pandemia), se debe tener un equipo especializado para la toma de datos, como por ejemplo un piranómetro fotovoltaico o medidor fotovoltaico, herramientas que sirven tanto para la toma de datos como para la medición de la radiación solar real incidente. Dichos equipos son de difícil adquisición, motivo por el cual se tuvo que recurrir al uso de TMY. Se recomienda también el uso de la chimenea solar en proyectos de energía limpia y sustentable para configuraciones a gran escala, en regiones donde la radiación solar y la velocidad del aire es alta.

Referencias Bibliográficas

- 3amper energía renovable. 2017. “La Verdadera Potencia de Los Paneles Solares – 3amper Blog.” *3amperter.Com*. Retrieved September 30, 2020 (<https://3amper.com/blog/2017/06/21/la-verdadera-potencia-de-los-paneles-solares/>).
- AAWP. 2019. “¿De Qué Están Hechos Los Paneles Solares Fotovoltaicos y Térmicos?” *Quetzalingenieria.Es*. Retrieved September 27, 2020 (<https://www.quezalingenieria.es/de-que-estan-hechos-los-paneles-solares/>).
- Ahmed, Omer Khalil, and Abdullah Sabah Hussein. 2018. “New Design of Solar Chimney (Case Study).” Elsevier Ltd.
- Baetu, Georgeta, Carmen-Elena Teleman, Elena Axinte, and Victoria-Elena Roșca. 2013. “Numerical Simulation of Wind Action on a Solar Panels Array for Different Wind Directions.” “Gheorghe Asachi” Technical University of Iași.
- Bansal, N. K., Rajesh Mathur, and M. S. Bhandari. 1993. “Solar Chimney for Enhanced Stack Ventilation.” *Building and Environment* 28(3):373–77.
- Cengel, Yunus, and Ghajar Afshin J. 2004. *Transferencia de Calor y Masa. Fundamentos y Aplicaciones*. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A.
- Cortes, Andrés Bonilla, and Sergio Caceres Paredes. 2014. “Diseño y Construcción de Un Sistema de Calentamiento de Agua Para Uso Residencial Por Energía Solar.”
- Duffie, J. A., and W. A. Beckman. 1991. “Solar Engineering of Thermal Processes / John A. Duffie, William A. Beckman, 2nd Ed.”
- Energético, Cambio. 2017. “¿COMO INFLUYE LA TEMPERATURA EN EL RENDIMIENTO DE TU PLACA SOLAR? ».” *Cambio Energético*. Retrieved October 1, 2021 (<https://www.cambioenergetico.com/blog/influye-la-temperatura-rendimiento-placa-solar/>).
- European Commision. n.d. “JRC Photovoltaic Geographical Information System.” Retrieved (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/).
- Giraldo, Walter, and Carlos A. Herrera. 2017. “Ventilación Pasiva y Confort Térmico En Vivienda de Interés Social En Clima Ecuatorial.” Universidad del valle.

- Haghighat, Siavash, Alibakhsh Kasaeian, Fathollah Pourfayaz, and Bagher Mokhtari Shahdost. 2019. “Fluid Dynamics Analysis for Different Photovoltaic Panel Locations in Solar Chimney.” Elsevier.
- Klimes, Lubomír, Pavel Charvát, and Jiří Hejčík. 2018. “Comparison of the Energy Conversion Efficiency of a Solar Chimney and a Solar PV-Powered Fan for Ventilation Applications.” Brno University of Technology.
- Lauder, B. E., and D. B. Spalding. 1974. “The Numerical Computation of Turbulent Flows.” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 3(2):269–89.
- Mathur, Jyotirmay, N. K. Bansal, Sanjay Mathur, Meenakshi Jain, and Anupma. 2006. “Experimental Investigations on Solar Chimney for Room Ventilation.” *Solar Energy* 80(8):927–35.
- Mathur, Jyotirmay, Sanjay Mathur, and Anupma. 2006. “Summer-Performance of Inclined Roof Solar Chimney for Natural Ventilation.” *Energy and Buildings* 38(10):1156–63.
- Ong, K. S., and C. C. Chow. 2003. “Performance of a Solar Chimney.” *Solar Energy* 74(1):1–17.
- Prieto, José Manuel Álvarez. n.d. “5. Modelo Multidimensional.”
- Saleem, Ahmed Abdeen, Mahmoud Bady, Shinichi Ookawara, and Ali K. Abdel-Rahman. 2016. “Achieving Standard Natural Ventilation Rate of Dwellings in a Hot-Arid Climate Using Solar Chimney.” *Energy and Buildings* 133:360–70.
- Sánchez, Omar Andrés Ardila. 2020. “Modelo Matemático Simplificado de Chimenea Solar.”
- Shi, Long, Guomin Zhang, Wei Yang, Dongmei Huang, Xudong Cheng, and Sujeeva Setunge. 2018. “Determining the Influencing Factors on the Performance of Solar Chimney in Buildings.” Elsevier Ltd.
- Swinbank, W. C. 1963. “Long-Wave Radiation from Clear Skies.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 89(381):339–48.

Apéndices

Apéndices A: Configuración de independencia de malla

En este procedimiento buscamos simular el desempeño de un panel solar cuando está al aire libre sin ninguna ayuda para su ventilación y en el otro caso, cuando es ayudado por una chimenea solar para ayudar a disipar el calor de este.

Geometría

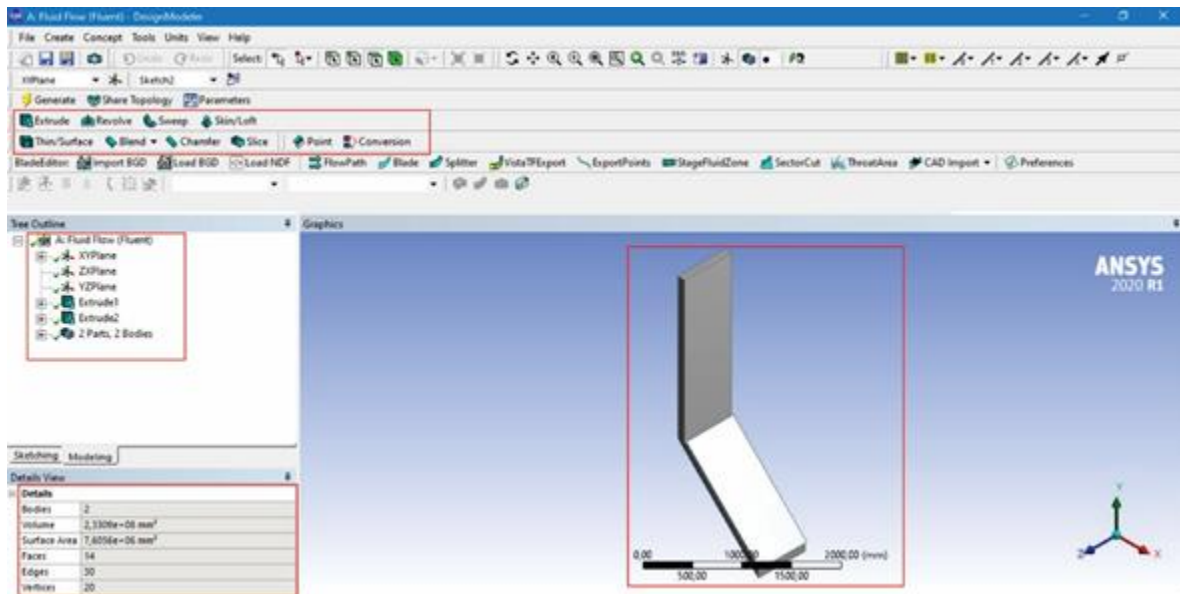


Figura 31 Design modeler

Para realizar el proceso de simulación se debe realizar una geometría de lo que queremos conseguir, en este caso Figura 31, se busca como se dijo anteriormente ver la implicación de la chimenea solar en el desempeño del panel, por ello se crea un sólido de este. Esto se hace mediante la ayuda de la herramienta Geometry de software ansys, en el centro se puede apreciar el sólido que se está construyendo o se construyó, en la sección de herramienta se encontraron las diferentes herramientas para realizar las diferentes operaciones para dicha construcción. En la sección de Tree outline se encontraron las diferentes operaciones que se han realizado y más debajo de esto los detalles del sólido o geometría construida hasta el momento.

