



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

ESCUELA DE ESTUDIOS SUPERIORES DE YECAPIXTLA

INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA DE UNA CHIMENEA SOLAR

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ROBÓTICA Y SISTEMAS DE MANUFACTURA
INDUSTRIAL**

P R E S E N T A:

ADRIAN GARCÍA LUNA

DIRECTOR DE TESIS: DR. ÁNGEL TLATELPA BECERRO

YECAPIXTLA, MORELOS, AGOSTO 2022



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS



ESCUELA DE ESTUDIOS SUPERIORES DE YECAPIXTLA

DIRECCIÓN

Yecapixtla, Morelos, 09 de agosto de 2022
EESY/238/2022
Asunto: Aprobación de tesis

C. GARCÍA LUNA ADRIAN

PRESENTE

Por este conducto, le notifico que su tesis de Ingeniería titulada: **INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA DE UNA CHIMENEA SOLAR** fue aprobada en su totalidad por el jurado revisor y examinador integrado por los ciudadanos:

NOMBRE	FIRMA
Mtro. Guillermo Raúl Carbajal Pérez	
Dr. Félix David Olivos Juárez	
Mtro. Samuel Portillo Contreras	
Dr. José María Servín Olivares	
Mtro. Julio Pérez Machorro	

Por consiguiente, se autoriza a editar la presentación definitiva de su trabajo de investigación para culminar en la defensa oral del mismo.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial y atento saludo.

Atentamente
Por una humanidad culta
Una universidad de excelencia

M. en E.M. GUILLERMO RAÚL CARBAJAL PÉREZ
Director de la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla



C.c.p. Archivo
C.c.p. jurado revisor

Av. Félix Árias s/n, Quinta Sección de los Amates, Yecapixtla, Morelos, México, 62820
Tel. 777 3297156 / (731) 3 57 50 10 eesyecapixtla@uaem.mx



Una universidad de excelencia

RECTORIA
2017-2023

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad de concluir este trabajo de tesis.

Al Dr. Ángel Tlatelpa Becerro quien fue mi asesor, por toda la confianza, tiempo y paciencia brindada durante este trayecto.

A la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla (EESY) por haberme brindado asilo y me ha formado de manera humana a través de sus profesores.

Al jurado revisor de mi tesis: Dr. Félix David Olivos Juárez, MTRO. Guillermo Raúl Carbajal Pérez, Dr. José María Servín Olivares, MTRO. Samuel Portillo Contreras, MTRO. Julio Pérez Machorro, por su valioso tiempo dedicado a este trabajo y por sus oportunos consejos brindados.

A mis compañeros tesisistas y amigos: Benjamín, José de Jesús e Irvin, por el apoyo y acompañamiento brindado durante este proceso.

DEDICATORIA

Este logro tan grande lo dedico a:

A mis padres **Esteban García Mena** y **Yolanda Luna Mena**, por haberme apoyado incondicionalmente durante este proceso.

A mi hermano mayor **Alejandro García Luna** con quien he compartido momentos buenos y algunos malos y siempre ha estado apoyándome.

A mi pequeña hija **Alice Yexalén García Franco** quien llegó en un momento inesperado, pero fue motivo suficiente para poder llegar a completar este logro.

A mi amada esposa **Yesenia Franco Torres**, quien me brindó su apoyo y motivación para poder culminar mis estudios y este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE	Pág.
ÍNDICE GENERAL.....	5
ÍNDICE DE CUADROS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
1 INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Importancia	11
1.2 Estado del arte	13
1.2.1 Estudios teóricos	13
1.2.2 Estudios teóricos-experimentales	16
1.2.2 Estudios experimentales	18
2 ANTECEDENTES	20
3 OBJETIVOS.....	22
3.1 General.....	22
3.2 Específicos	22
4 HIPÓTESIS.....	22
5 MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
5.1 Chimenea solar.....	23
FIGURA	23
5.2 Modelo físico de la chimenea solar.....	24
Figura 5.2. Modelo físico de la chimenea solar por secciones.....	24
Figura 5.3. Elementos de la chimenea solar.	25
5.3 Geometría de la chimenea solar	26
Figura 5.4. Geometría de la chimenea solar.	26
5.4 Instrumentación de la chimenea solar.....	27
Figura 5.5. a) distribución de los sensores de temperatura en los elementos de la chimenea solar. b) Placa de desarrollo con microcontrolador ATmega 2560 para la adquisición y registro de datos.	27
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
6.1 Construcción de la chimenea solar	28
Figura 6.1. Materiales de construcción de la chimenea solar.....	29
Figura 6.2. Chimenea solar experimental	29
6.2 Instrumentación electrónica de la chimenea solar.....	30
6.2.1 Comunicación LabVIEW y microcontrolador.....	30

6.2.2 Instrumentación electrónica	30
6.3 Medición de las condiciones ambientales	31
Figura 6.4. Radiación solar en orientación Este y Oeste para el 24 de noviembre del 2021. También se presenta la temperatura ambiente del aire.	32
6.4 Resultados de temperaturas de los elementos	33
6.4.1 Temperatura de las cubiertas de vidrio	33
Figura 6.5. Temperaturas de las cubiertas de vidrio.....	33
Tabla 1. Temperaturas de las cubiertas de vidrio.....	34
6.4.2 Temperatura del flujo de aire en las tres cavidades	35
Figura 6.6. Temperaturas del flujo de aire de las tres cavidades.....	35
Tabla 2. Temperaturas de los flujos de aire en las cavidades.....	36
6.4.3 Temperaturas de las placas metálicas	37
Figura 6.7. Temperaturas de las placas metálicas.....	37
Tabla 3. Temperaturas de las placas metálicas	38
Tabla 4. Comparación entre modelo simulado versus experimental.	39
6.5 Discusión	40
Tabla 5. Conversión de flujo másico a volumétrico.....	40
Tabla 6. Valores de Caudales de Aire externo, para ventilación general de stintos tipos de ocupación, de acuerdo con nivel de ocupación por defecto de ASHRAE Estándar 62.1 2019.....	41
Tabla 7. Número de ocupantes en base al caudal promedio.	42
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	43
7.1 CONCLUSIONES	43
7.2 RECOMENDACIONES	44
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

ÍNDICE DE CUADROS

Pág.

Tabla 1.	Temperaturas de las cubiertas de vidrio	34
Tabla 2.	Temperaturas de los flujos de aire en las cavidades.....	36
Tabla 3.	Temperaturas de las placas metálicas	38
Tabla 4.	Comparación entre modelo simulado versus experimental.....	39
Tabla 5.	Conversión de flujo másico a volumétrico.....	40
Tabla 6.	Valores de Caudales de Aire externo, para ventilación general de distintos tipos de ocupación, de acuerdo con nivel de ocupación por defecto de ASHRAE Estándar 62.1 2019.....	41
Tabla 7.	Número de ocupantes en base al caudal promedio.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA	23
Figura 5.2. Modelo físico de la chimenea solar por secciones.....	24
Figura 5.3. Elementos de la chimenea solar.	25
Figura 5.4. Geometría de la chimenea solar.	26
Figura 5.5. a) distribución de los sensores de temperatura en los elementos de la chimenea solar. b) Placa de desarrollo con microcontrolador ATmega 2560 para la adquisición y registro de datos.	27
Figura 6.1. Materiales de construcción de la chimenea solar.....	29
Figura 6.2. Chimenea solar experimental	29
Figura 6.4. Radiación solar en orientación Este y Oeste para el 24 de noviembre del 2021. También se presenta la temperatura ambiente del aire.	32
Figura 6.5. Temperaturas de las cubiertas de vidrio.....	33
Figura 6.6. Temperaturas del flujo de aire de las tres cavidades.....	35
Figura 6.7. Temperaturas de las placas metálicas.....	37

RESUMEN

En este trabajo de tesis, se presenta un estudio experimental de una chimenea solar de uso diurno para aplicaciones de ventilación natural y confort térmico. El sistema está compuesto por dos placas metálicas pintadas de color negro mate que absorben energía, ubicadas entre dos cubiertas de vidrio, que, a su vez forman tres cavidades simétricas.