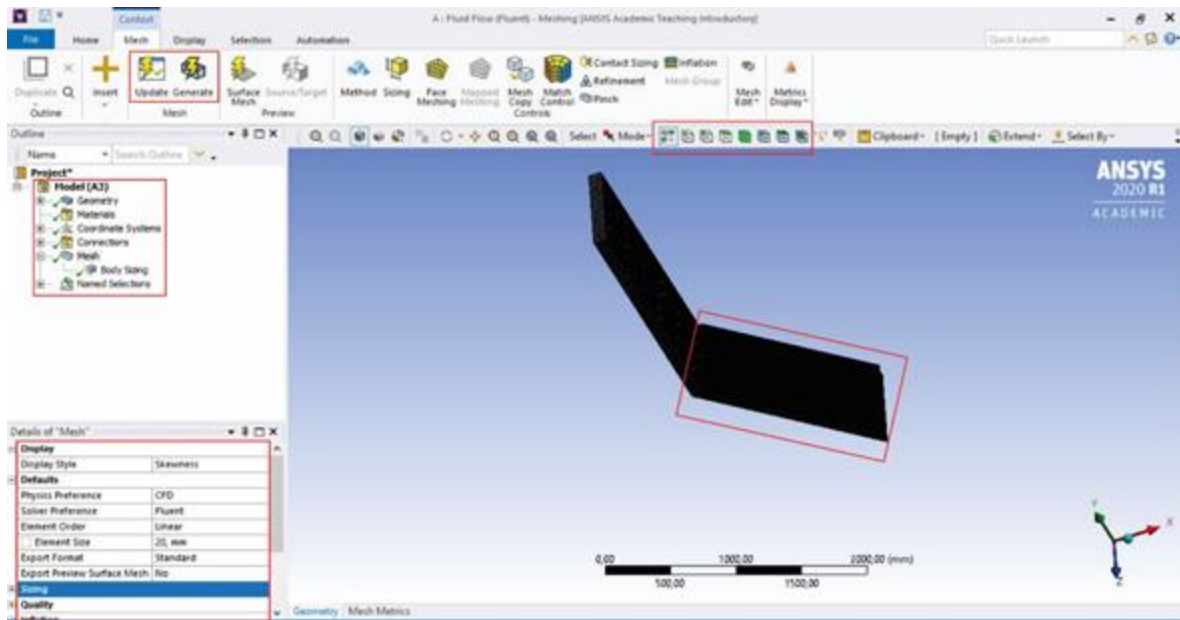


Figura 32 mesh

Ahora se procede a realizar el mallado con la ayuda de la herramienta *mesh*. Aquí lo que se busca es dividir en múltiples secciones el sólido para su correspondiente análisis. Entre menor sea el número de “element size”, mayor será el número de elementos en la malla, esto implica mayor precisión, pero también mayor tiempo de cálculo. En la sección de “details of mesh” se encontró “element size” aquí se pone el tamaño de elemento deseado para la malla, preferencias físicas, el formato y muy importante, la calidad de la malla, siempre buscar calidad buena o mayor a esta. En la parte superior en mesh, se encontró la opción “generate” la cual se clicará, una vez editado las opciones anteriormente nombrada. Al generar la malla, ésta arroja el número de elementos.

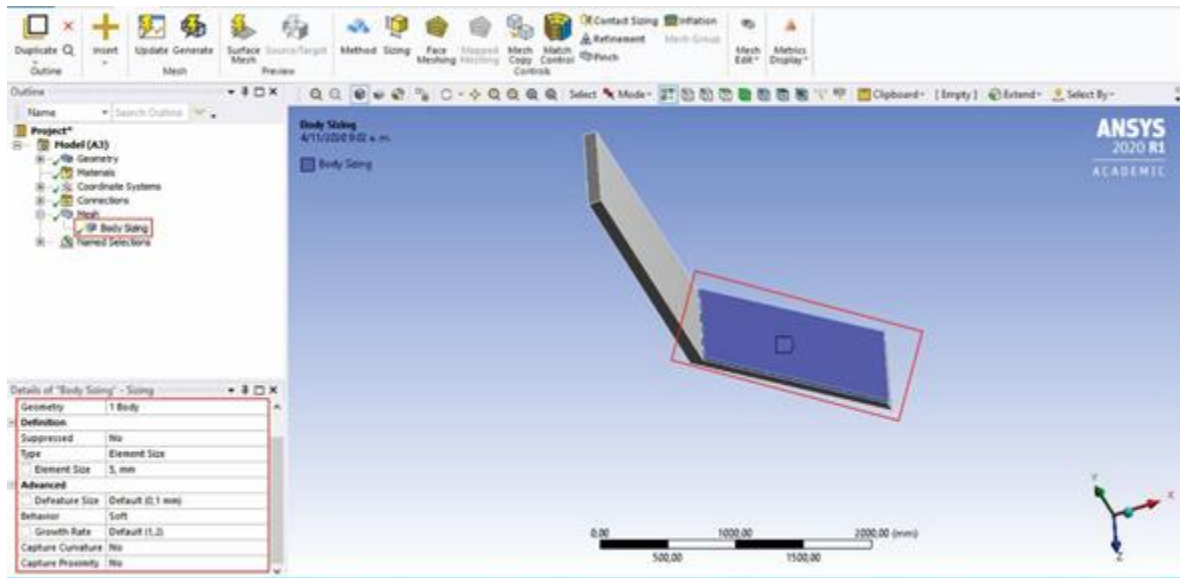


Figura 33 Body sizing

Fluent

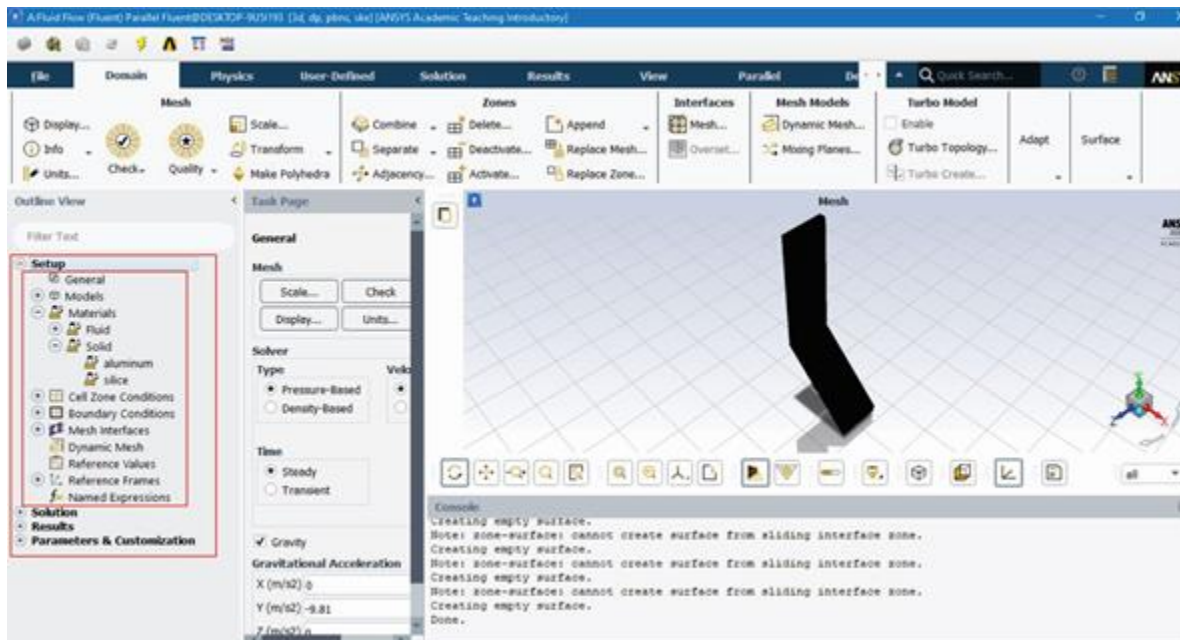


Figura 34 Setup general en fluent

En la Figura 34 se puede observar en el lado izquierdo la zona general donde se configuran los parámetros para la simulación, correspondiente en este caso, a las variables de una chimenea solar y un panel solar, además de las variables físicas del propio entorno.

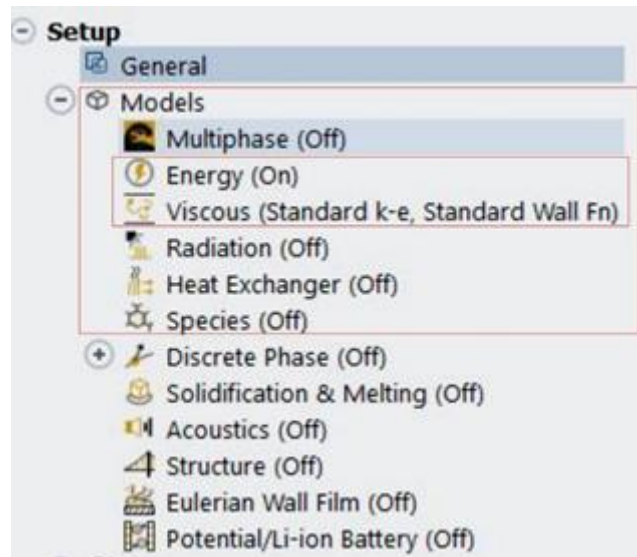


Figura 35 Models

Una vez realizado el mallado se procede a realizar la correspondiente simulación, esto se realiza con la herramienta Fluent. Para este caso las opciones que se habilitan en el menú general son “energy” y “viscous model”



Figura 36 Viscous model

En la Figura 36, se muestra las opciones a editar para puntualmente este tipo de simulación

Materiales

The image shows the 'Create/Edit Materials' dialog box in ANSYS Fluent. The 'Name' field is set to 'air'. The 'Material Type' is set to 'fluid'. The 'Chemical Formula' field is empty. The 'Fluent Fluid Materials' dropdown is set to 'air'. The 'Mixture' dropdown is set to 'none'. The 'Order Materials by' section has 'Name' selected. There are buttons for 'Fluent Database...' and 'User-Defined Database...'. The 'Properties' section is highlighted with a red box and contains the following settings:

Property	Value	Model
Density (kg/m ³)	1.225	boussinesq
Cp (Specific Heat) (j/kg-k)	1006.43	constant
Thermal Conductivity (w/m-k)	0.0242	constant
Viscosity (kg/m-s)	1.7894e-05	constant
Thermal Expansion Coefficient (1/k)	0.0034	constant

At the bottom of the dialog box are buttons for 'Change/Create', 'Delete', 'Close', and 'Help'.

Figura 37 Configuración de fluido: Aire

En la Figura 37 se encuentra las constantes correspondientes a las propiedades del aire

The image shows the 'Create/Edit Materials' dialog box in ANSYS Fluent. The 'Name' field contains 'aluminum', the 'Material Type' is set to 'solid', and the 'Chemical Formula' is 'al'. The 'Fluent Solid Materials' dropdown is set to 'aluminum (al)'. The 'Mixture' dropdown is set to 'none'. The 'Order Materials by' section has 'Name' selected. The 'Properties' section shows constant values for Density (2719 kg/m3), Cp (871 J/kg-k), and Thermal Conductivity (202.4 W/m-k). The 'Change/Create', 'Delete', 'Close', and 'Help' buttons are visible at the bottom.

Property	Value
Density (kg/m3)	2719
Cp (Specific Heat) (J/kg-k)	871
Thermal Conductivity (W/m-k)	202.4

Figura 38 Configuración de solido: Aluminio

En la Figura 38 se encuentran las constantes propiedades físicas correspondientes al aluminio

Create/Edit Materials

Name: silice

Material Type: solid

Chemical Formula: si

Fluent Solid Materials: silice (si)

Mixture: none

Order Materials by: Name Chemical Formula

Fluent Database...

User-Defined Database...

Properties

Density (kg/m3)	constant	Edit...
	2330	
Cp (Specific Heat) (j/kg-k)	constant	Edit...
	712	
Thermal Conductivity (w/m-k)	constant	Edit...
	148	

Change/Create Delete Close Help

Figura 39 Configuración de sólido: Silicio

En la Figura 39 se encuentran las constantes propiedades físicas correspondientes al silicio

Cell conditions

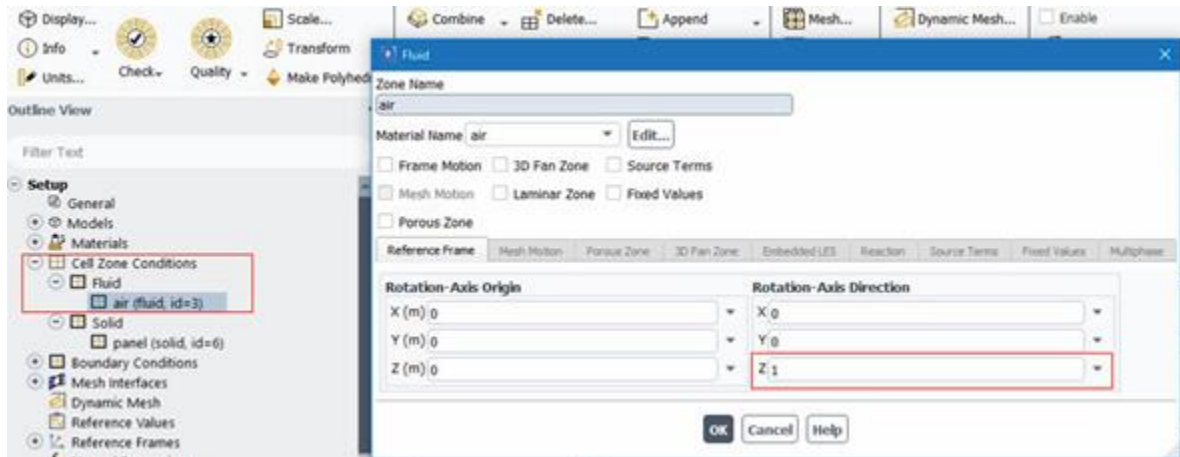


Figura 40 Configuración para celdas: Aire

En la Figura 40 se observa la configuración para la zona de celda, en este caso el aire, el cual se mueve en la dirección del eje z+