La construcción de la chimenea solar, se realiza en la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla. Los materiales para su construcción se consideran de acero dúctil para las placas metálicas, con un espesor de aproximadamente 2 mm. Las cubiertas de vidrio se consideran de 6 mm de espesor. La estructura es de metal, mientras que la entrada al flujo de aire se considera con una cubierta de madera para evitar ganancia de energía al paso del flujo de aire, el color de las cubiertas de vidrio es claro, las placas se consideran de color negro mate para absorber la mayor cantidad de radiación emitida por el sol, la orientación de la chimenea solar se considera con orientación Este-Oeste con dirección a las placas metálicas. Para evitar un flujo invertido, se considera una cubierta en la parte superior de vidrio.

La chimenea se instrumenta electrónicamente con sensores de temperatura para cada elemento de la chimenea, mientras que, para la medición del flujo de aire, se usan anemómetros digitales. Dos microcontroladores tipo Arduino son usado para la adquisición y registro de los datos a través de una computadora portátil.

Se realizaron pruebas experimentales para conocer el funcionamiento del sistema para la época de invierno. Las condiciones de clima juegan un papel muy importante en la operación de la chimenea para su buen funcionamiento. La radiación, temperatura ambiente y el flujo de aire son registrados cada 30 min a partir de una estación meteorológica.

El modelo experimental ha sido validado con un modelo matemático en estado transitorio, para conocer su comportamiento térmico. Los resultados han sido satisfactorios, demostrando que la chimenea es capaz de extraer flujo másico para mejorar la ventilación natural pasiva y con fines de confort térmico. El mo-

delo de la chimenea solar experimental presenta una geometría cuadrada alargada con medidas de 1.37 m de alto, 0.60 m de profundo, y 0.20 m entre cada cavidad puede extraer flujo volumétrico entre $238 - 1038 \frac{m^3}{h}$.

ABSTRACT

This thesis work presents an experimental study of a solar chimney daytime use natural ventilation and thermal comfort applications. The system is composed of two metal plates that absorb energy between two glass covers that form three symmetrical cavities.

The construction of the solar chimney was carried out at the Yecapixtla School of Higher Studies. The materials for its construction consider ductile steel for metal plates with a thickness of approximately 1mm. Glass covers are considered 6mm thick. The structure is made of metal, while the entrance to the airflow is considered with a wooden cover to avoid energy gain when the airflow passes. The color of the glass covers is clear. The plates are considered matte black to absorb the greatest amount of radiation emitted by the sun. The orientation of the solar chimney is considered to be East-West in the direction of the metal plates. For reverse flow, a glass top cover is considered.

The fireplace is electronically instrumented with temperature sensors for each fireplace element. While, for the measurement of the airflow, digital anemometers are used. Two Arduino-type microcontrollers are used for data acquisition and recording through a laptop.

Experimental tests were carried out to know the system's operation for the winter season. Weather conditions play a very important role in the operation of the fireplace for its proper functioning. Radiation, ambient temperature, and airflow are recorded every 30 min from a weather station.

The experimental model has been validated with a mathematical model in the transient state to know its thermal behavior. The results have been satisfactory, showing that the chimney can extract mass flow to improve passive natural ventilation and thermal comfort. The experimental solar chimney model with the geometry of 1.37 m high, 0.60 m deep, and 0.20 m between each cavity can extract volume flow between $238 - 1038 \frac{m^3}{h}$.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Importancia

La ventilación natural, se considera uno de los requerimientos principales en el diseño de naves industriales, viviendas y/o edificaciones, principalmente en aquellas construcciones orientadas al bajo consumo energético. La ventilación natural, es un concepto de sistema de climatización, que por sus características se ha denominado sistema pasivo, y se considera fundamental para el confort y bienestar humano. En sí, el término pasivo se aplicó recientemente a aquellos sistemas de climatización ambiental que, en contraste con equipos convencionales de aire acondicionado y/o de calefacción, resultan ser muy simples, tanto en concepto como en funcionamiento y mantenimiento; de hecho los sistemas pasivos de climatización, se caracterizan por la nula dependencia de energéticos convencionales, como los de origen fósil, contribuyendo de manera contundente a la reducción de emisión de gases de efecto invernadero, al ahorro y uso eficiente de los recursos no renovables. El tema de proponer nuevas alternativas y de perfeccionar las ya existentes para reducir el consumo de energías convencionales, es un nuevo reto, el uso de algunas energías renovables, como la energía solar, a través de los sistemas de ventilación pasiva para edificaciones, es un ejemplo claro de ello. Existen diferentes tipos de ventilación en una vivienda o edificación (Hazim, 1998), estos son:

Ventilación simple: Cuando el flujo de aire entra a través de una o más aberturas por un sólo lado de la habitación, por ejemplo, a través de una ventana.

Ventilación cruzada: Cuando el aire entra en un lado de una habitación a través de una o más aberturas y sale en el lado opuesto a través de una o más aberturas.

Sin embargo, este trabajo se centra en el estudio de la ventilación por tiro inducido. Por lo tanto, **ventilación por tiro inducido:** En este caso la fuerza de flotación es la principal fuerza motriz, donde la altura del tiro es fundamental. Usando el concepto de la ventilación inducida solar, podemos mencionar tres tipos de dispositivos, los cuales están gobernados por los mismos principios físicos: la pared trombe, la chimenea y el techo solares.

El primer método, que corresponde al captador de pared trombe, consiste en una pared de espesor moderado con una abertura inferior y otra superior con una cubierta de vidrio, un espesor de canal de 50 a 100 mm entre la cubierta de vidrio y la pared, permiten que el aire caliente ascienda, estos captadores han sido usados para el calentamiento pasivo. La chimenea solar, es muy similar al captador de muro trombe, con la diferencia de que, la abertura superior se usa para expulsar el aire caliente del canal hacia el exterior y de esta forma, producir ventilación del recinto al que esté acoplada. Generalmente, la chimenea está integrada a la edificación con una orientación tal que aproveche al máximo la energía solar para calentar su placa de absorción y por ende el aire en el canal, particularmente, en regiones donde la latitud es mayor a los 50 ° de latitud, el captador de muro trombe y la chimenea solar no son tan eficientes para ventilar una vivienda, entonces, lo más conveniente es usar un captador solar de techo con un apropiado ángulo de inclinación, por lo tanto, para aplicaciones propias de ventilación, la chimenea solar resulta ser más conveniente, debido a que se puede orientar de tal manera que se aproveche al máximo la radiación solar.

Una chimenea solar es una cavidad ventilada, que aprovecha la energía solar para mejorar la ventilación natural, durante las últimas tres décadas, estos sistemas se han utilizado en entornos arquitectónicos, para disminuir la energía utilizada por los métodos mecánicos. Se están incorporando cada vez más en los nuevos diseños de viviendas para proporcionar ventilación natural bajo enfoques bioclimáticos, principalmente en climas cálidos. Generalmente, son una cubierta de vidrio, una cavidad para el paso del flujo y una placa de metal que absorbe la energía solar. Las chimeneas solares son sistemas que mejoran la eficiencia energética y el confort térmico. Para el diseño, es necesario estimar los caudales máxicos y las temperaturas en función de las características de la chimenea.