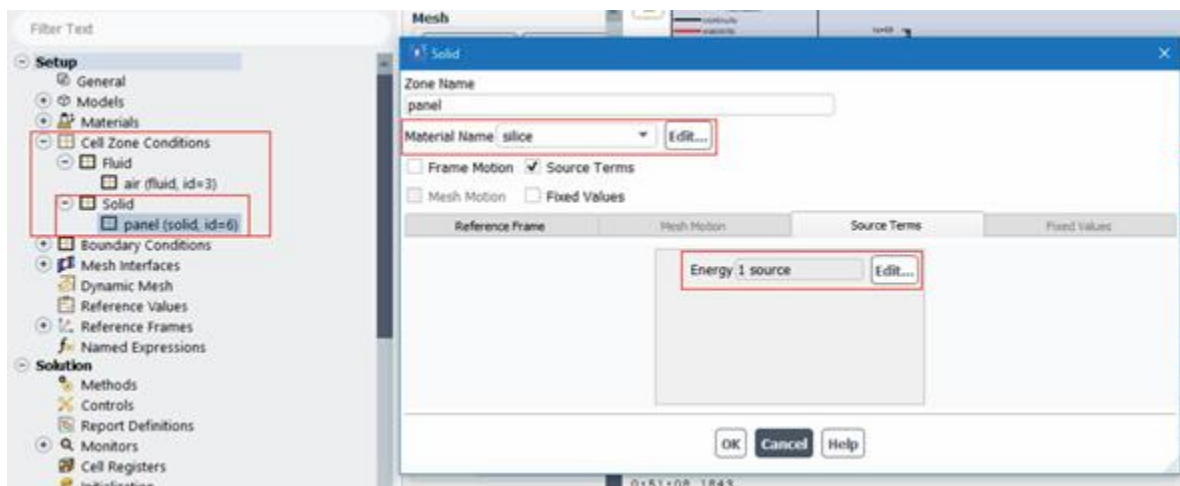


Figura 41 Configuración para celdas: Panel solar

En la Figura 41 se observa la configuración de panel, para este caso se activa la pestaña de fuente térmica, en este caso el sol alimenta al panel solar, en la ventana de “energy” se dan los valores de entrada en W/m^3 (sacados de la TMY)

Boundary conditions

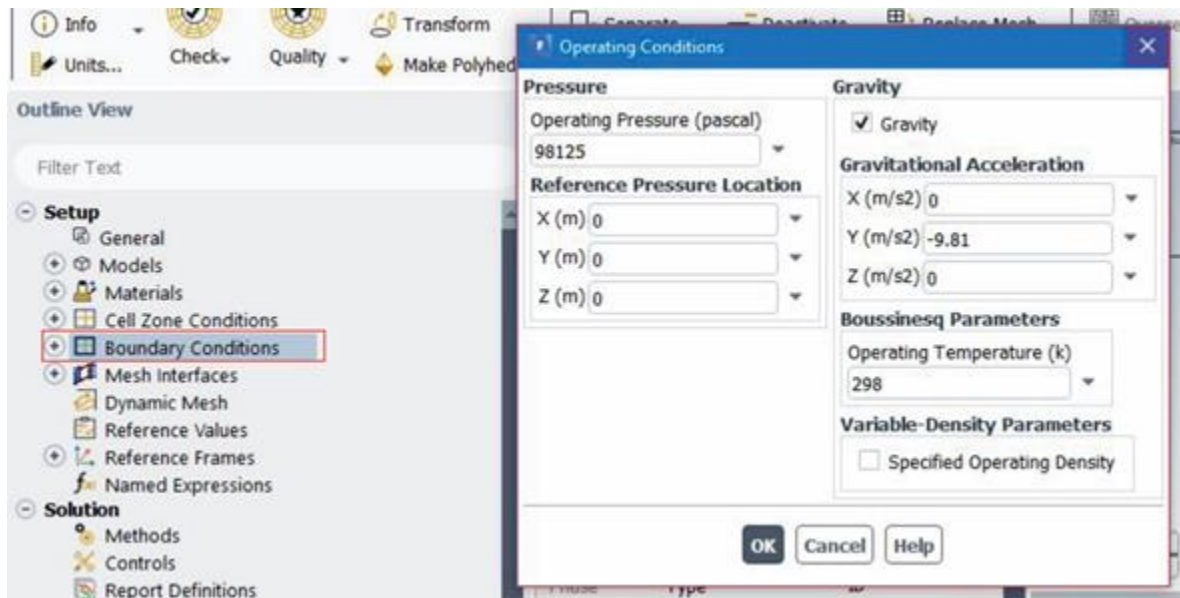


Figura 42 Operating conditions

En boundary conditions, se debe editar los parámetros de operación en “operating conditions” tal como se muestra en la Figura 42, como se observa se trabaja con una temperatura ambiente de alrededor 25°C buscando simular el ambiente de la localización donde opera el panel y chimenea.

Cell conditions

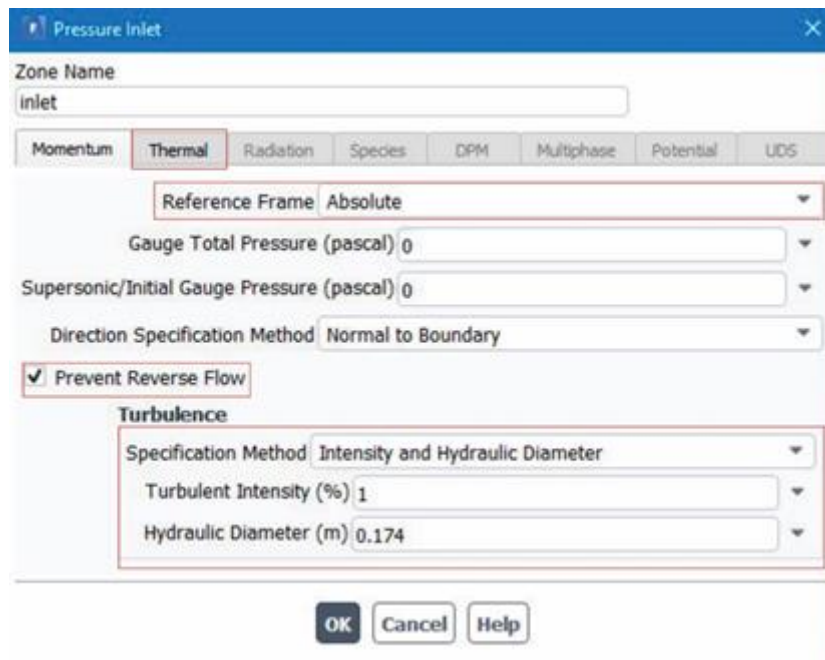


Figura 43 Inlet: entrada de la chimenea

En la entrada “inlet” de la chimenea, Figura 43, el método especificado para trabajar es “intensity and diameter hydraulic” pues bien se trabaja con un 1% de intensidad en turbulencia y con un diámetro calculado basado en la geometría de la chimenea. Se selecciona la opción “prevent reverse flow” esto para prevenir flujo de retorno, en la pestaña thermal se usa 298 K para simular la temperatura ambiente promedio del lugar.