1.2 Estado del arte

A continuación, se presenta estudios sobre chimeneas solares con la clasificación siguiente:

- Estudios teóricos
- Estudios teóricos-experimentales

1.2.1 Estudios teóricos

Uno de los estudios pioneros sobre chimeneas solares corresponde al de Bansal et al. (1993). Los autores presentan un estudio de una habitación de 64 m^3 que se encuentra acoplada a un colector solar de $1.5 \times 1.5 \times 1.5 \text{ m}$. Ellos han reportado resultados de flujo volumétrico entre 100 a $350 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ para radiaciones solares entre 100 a $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Sin embargo, Ong (2003) simuló el comportamiento térmico de una chimenea solar de un canal a través de un modelo matemático. El modelo matemático propuesto se implementó para predecir la distribución de las temperaturas para la cubierta de vidrio, el fluido y la placa de absorción. El modelo de balances globales de energía, fue aplicado para obtener dicho modelo. La radiación solar de $400 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ fue usada como un parámetro para la verificación del modelo teórico, para las dimensiones de la chimenea de 2 m de altura y un hueco de canal de 0.145 m. Las temperaturas máximas alcanzadas en la simulación del modelo, corresponden a $68 \text{ }^\circ\text{C}$ para la placa metálica, mientras que, para el flujo de salida de $46 \text{ }^\circ\text{C}$, y un flujo másico de $0.014 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$. Los resultados mostraron que la temperatura del aire, la razón de flujo de masa y la eficiencia se incrementan con la radiación solar. El autor concluyó que el modelo teórico es capaz de predecir el rendimiento de la chimenea solar. Otros autores, tal como Ismail y Henríquez (2006) llevaron a cabo un estudio teórico de una ventana ventilada compuesta por dos cubiertas de vidrio, la cual forma un canal de flujo de aire. El modelo propuesto fue analizado en una dimensión, en estado transitorio y aplicaron el método de balances de calor al canal de flujo de aire y a las cubiertas de vidrio. Implementaron y simularon un modelo numérico matemático de la ventana ventilada de doble vidrio con flujo de aire forzado, el cual fue simulado tomando en cuenta el intercambio de radiación de longitud de onda larga entre las cubiertas de vidrio. Los autores presentan en sus resultados

que, cuando se incrementa la razón de flujo de masa, se reduce la temperatura del vidrio interno y se reduce la ganancia de calor total en comparación con el caso de una simple ventana de vidrio. Ellos realizaron un análisis con y sin intercambio radiativo para la cubierta externa, mostraron el efecto entre la superficie interna y externa de la cubierta de vidrio, encontrando una variación muy pequeña de temperatura alrededor de 0.5°C . Mientras que, Harris y Helwing (2007), realizaron un estudio teórico a una chimenea con fines de ventilación natural. El modelo de la chimenea consta de una cubierta de vidrio y una placa metálica de absorción de energía radiante, ambos elementos forman un canal de flujo de aire. Los autores aplicaron el método de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), para evaluar el impacto del ángulo de inclinación, con doble vidrio y con un acabado de baja emisividad de la placa metálica. Sus resultados muestran, que el ángulo de inclinación óptimo para un flujo máximo fue de 67.5° de la horizontal, dando un 11% en el incremento de la razón de flujo en comparación de una chimenea vertical. Un 10% de eficiencia más alto fue obtenida, usando una superficie de la placa a baja emisividad. Por otro lado, Bassiouny y Koura (2008) realizaron un estudio numérico a una chimenea solar acoplada a una habitación con un volumen de 27 m^3 para fines de ventilación natural. La chimenea consta de una cubierta de vidrio y una placa de absorción. Los autores aplicaron el método de balances globales de energía a cada elemento de la chimenea obteniendo tres ecuaciones en función de los coeficientes de transferencia de calor y de las temperaturas. También se aplicó el método de elemento finito para predecir el patrón de flujo. Posteriormente, ellos realizaron un estudio paramétrico en función del ancho y la entrada de la chimenea para conocer el efecto de la ventilación. El parámetro que tuvo mayor efecto sobre el cambio de aire por hora (ACH), fue el ancho de la chimenea. Los autores mostraron en sus resultados que la temperatura media de la placa varía de $T_w = 3.51 I^{0.461}$, y la temperatura media del vidrio varía de $T_g = 9.15 I^{0.199}$ donde I es la intensidad solar. Los autores realizaron la comparación de sus resultados con Mathur et al. (2006), mostrando una razonable concordancia entre los resultados que obtuvieron durante su análisis.

Aunque se han realizado diferentes estudios, estos análisis se han ejecutado principalmente a través de simulaciones en estado estacionario (Patel et al.,

2014; Amori y Saif, 2012), buscando la geometría que proporcione la máxima transferencia de calor en función de los flujos máxicos. Asimismo, se ha estudiado el efecto de la radiación solar incidente sobre chimeneas inclinadas (Imran, et al., 2015), buscando un ángulo óptimo como parte del mejor diseño, así como enfoques de dinámica de fluidos computacional, para el análisis bidimensional del comportamiento dinámico de chimeneas para enfriar habitaciones pequeñas (Laynie et al., 2020; Khedari et al., 1999). También se ha informado que, modelos matemáticos en estado transitorio predicen el comportamiento de la chimenea (Zhongbao y Su, 2012; Saifi et al., 2012; Shi y Zhang, 2016; Sudprasert, et al., 2016), analizando el comportamiento de la chimenea para diferentes geometrías y condiciones ambientales.

1.2.2 Estudios teóricos-experimentales

Algunos otros estudios se centran en la combinación de estudios tanto teóricos como experimentales, tal es el caso como Hirunlabh et al. (1999). Ellos llevaron a cabo un estudio teórico-experimental de una casa solar con fines de ventilación. Como modelo experimental, usaron una casa solar con dimensiones de 2.68 m de alto y un área de base de 3.35 x 3.45 m. La chimenea solar usada en este trabajo consta de una placa metálica y una cubierta de vidrio, los cuales forman un canal de flujo de aire. Aplicaron el método de bancos de calor global obteniendo un modelo matemático que permitió determinar las temperaturas y el flujo de aire volumétrico. En sus resultados experimentales, mostraron que la placa metálica puede inducir ventilación natural, también presentaron el promedio máximo del flujo másico del aire durante el periodo de calor (10:00 – 16:00 hrs) que fue cerca de 0.015 kg/s. La diferencia que presentan entre la simulación y los resultados medidos, fue aproximadamente del 10%, al igual, otros autores como Alfonso y Oliveira (2000) realizaron un estudio teórico-experimental a una chimenea solar con fines de mejorar la ventilación natural en habitaciones. El estudio se llevó a cabo para una chimenea solar y una convencional, la primera permitió la captación de la radiación solar y la otra no. Ambas chimeneas tienen una sección transversal interna de 0.2 x 1 m y 2 m de altura. El muro fue hecho de ladrillo (10 cm de espesor) y con aislamiento exterior (5 cm) para la chimenea solar. Los autores desarrollaron un modelo simplificado y un programa de cómputo que permitió la cuantificación de la razón de flujo de ventilación natural asistida solar, así como también, el almacenamiento de energía en el muro de la chimenea, tomando en cuenta la variación del tiempo en condiciones climáticas. Los resultados obtenidos del modelo, predijeron satisfactoriamente los resultados experimentales, los cuales fueron obtenidos con la técnica de trazado de gas en las chimeneas. También, Ong y Chow (2003), han presentado estudios teóricos-experimentales de una chimenea solar, la chimenea hizo uso de una cubierta de vidrio y una placa de absorción mediante la cual se forma un canal de flujo de aire. La chimenea como modelo experimental, utilizó una caja rectangular de 2.0 m de alto x 0.48 m de ancho x 1.02 m de fondo, la parte superior, la base y las paredes laterales fueron fabricadas de 22 mm de espesor de hojas laminadas de poliuretano rígido ambos lados con 1 mm de espesor de revestimiento de hojas de acero. Una abertura en la parte inferior de la placa permite que el aire de la

habitación entre al canal y por convección natural fluya hacia el exterior. Los autores en el estudio teórico, propusieron un modelo matemático con la finalidad de predecir el rendimiento térmico de la chimenea solar. Las ecuaciones de transferencia de calor en estado permanente, fueron obtenidas a través de un circuito eléctrico y su solución, fue obtenida por el método de la matriz invertida. El modelo teórico fue verificado con resultados del modelo experimental. La velocidad de aire que obtuvieron fue de 0.25 y 0.39 $\frac{m}{s}$ para una radiación solar mayor de 650 $\frac{W}{m^2}$. Sin embargo, Mathur et al. (2006) realizaron un estudio teórico-experimental de una chimenea solar para ventilar una habitación de 27 m³. Como modelo experimental utilizaron una cámara cúbica de madera (1 x 1 x 1 m³). El modelo físico consta de una cubierta de vidrio y una placa metálica que entre ellas forman un canal de aire, en la parte inferior tiene un hueco donde el aire entra de la habitación y fluye hacia el exterior. En este estudio el experimento llevado a cabo fue con dimensiones diferentes del hueco de aire (0.1, 0.2 y 0.3 m) y diferentes alturas del absorbedor (0.7, 0.8 y 0.9), aplicaron el método de balances globales a los elementos principales obteniendo un sistema de ecuaciones lineales para determinar la temperatura de cada elemento, implementaron un programa de cómputo en para el cálculo de la velocidad del flujo de aire y la variación de la razón de flujo de aire. Los autores encontraron una desviación del 23% entre los valores teóricos y experimentales. La ventilación máxima registrada fue de 5.6 del cambio de aire por hora para un hueco de aire de 0.3 m y 0.85 m de altura del tiro de la chimenea a una radiación solar de 700 $\frac{W}{m^2}$. Encontraron que el modelo puede predecir el rendimiento de dichos sistemas y que el enfoque que se dio a este análisis también es aplicable a pequeñas chimeneas solares. Por último, Lee y Strand (2009) determinaron el impacto energético de la chimenea térmica bajo un programa de simulación llamado EnergyPlus para tres diferentes condiciones de clima (Spokane, Minneapolis y Phoenix). Describieron el algoritmo de modelado. Los autores realizaron un estudio paramétrico a la chimenea analizando el efecto de los parámetros de entrada de funcionamiento que afectan a la razón de ventilación natural. Los parámetros de entrada fueron: el alto de la chimenea, la absortancia solar, la transmitancia solar y el ancho del hueco de aire. Los autores presentaron en sus resultados que, para alturas de la chimenea (3.5 – 9.5 m) de las localidades de Minneapolis, Phoenix

y Spokane obtuvieron flujos máxicos de 0.035 - 0.065, 0.06 – 0.1, 0.075 – 0.13 $\frac{m^3}{h}$ respectivamente. En el efecto de la transmitancia solar, encontraron que el flujo de máxico aumentó en un 40, 38 y 36% en Minneapolis, Spokane y Phoenix respectivamente, también, encontraron que el flujo máxico, es reducido por el ancho del hueco del aire, indicando que la reducción del hueco mejora la razón de flujo para la ventilación natural.

1.2.2 Estudios experimentales

Algunos otros estudios, se basan en experimentación sobre chimeneas solares, tal es el caso como Bejalwar y Belkhole (2018). Los autores presentan, una planta generadora de energía con el uso de las chimeneas solares para obtener flujos de aire inducido por energía solar, para impulsar una turbina para generar electricidad. Bejalwar y Belkhole presentan un modelo matemático, para el desempeño de la planta piloto, los resultados experimentales que obtienen presentan una potencia de salida promedio varía de 10 a 25 vatios, relativamente baja debido a la falta de intensidad solar, debido a la época de invierno, el cual se llevaron a cabo las pruebas. La configuración tiene un costo inicial bajo y absolutamente ningún costo operativo. Por lo tanto, el uso de componentes menos costosos, permite hacer un pequeño plan económico. Por otro lado, Zha et al. (2017) presentan una investigación sobre el rendimiento de una chimenea solar a gran escala, en un edificio real en el este de China. El rendimiento medido se compara con el cálculo teórico y la simulación numérica. En una chimenea solar de 6,2 m de largo, 2,8 m de ancho y 0,35 m de espacio de aire, los resultados experimentales muestran que se puede lograr un caudal de aire de 70,6 $m^3/h \sim 1887,6 m^3/h$ durante el día de la prueba. Los autores comentan que la chimenea solar es un enfoque efectivo para ahorrar energía en edificios residenciales en temporadas de transición en áreas de verano cálido e invierno frío en China. Sin embargo, algunos otros autores tal como Arce et al. (2009) determinaron experimentalmente el rendimiento térmico de una chimenea solar para ventilación natural para uso nocturno, su estudio fue realizado a escala completa. El modelo físico consta de una cubierta de vidrio y una placa de absorción, hecha

de concreto como elementos principales, con el fin de absorber la máxima radiación solar, formando entre ellas un canal de flujo de aire. Para una radiación solar de 604 W/m^2 encontraron un incremento máximo de 7°C de la temperatura del aire alrededor de las 13:00 horas. Los autores encontraron que, la razón máxima de flujo de aire fue de $374 \text{ m}^3/\text{h}$ para una velocidad de viento máxima, y para una velocidad de viento mínima fue de $50 \text{ m}^3/\text{h}$, obtuvieron un promedio de la razón de flujo de aire de $177 \text{ m}^3/\text{h}$ de las 0:00 horas a 24:00 horas. También, determinaron experimentalmente, el coeficiente de descarga para el modelo físico, obteniendo un valor de 0.52, este valor se puede usar para determinar el flujo volumétrico y el flujo másico, aplicado a modelos teóricos para chimeneas solares, con geometría similar.

Tal como se ha presentado en el estudio del arte, se han realizado estudios teóricos, teóricos-experimentales y experimentales, sobre las chimeneas solares. Esta última ha sido muy poco estudiada, debido a la complejidad de las configuraciones de las chimeneas. En esta contribución, se construye una chimenea solar para el estudio del rendimiento térmico. El sistema involucra una chimenea solar con dos placas de metal colocadas en el centro entre dos cubiertas de vidrio, que forman tres cavidades para el flujo de aire.

2 ANTECEDENTES

En las últimas décadas distintos investigadores han realizado diferentes estudios para predecir y conocer el rendimiento térmico de una chimenea solar, una chimenea solar, puede definirse como una cavidad alargada, ventilada su función principal es remover un volumen de aire que se encuentra confinado al interior de una edificación, para expulsarlo hacia el exterior (Tlatelpa Becerro Ángel, 2019). Las chimeneas solares, funcionan con una fuente de energía inagotable, que es la energía solar y proporcionan una sensación de confort térmico y al mismo tiempo mejorar la calidad del aire.

Se han realizado diferentes investigaciones de chimeneas solares con diferentes configuraciones y métodos de estudios, sus resultados han sido satisfactorios a través de los modelos empleados [Bansal et al. (1993) Ong (2003) Ismail y Henriquez (2006) Harris y Helwing (2007) Bassiouny y Koura (2008)]. Sin embargo, otros autores han realizado estudios teóricos experimentales, tal como Hirunlabh et al. (199) ha estudiado una casa con dimensiones de 2.68 m de alto con una base de 3.35 x 3.45 m. Aplicaron el método de bancos de calor, obteniendo un modelo matemático que permitió determinar las temperaturas y el flujo de aire volumétrico. En sus resultados experimentales mostraron el promedio máximo del flujo másico del aire durante el periodo de calor (10:00 – 16:00 hrs) que fue cerca de 0.015 kg/s. La diferencia que presentan entre la simulación y los resultados medidos fue aproximadamente del 10%. Alfonso y Oliveira (2000) realizaron el estudio para una chimenea solar y una convencional, la primera, permitió la captación de la radiación solar y la otra no. Ambas chimeneas tienen una sección transversal interna de 0.2 x 1 m y 2 m de altura. El muro fue hecho de ladrillo (10 cm de espesor) y con aislamiento exterior (5 cm) para la chimenea solar. Los autores desarrollaron un modelo simplificado y un programa de cómputo, que permitió la cuantificación de la razón de flujo de ventilación natural asistida solar, así como también el almacenamiento de energía en el muro de la chimenea, tomando en cuenta la variación del tiempo en condiciones climáticas. Los resultados obtenidos del modelo predijeron satisfactoriamente los resultados experimentales, los cuales fueron obtenidos con la técnica de trazado de gas en las chimeneas. Ong y Chow (2003) empleo en sus estudios, una chimenea como modelo experimental utilizó una caja