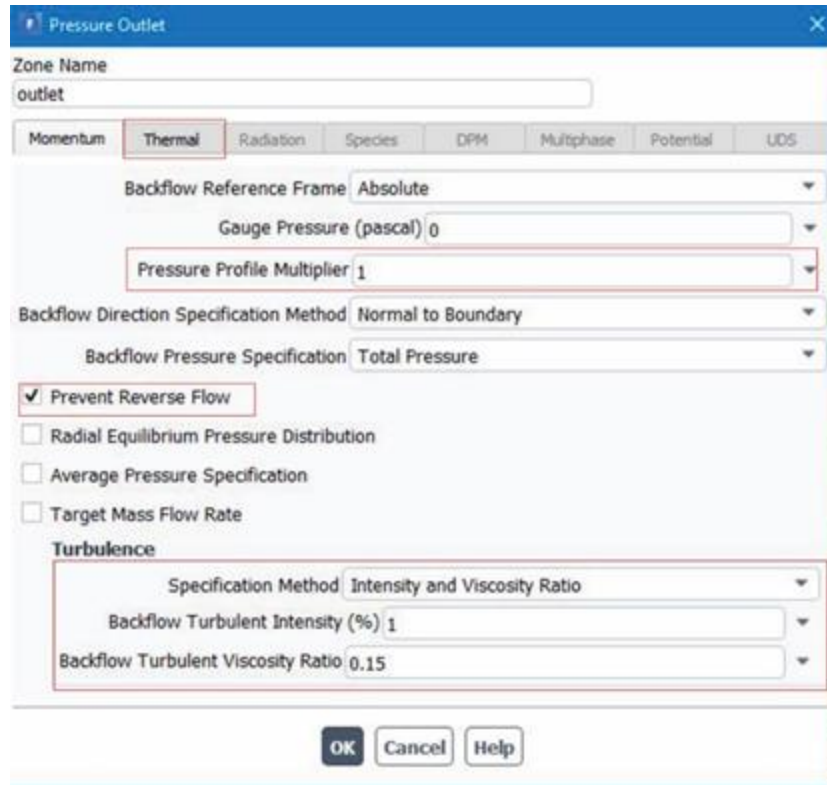


Figura 44 Outlet: salida de la chimenea

En “outlet” salida de la chimenea se configura de manera similar a “inlet” se configura tal cual como la Figura 44 en thermal una vez más se usan 298 k.

Thermal conditions

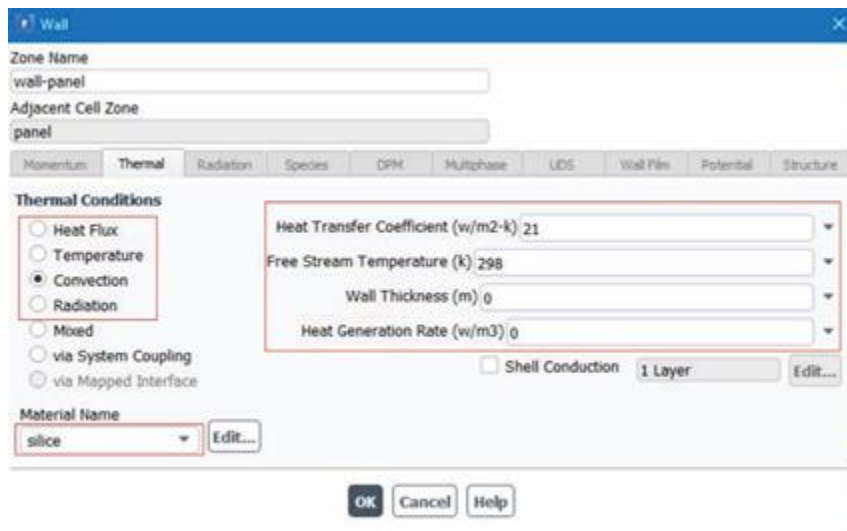


Figura 45 Wall panel

En el caso del panel existen varios parámetros (heat flux, temperature, convection, etc). En heat flux, dado que la radiación es una fuente de calor el número aquí es “0”, en temperatura, de nuevo 298 k, radiation lo dejamos tal cual. Ahora bien, en convection existen como vemos en la Figura 45 varias opciones, en corriente de temperatura se pone la de ambiente. El parámetro variable aquí será el coeficiente de transferencia de calor, este valor es un valor de entrada, pero dependiente de otras variables, para calcular este valor se realizó un programa en Matlab con el cuál simular las condiciones de la situación-problema y conseguir el valor del coeficiente de transferencia de calor. En el material del que está hecho el panel, se usa silicio.

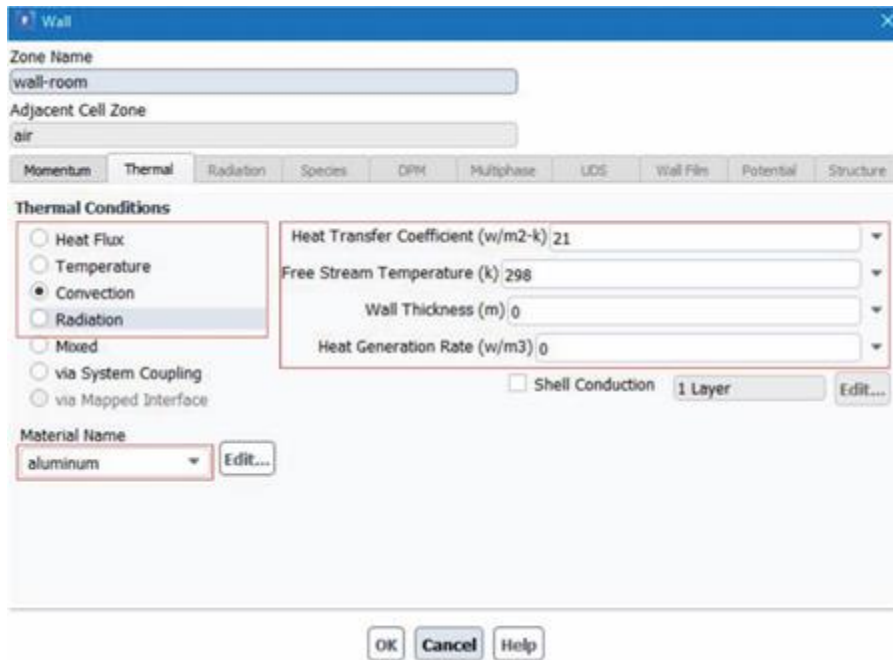


Figura 46 Wall room

Caso similar a “Wall panel” el valor del coeficiente de transferencia de calor también se saca del programa creado en Matlab. A diferencia del panel, el material del recinto de la chimenea es aluminio.

Methods

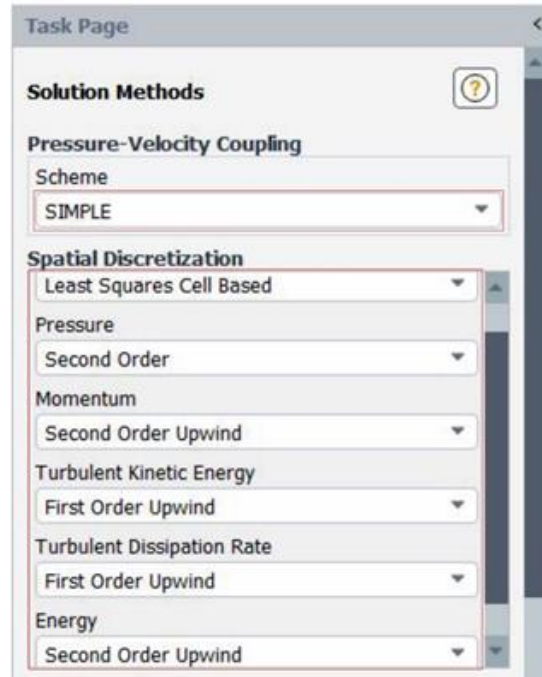


Figura 47 Solution Methods

En la configuración de la ventana de “methods” se usa una configuración como la apreciada en la Figura 47.