rectangular de 2.0 m de alto x 0.48 m de ancho x 1.02 m de fondo, el modelo teórico fue verificado con resultados del modelo experimental. La velocidad de aire que obtuvieron fue de 0.25 m/s y 0.39 m/s para una radiación solar mayor de 650 W/m^2 . Mientras que, Mathur et al. (2006) realizaron un estudio teórico-experimental de una chimenea solar para ventilar una habitación de 27 m^3 . Como modelo experimental utilizaron una cámara cúbica de madera ($1\text{ x }1\text{ x }1\text{ m}^3$). Sus resultados de Mathur mostraron una ventilación máxima de 5.6 de cambio de aire por hora para un hueco de aire de 0.3 m y 0.85 m de altura del tiro de la chimenea a una radiación solar de 700 W/m^2 .

En general, en la literatura existen estudios de chimeneas solares, haciendo uso de diferentes métodos teóricos y experimentales para su análisis. En este trabajo de investigación, se realiza el diseño, construcción y validación de una chimenea solar de tres cavidades de flujo de aire, también se lleva a cabo la instrumentación electrónica, para analizar el comportamiento térmico. Se hace uso de las condiciones ambientales para la validación del modelo experimental.

3 OBJETIVOS

3.1 General

Diseñar, construir y validar una chimenea solar de tres cavidades de flujo de aire a partir de condiciones ambientales.

3.2 Específicos

3.2.1. Estado del arte

3.2.2 Modelo físico de la chimenea solar

3.2.3 Diseño y construcción de la chimenea solar

3.2.4 Instrumentación electrónica de la chimenea solar

3.2.5 Adquisición de datos para diferentes condiciones de clima.

3.2.6 Análisis de comportamiento térmico.

3.2.7 Validación del modelo.

3.2.8 Resultados

3.2.9 Escritura y redacción de la tesis

4 HIPÓTESIS

El diseño de la chimenea solar podrá extraer la cantidad de flujo másico a partir de la comparación con un modelo teórico.

Las condiciones de clima afectan significativamente el funcionamiento térmico de la chimenea solar.

5 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Chimenea solar

En la Figura 5.1 a), se presenta un esquema de la chimenea solar que se encuentra ubicada en la parte más soleada de una vivienda y/o edificación. En la Figura 5.1 b) se muestra un diagrama esquemático del modelo físico de la chimenea correspondiente, cuyas partes principales son: una placa metálica ubicada en el centro entre dos cubiertas de vidrio que forman simétricamente dos canales de flujo de aire. La placa metálica se considera con un acabado de superficie de color negro mate, cuya finalidad es de absorber la mayor radiación solar posible. La orientación de la placa metálica de la chimenea es tal que durante el medio día recibe radiación solar en una de sus caras (orientación Este), después del mediodía la radiación solar incide sobre la otra cara (orientación Oeste), con el fin de aprovechar toda la radiación solar, posible durante el día. Las cubiertas de vidrio son usadas para reducir las pérdidas convectivas y radiativas, y se consideran que sean color claro y con un espesor de 6 mm. La radiación solar que llega a ambas cubiertas de vidrio se indica con dos flechas de color rojo, mientras que la dirección del flujo se muestra de color negro para ambos canales como se muestra en la figura 5.1. La radiación solar incidente experimenta transmisión, reflexión y absorción en la cubierta de vidrio, la mayor parte de esta energía que se transmite se retiene en la placa de absorción en donde las pérdidas de energía están asociadas con los procesos de transferencia de calor: la radiación, la convección y la conducción

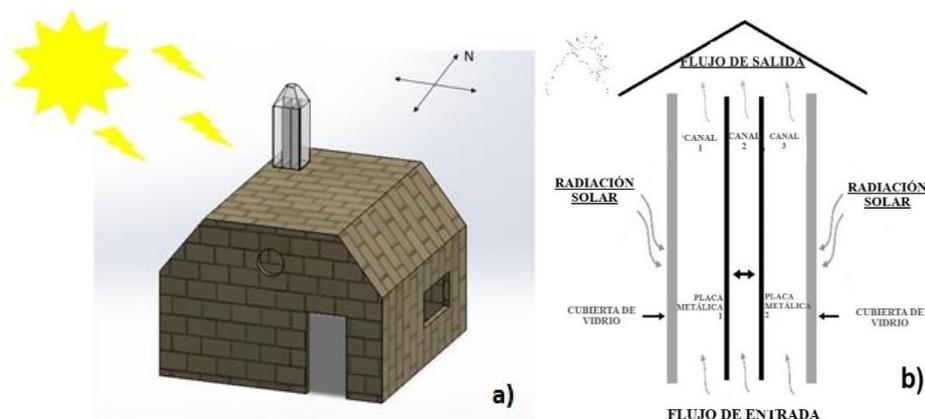


FIGURA 5.1. Chimenea solar. a) Chimenea solar ubicada en la parte más soleada de la casa habitación. b) Diagrama esquemático de la chimenea solar.

5.2 Modelo físico de la chimenea solar

La Figura 5.2 muestra el modelo físico propuesto de la chimenea solar. La chimenea está compuesta por tres secciones: base de la chimenea, cuerpo de la chimenea, y sombrerete, la chimenea está dispuesta para ser orientada al Este en una de sus caras, mientras que la otra, en la orientación Oeste para el aprovechamiento máximo de la radiación solar para su funcionamiento.

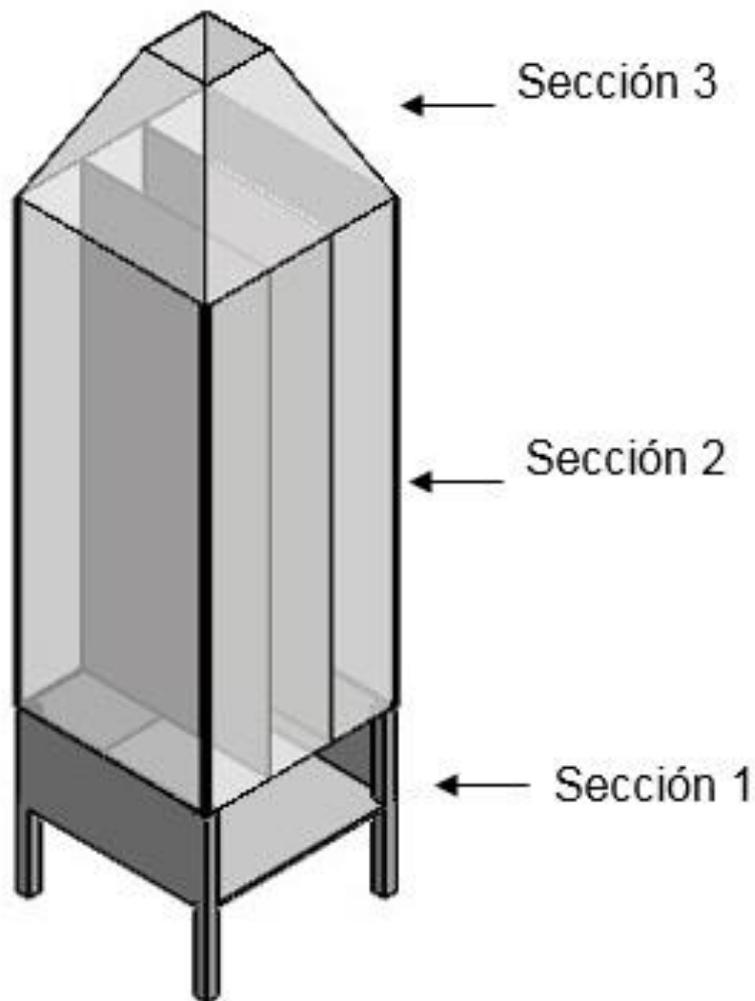


Figura 5.2. Modelo físico de la chimenea solar por secciones.