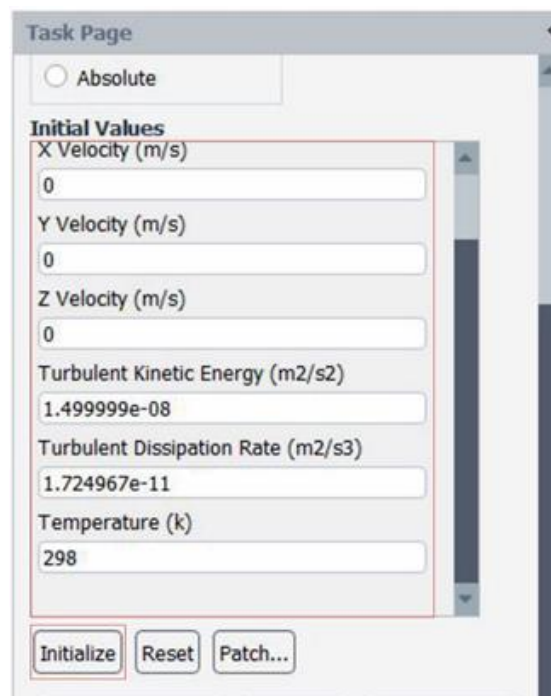


Figura 48 Initialize

Al inicializar la simulación en la ventana “initialize” se ajustan ciertos parámetros, para este problema, se ajustan tal cual como la Figura 48

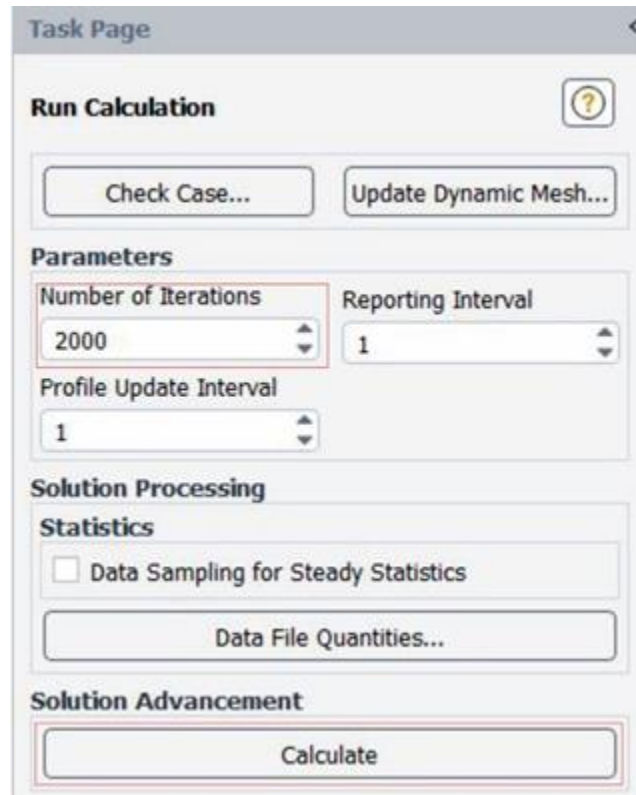


Figura 49 Run calculation

Hecho el paso anterior, se procede a calcular en “calculate”, se pueden configurar el número de iteraciones, así como cuantos reportes se desean en la ventana de comandos.

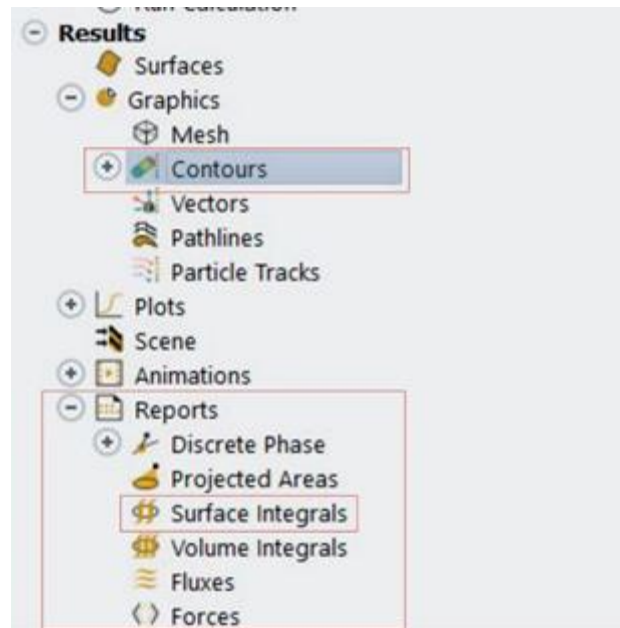


Figura 50 Results

En la ventana de “results” podemos apreciar los resultados de la simulación, en “graphics” podemos apreciar los contornos del sólido, como fue afectado según las variables que queramos observar, como las zonas de calor o temperatura, velocidad, etc. Pero para nuestro análisis lo más importante será la opción “Surface “

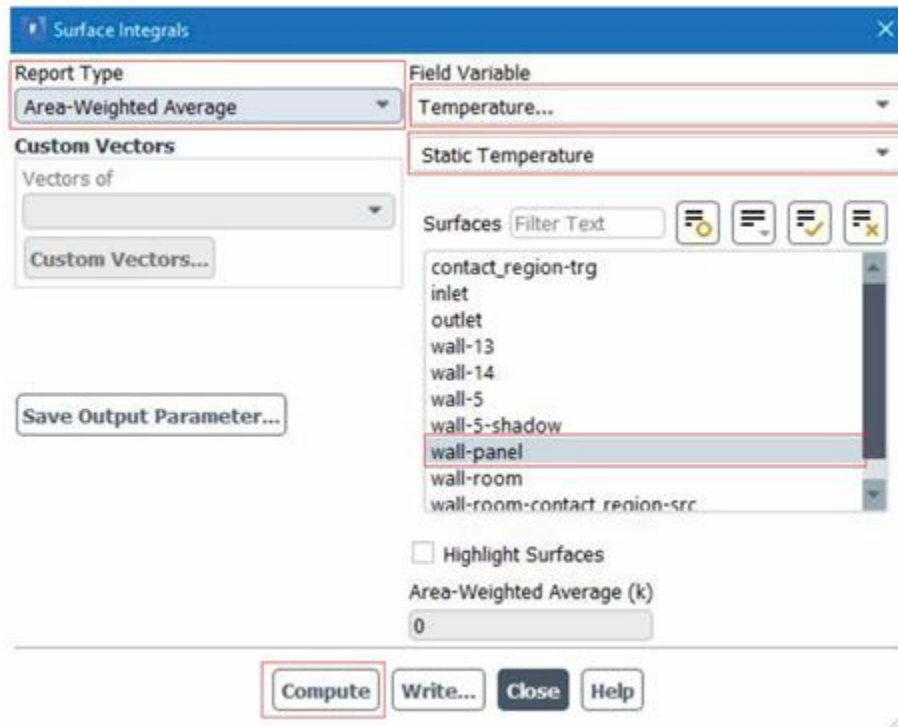


Figura 51 Report Surface

En la ventana Surface se puede seleccionar las diferentes secciones de nuestro sólido, para el análisis correspondiente el que interesa es el panel, por tanto, se selección “Wall panel”, el tipo de reporte deseado es el de temperatura promedio, por lo cual se selección la opción “area weighted average” y computamos los resultados.