La sección 1 de la chimenea solar corresponde a la base, sin embargo, presenta una entrada para el paso del flujo de aire. La sección 2 representa el cuerpo de la chimenea que presenta a los elementos que forman a este dispositivo pasivo, este cuenta con dos placas metálicas (P_1 y P_2) que a su vez forman tres cavidades simétricas (C_1 , C_2 y C_3) al paso del flujo de aire, se consideran cubiertas de vidrio (C_{v1} y C_{v2}) para evitar las pérdidas convectivas y radiativas hacia el exterior, tal como se explica en la subsección 5.1. El flujo que pasa a través de la chimenea es expulsado hacia el exterior en la parte superior que se muestra en la sección 3, la sección 3 se considera un sombrerete para evitar un flujo invertido para el análisis de esta. Ver Figura 5.3.

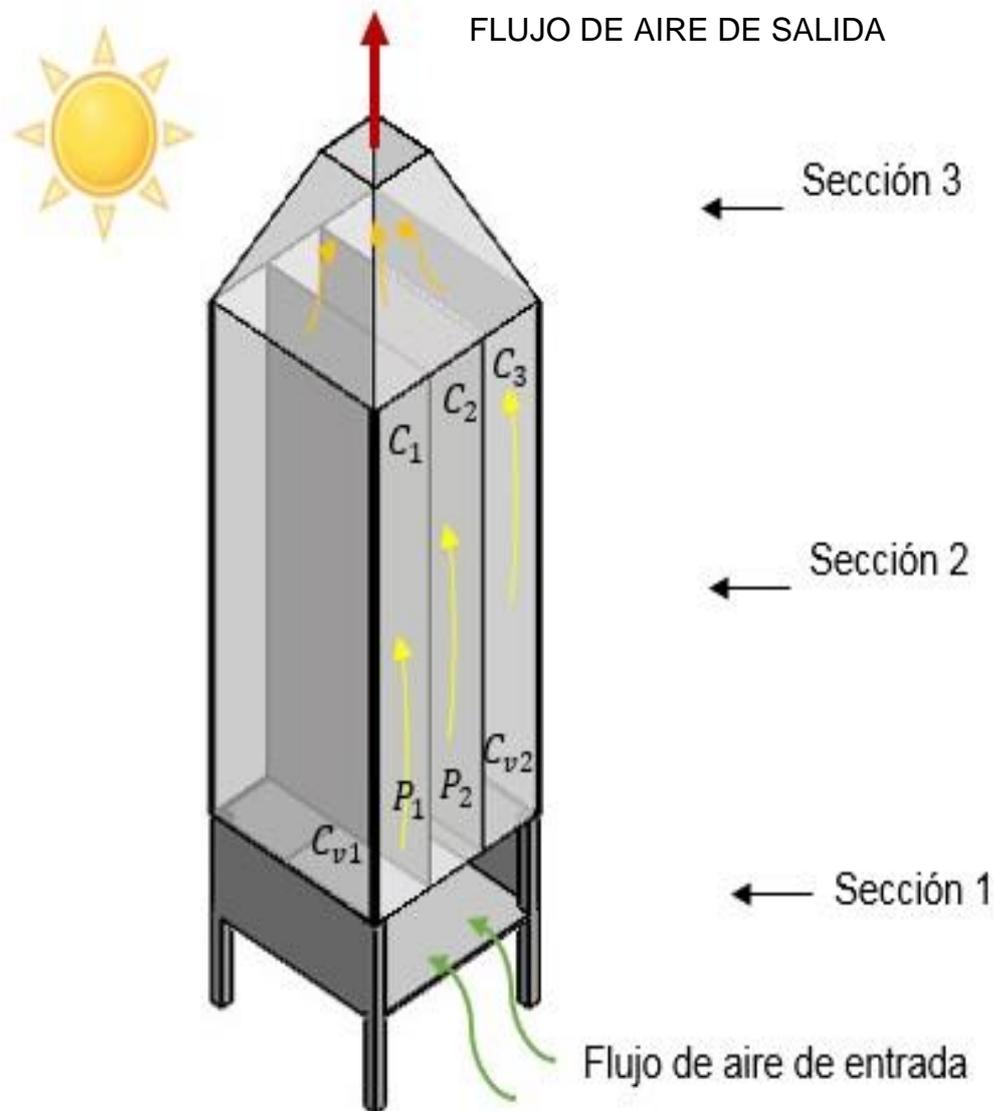


Figura 5.3. Elementos de la chimenea solar.

5.3 Geometría de la chimenea solar

La chimenea solar se consideró construir con las dimensiones siguientes: 1.37 m alto, 0.6 m de ancho, 0.60 m de profundo, Figura 5.4 a). Las cavidades se han considerado con la dimensión de 0.20 m cada una de ellas. Sin embargo, se ha considerado un sombrerete de base de 0.60 x 0.60 m con una altura de 0.40 m para evitar un flujo invertido, para la entrada del flujo de aire a la chimenea solar se considera una entrada de 0.60 x 0.25 m, Figura 5.4 b).

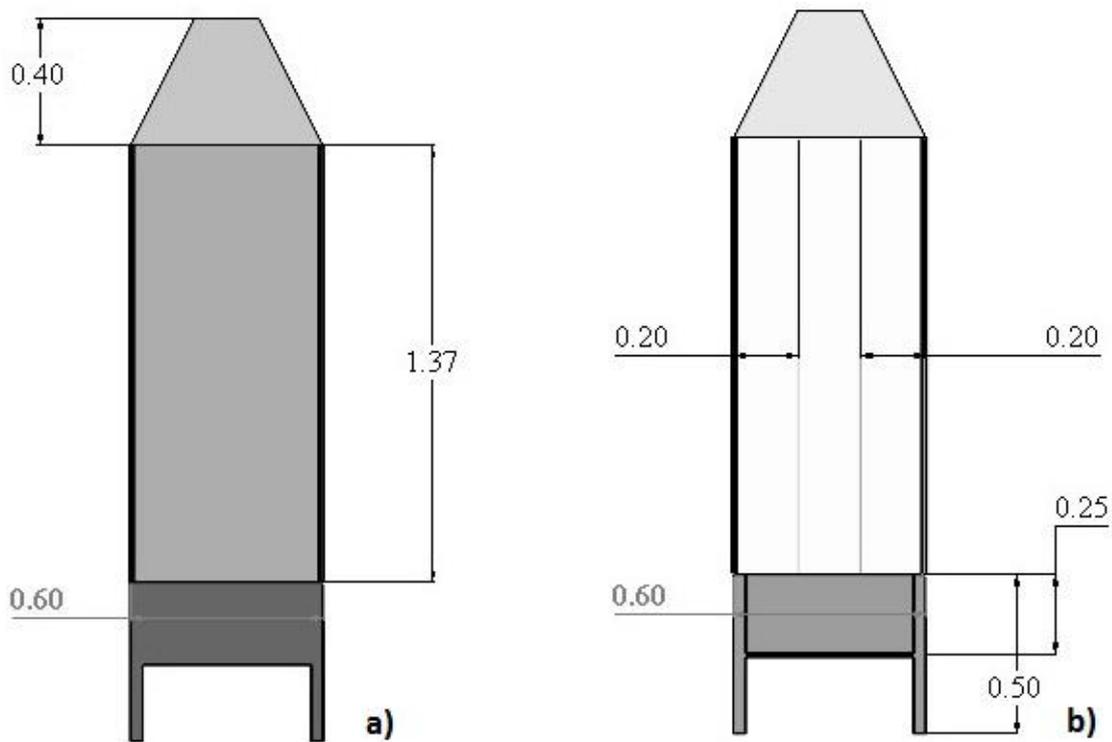


Figura 5.4. Geometría de la chimenea solar.