Apéndices B: Tablas de radiación directa, difusa y reflejada para las ciudades de Kirkuk y Bucaramanga

Tabla 12 Promedio por horas de Radiación normal directa en wh/m^2 en Kirkuk

marzo				
Hora	Radiación directa	Radiación difusa	Radiación reflejada	WS10m
8	333,00	177,91	16,52	0,72
9	446,89	240,24	19,57	0,32
10	527,94	255,38	15,05	1,05
11	640,38	208,36	6,75	1,78
12	718,08	154,75	0,49	2,51
13	696,71	173,14	1,92	2,91
14	716,18	175,36	10,26	3,30
15	684,96	199,90	19,25	3,70

16	643,47	201,03	22,87	3,58
17	520,15	180,49	17,55	3,47
Abril				
	Radiación directa	Radiación difusa	Radiación reflejada	WS10m
8	594,140	207,880	22,290	1,490
9	722,940	202,830	21,160	1,210
10	728,350	217,420	13,500	1,380
11	776,230	192,050	4,880	1,550
12	769,010	195,220	0,130	1,720
13	771,840	198,110	2,430	1,880
14	780,030	199,210	10,450	2,040
15	742,020	216,960	19,240	2,190
16	336,350	276,530	19,450	1,890
17	563,020	203,390	20,790	1,590
Mayo				
	Radiación directa	Radiación difusa	Radiación reflejada	WS10m
8	662,19	202,77	22,77	1,6
9	718,44	217,52	19,28	1,39
10	778,52	205,76	11,82	2,01
11	770,93	216,86	3,93	2,63
12	794,54	205,12	0,07	3,24
13	795,56	206,88	2,29	3,66
14	845,94	178,07	9,67	4,07
15	800,37	197,91	18,12	4,48
16	685,13	227,06	22,97	4,28
17	605,85	205,85	22,31	4,07
junio				
	Radiación directa	Radiación difusa	Radiación reflejada	WS10m
8	722,58	172,93	22,97	5,34
9	782,47	179,3	19,45	5,99
10	816,62	179,11	12,01	5,41
11	809,94	190,77	4,25	4,84
12	805,25	196,26	0,16	4,26
13	806,4	198,9	1,76	3,97
14	797,08	205,17	8,28	3,67
15	756,48	218,82	16,36	3,38
16	747,06	201,23	22,56	3,48
17	639,13	200,51	22,84	3,58

julio				
	Radiación directa	Radiación difusa	Radiación reflejada	WS10m
8	615,33	203,56	22,16	1,64
9	651,93	235,14	19,5	1,43
10	753,71	211,56	12,96	1,61
11	750,01	222,79	4,93	1,78
12	746,24	228,54	0,29	1,96
13	719,1	247,81	1,47	2,28
14	741,49	233,74	7,9	2,59
15	760,26	217,11	16,47	2,91
16	721,34	214,77	22,58	3,29
17	637,37	204,18	22,95	3,67

WS10 corresponde a la velocidad del viento a 10 metros de distancia

Tabla 13 Promedio por horas de Radiación normal directa en wh/m^2 en Bucaramanga

marzo				
Hora	Radiación directa	Radiación difusa	Radiación reflejada	WS10m
8	560,46	227,51	22,38	0,89
9	118	364,76	14,24	1,24
10	12,74	705,6	10,45	1,59
11	54,92	225,78	0,99	1,95
12	24	330	0	2,32
13	161,51	280,01	1,49	2,69
14	160,64	361,55	6,88	2,33
15	123,26	285,93	11,68	1,96
16	226,48	279,51	19,59	1,6
17	123,53	79,01	8,52	1,23

abril				
	Radiación directa	Radiación difusa	Radiación reflejada	WS10m
8	52,96	175,94	10,95	0.78
9	144,13	354,4	12,44	0.74
10	150,85	431,98	6,45	0.69
11	182,41	442,25	1,5	1.22
12	193,13	457,96	0,04	1.76
13	80,45	500,31	2,51	2.29
14	179,56	167,73	4,81	1.89
15	30,39	154,56	6,18	1.48
16	140,36	91,29	8,66	1.08

17	358,58	138,26	12,98	1.04
mayo				
	Radiación directa	Radiación difusa	Radiación reflejada	WS10m
8	521,49	145,75	17,34	0,91
9	202,02	244,29	15,68	0,97
10	271,98	155,44	8,73	1,02
11	814,1	152,33	8,99	1,08
12	142,01	405,04	1,16	1,1
13	37,04	350,84	0,04	1,12
14	40,8	644,68	3,08	1,14
15	19,95	271,95	4,57	1,19
16	736,56	238,07	21,38	1,24
17	0	11,9	0,82	1,28
junio				
	Radiación directa	Radiación difusa	Radiación reflejada	WS10m
8	732,2	117,43	21,56	1,15
9	171,35	545,73	17,58	1,3
10	850,54	524,52	13,69	1,45
11	16,42	285,56	0,77	1,37
12	14	311,95	0,01	1,3
13	378,23	168,4	2	1,23
14	1,16	67,13	0,99	1,45
15	51,91	282,11	10,2	1,68
16	0	135,36	8,69	1,9
17	102,88	81,36	8,47	1,43
Julio				
	Radiación directa	Radiación difusa	Radiación reflejada	WS10m
8	597,52	149,29	19,83	0,99
9	574,98	26,8	11,94	1,17
10	472,62	370,42	9,38	1,35
11	67,03	609,07	2,06	1,66
12	68	275	0	1,98
13	36,19	285,87	1,07	2,29
14	225,7	319,38	6,6	1,73
15	160,44	344,77	13,24	1,18
16	93,1	156,23	10,85	0,62
17	50,97	41,73	4,87	0,71

WS10 corresponde a la velocidad del viento a 10 metros de distancia

Apéndices C: Diagramas de flujo de Independencia de Malla y método SIMPLE

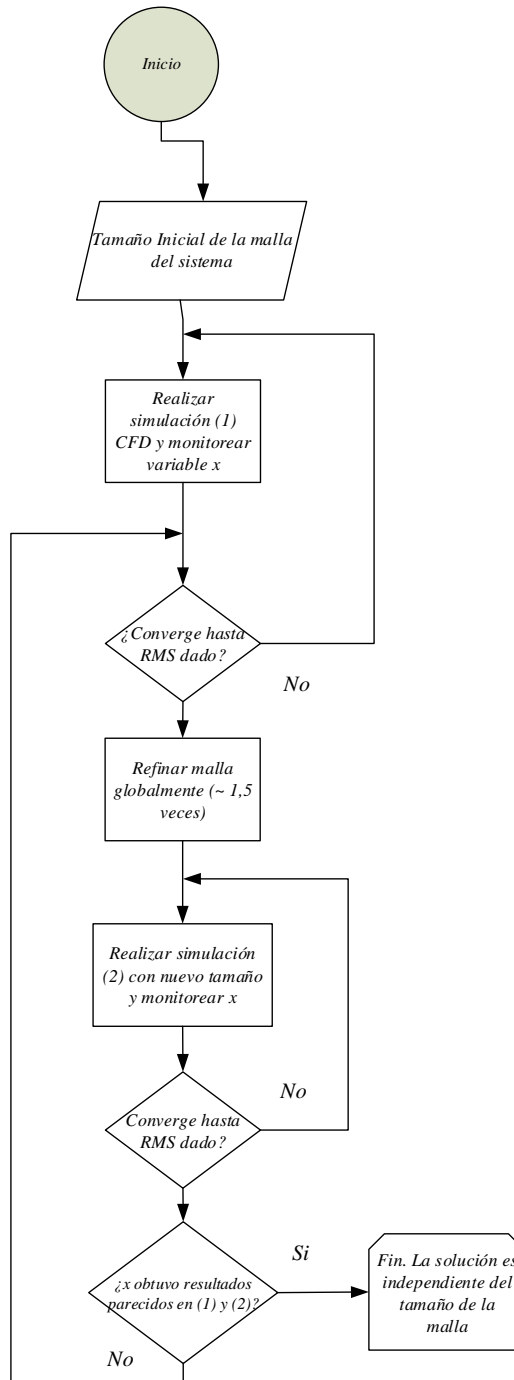


Figura 52 Diagrama de flujo de independencia de malla
Nota: Adaptado de Prieto, Natalia.