5.4 Instrumentación de la chimenea solar

La chimenea solar, es instrumentada electrónicamente con termopares para la medición de la temperatura de cada uno de los elementos que la conforman, estas corresponden a las cubiertas de vidrio, placas metálicas y al flujo de aire en las tres cavidades. La distribución de los sensores de temperatura se consideran tal que se distribuyan simétricamente y a lo largo de la chimenea solar, Figura 5.5 a). Mientras que, microcontroladores son usados para la adquisición y registro de datos de temperatura, Figura 5.5 b).

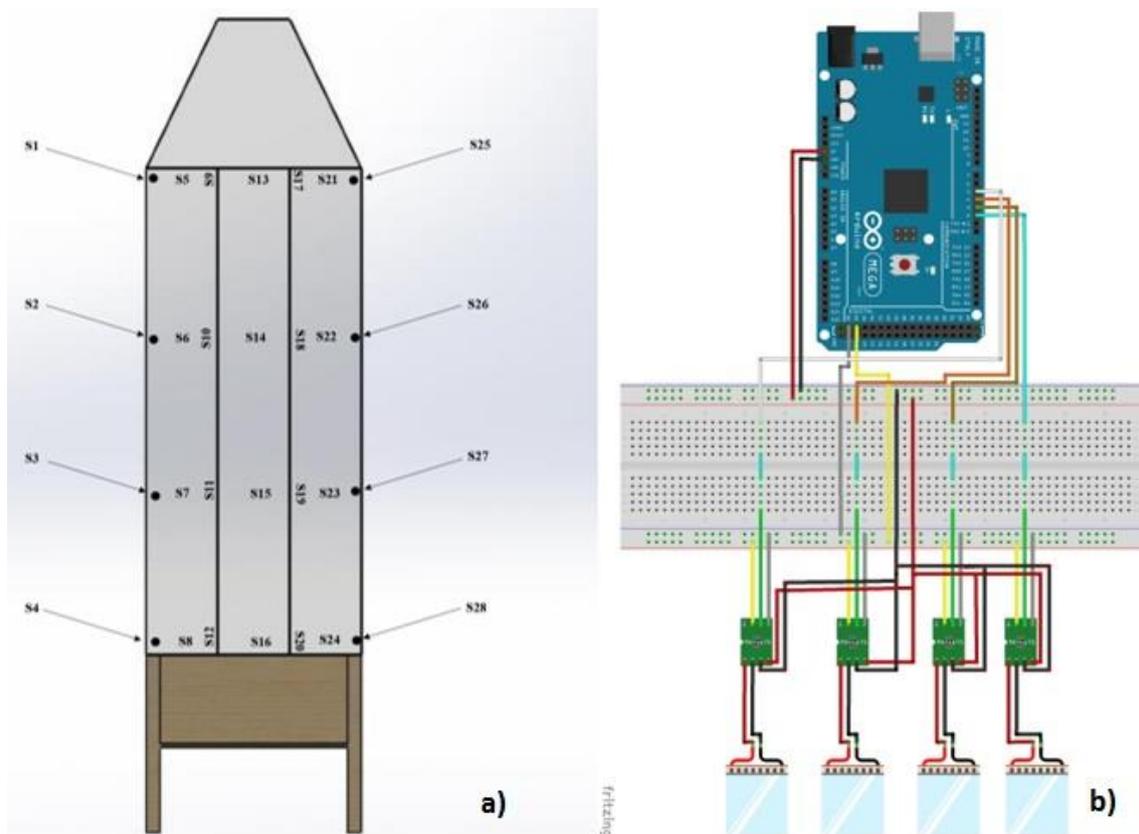


Figura 5.5. a) distribución de los sensores de temperatura en los elementos de la chimenea solar. b) Placa de desarrollo con microcontrolador ATmega 2560 para la adquisición y registro de datos.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Construcción de la chimenea solar

La construcción de la chimenea, se desarrolló en el laboratorio de Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial de la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla a partir de la geometría propuesta en la sección 5.3.

Para la estructura de la chimenea solar, se consideró como material el acero dúctil con calibre 32. La estructura fue soldada con el uso del equipo de arco eléctrico con electrodos 6013 – 1/8. Esta se pintó de color blanco para evitar ganancia de energía durante su funcionamiento. El sombrerete se construye con vidrio de 6mm de espesor unidas con silicón transparente de alta temperatura, con placas para su fijación de esta, Figura 6.1 a). Las cubiertas se consideran de vidrio claro, con un espesor de 6mm para formar un prisma que permita obtener tres cavidades para el paso del flujo de aire. Estas cubiertas, se usan para evitar las pérdidas convectivas y radiativas hacia el exterior, Figura 6.1 b). Dos placas metálicas de acero dúctil de 0.7 mm de espesor con una geometría de 1.37 m de alto por 0.57 m de ancho, se consideran para ser colocadas al centro entre las cubiertas de vidrio para que de esta manera se formen las tres cavidades. Las placas se pintan de color negro mate para garantizar la mayor absorción de la energía radiante proveniente del sol. Estas se fijan entre 2 guías de madera que permiten la manipulación de estas. La madera usada como guía, es usada para evitar pérdidas de energía calorífica entre las placas metálicas y la estructura de la chimenea solar, Figura 6.1 c).



Figura 6.1. Materiales de construcción de la chimenea solar.

La Figura 6.2 muestra a la chimenea solar experimental, construida con los materiales antes descritos, esta se ha construido de manera satisfactoria para ser puesta en operación ante las condiciones ambientales del entorno para conocer su funcionamiento y rendimiento.



Figura 6.2. Chimenea solar experimental

6.2 Instrumentación electrónica de la chimenea solar

6.2.1 Comunicación LabVIEW y microcontrolador

Se utilizó una placa de desarrollo, la cual, cuenta con un microcontrolador AT mega 2560 para interconectar los sensores de temperatura y humedad y para la adquisición de datos. El microcontrolador está conectado a una computadora personal a través de un puerto USB para la adquisición de datos. El uso de un software para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico, permite la comunicación entre los microcontroladores Arduino para el registro de datos. Se utilizó el software para gestionar la intensidad de la corriente eléctrica y, a su vez, controlar la velocidad del flujo de aire suministrado por los ventiladores.

6.2.2 Instrumentación electrónica

La chimenea solar, tiene sensores para la medición de la temperatura. Se consideran cuatro sensores instalados a lo largo de cada elemento de la chimenea solar con termopares tipo K con sus módulos Max 6675. Los sensores están ubicados y representados de S_1 hasta S_{28} , tal como se mostró en la Figura 5.5 a). La instrumentación experimental de la chimenea se puede apreciar en la Figura 6.3. Los sensores cuentan un rango de medición entre $-100^{\circ}C$ a $1250^{\circ}C$. La sensibilidad del sensor esta entre 41 a $42 \mu V/^{\circ}C$ y precisión de $\pm 0.7^{\circ}C$. La velocidad del flujo se midió a la entrada y salida de la chimenea con un anemómetro tipo UT363. El rango de medida es de 0 a $30 m/s$ con una precisión de $\pm 5\% rdg + 0,5$. Las pruebas experimentales se realizaron el día 24 de noviembre del año 2021 en un horario de las $9:00$ a $16:00 hrs$. Con la finalidad de conocer el funcionamiento térmico de la chimenea solar, Figura 6.6 c).



Figura 6.3. Instrumentación de la chimenea solar.