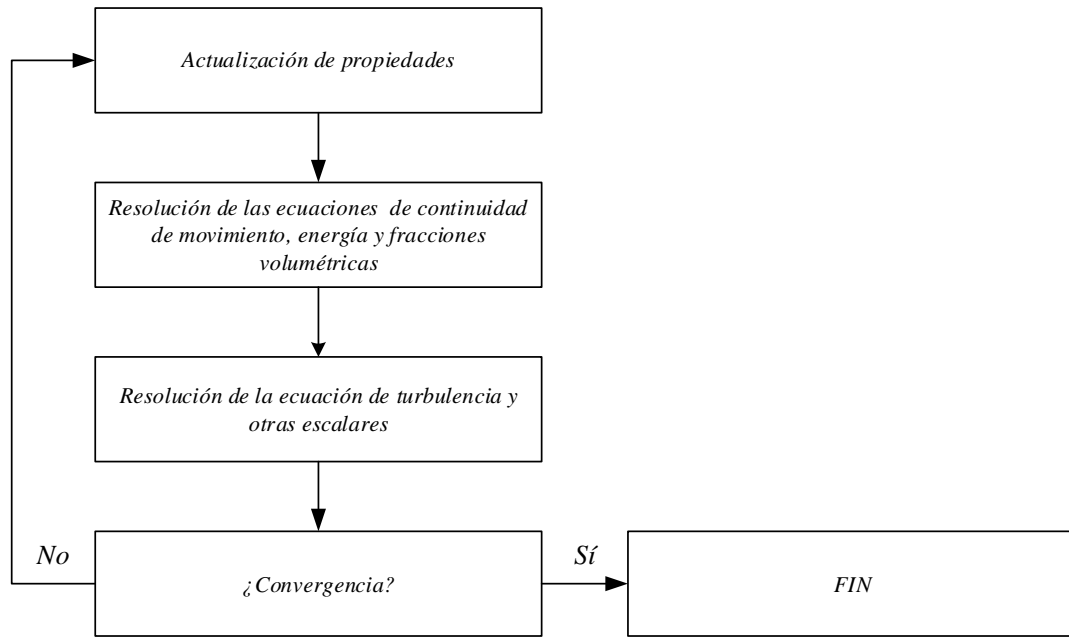


Fig 53 Diagrama de flujo solución Segregado SIMPLE

(Ansys)

Apéndices D: Comportamiento de la velocidad media vs radiación en ensayo de laboratorio

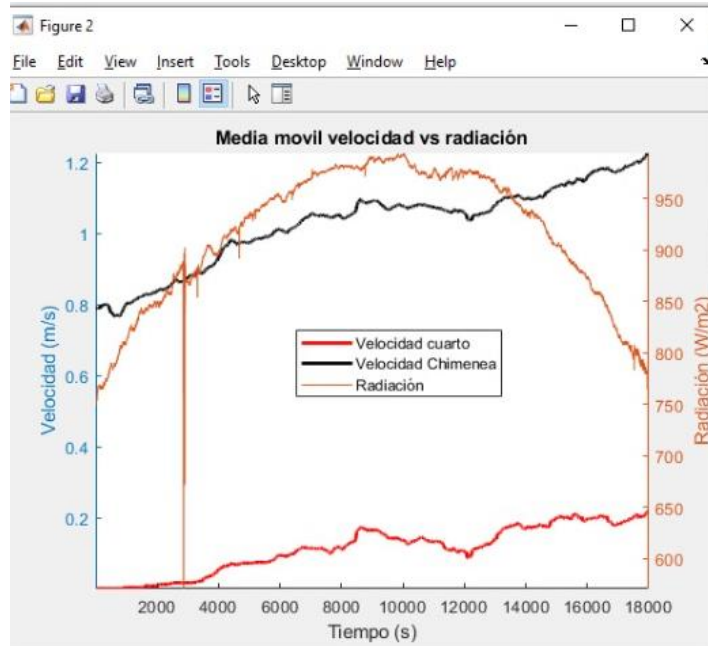


Figura 54 Velocidad vs radiación

Nota: adaptado de Pruebas de Laboratorio por Ardila Sánchez, Omar

Apéndices E: Código Matlab Cálculo modelo q_{sb}

```
close all
clear
clc
```

PARÁMETROS DE ENTRADA

```
phi=35; % Latitud local (deg)
LSM=44; % Meridiano estándar - WEST (deg)
(es el que define la hora del país)
LON=44.01; % Meridiano local (deg)
n=80; % Día del año
beta=35; % Ángulo de inclinación del panel
(deg) % Azimuth solar (deg)
rho=0.2; % Reflectividad del medio ambiente en el
sitio de estudio (adimensional)
H_b=333; % Radiación solar directa medida en un
plano horizontal (W/m^2)
H_d=177.96; % Radiación solar difusa medida en
un plano horizontal (W/m2)

H=H_b+H_d; % Radiación solar global medida en
un plano horizontal (W/m^2)
```

GEOMETRÍA SOLAR

```
GAMA=360*((n-1)/(365)); % Factor para calcular la declinación
ET=2.2918*(0.0075+0.1868*cos(GAMA)-3.2077*sin(GAMA)-1.4615*cos(2*GAMA)-
4.089*sin(2*GAMA)); % (min) Ecuación del tiempo.
%LST=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24]; % Hora local
estándar
LST=12;
solar_time=LST+(ET/60)+(LSM-LON)/15; % Hora solar
DELTA=0.3963723-22.9132745*cosd(GAMA)+4.0254304*sind(GAMA)...
-0.387205*cosd(2*GAMA)+0.05196728*sind(2*GAMA)...
-0.1545267*cosd(3*GAMA)+0.08479777*sind(3*GAMA); % Declinación
solar para el día del año seleccionado

w=15*((solar_time)-12); % Angulo horario
sin_ALFA=cosd(phi)*cosd(DELTA)*cosd(w)+sind(phi)*sind(DELTA); % Seno del ángulo de
altitud del sol (deg)
ALFA=asind(sin_ALFA); % Angulo de altitud del sol
theta_z=90-ALFA; % Angulo cenital

cos_theta=sind(DELTA)*sind(phi-beta)+cosd(DELTA)*cosd(phi-beta)*cosd(w); % Coseno del
ángulo de incidencia
theta=acosd(cos_theta); % ángulo de incidencia
```

CALCULO DEL q_{sb}

```
qsb=H_b*(cosd(theta)/cosd(theta_z))+H_d*(cosd(beta/2))^2+H*rho*(sind(beta/2))^2    %  
Irradiancia (W/m^2)
```