6.3 Medición de las condiciones ambientales

Las condiciones ambientales juegan un papel muy importante para el diseño y monitoreo de sistemas térmicos, tales como las chimeneas solares. Para esto, la chimenea solar se consideró estar al aire libre para conocer su funcionamiento térmico. Se usó una estación meteorológica tipo Ambient Weather WIFI OSPREY (WS-2902A) para medir las condiciones climáticas. La radiación solar y la temperatura ambiente se toman en consideración para su monitoreo. Las especificaciones del sensor de temperatura corresponden a un rango entre -4.4 a 60 °C y radiación solar entre 0 a $120k$ Lux ($\frac{W}{mm^2}$, lux, fc). La estación se instaló a una altura de $3,5$ m y se ubicó cerca de la chimenea solar para obtener datos precisos; Figura 6.4 La adquisición y registro de los datos se realizó de forma remota en una computadora personal; también se monitoreó mediante una consola de visualización.

Las magnitudes de las radiaciones para la orientación Este y Oeste se registran para un horario de las 9:00 a 16:00 hrs. Ver Figura 6.4 en esta muestra la serie temporal de la radiación, como se puede apreciar, la mayor cantidad de energía radiante para ese día en específico se tiene para la orientación Oeste con una radiación máxima de aproximadamente $600 \frac{W}{m^2}$ para las 11:00 hrs, mientras que se cuenta con una radiación mínima de $200 \frac{W}{m^2}$ para las 16:00 hrs.

Sin embargo, para la orientación Este la radiación máxima se encuentra a las 9:00 hrs y una mínima para las 12:00 hrs. Para la temperatura se observa una temperatura creciente conforme transcurre el día con una temperatura inicial de aproximadamente de 20 °C a una final de 25 °C.

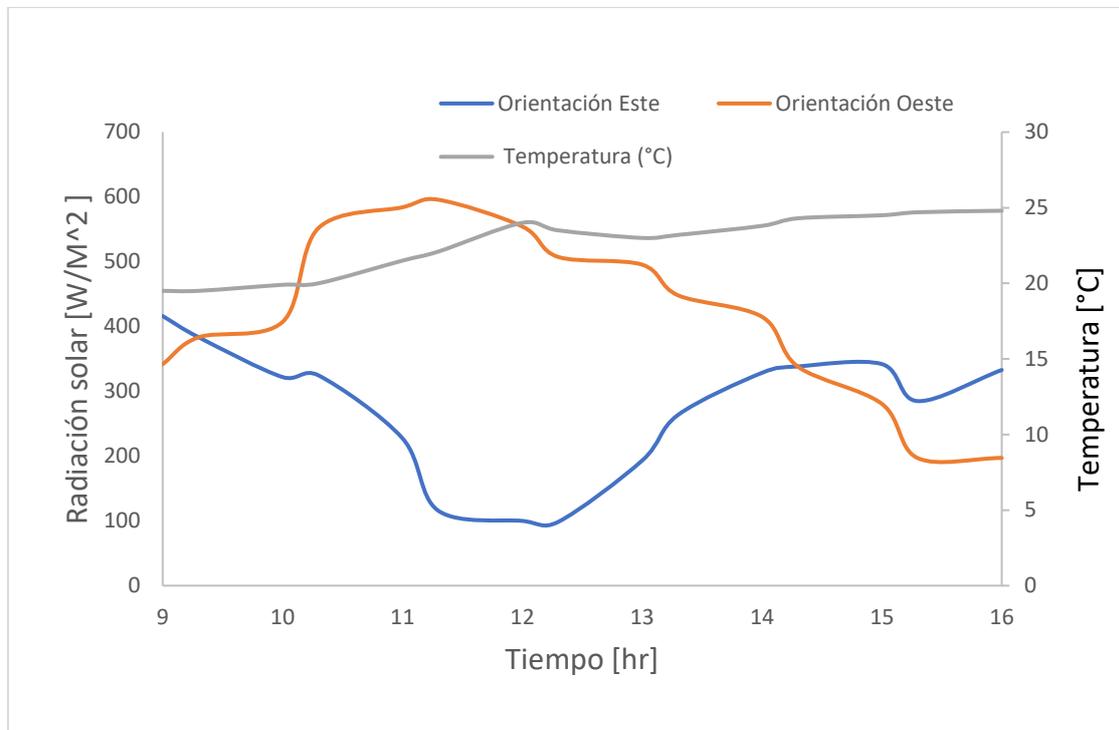


Figura 6.4. Radiación solar en orientación Este y Oeste para el 24 de noviembre del 2021. También se presenta la temperatura ambiente del aire.

6.4 Resultados de temperaturas de los elementos

En este apartado se presentan los resultados del perfil de temperaturas a lo largo de cada uno de los elementos de la chimenea solar. Los sensores de temperatura se distribuyeron simétricamente a lo largo de cada elemento.

6.4.1 Temperatura de las cubiertas de vidrio

La Figura 6.5, muestra el comportamiento de las temperaturas de las cubiertas de vidrio. Las temperaturas de cada sensor, muestran una variación en toda la trayectoria que se debe a la radiación que llega al sistema, así mismo, se puede apreciar que las temperaturas se atribuyen a los sensores que se encuentran en la orientación Oeste. Mientras que las temperaturas menores, corresponden a la orientación Este. La Tabla 1 muestra los resultados de las temperaturas de la cubierta de vidrio 1 y 2 para cada orientación (Este-Oeste).

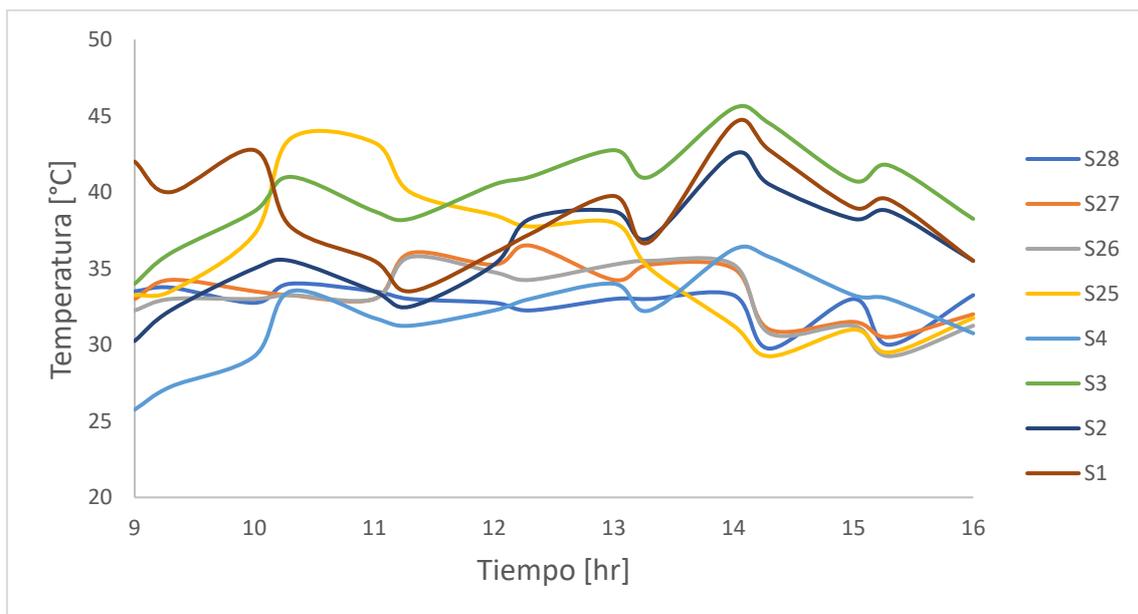


Figura 6.5. Temperaturas de las cubiertas de vidrio.

Tabla 1. Temperaturas de las cubiertas de vidrio

Hora	Cubierta de vidrio orientación Este								Cubierta de vidrio orientación Oeste							
	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]
9:00:00	28	33,5	27	33	26	32,25	25	33,25	4	25,75	3	34	2	30,25	1	42
9:30:00		33,75		34,25		33		33,5		27,25		36		32,25		40
10:00:00		32,75		33,5		33		37,25		29,25		38,75		35		42,75
10:30:00		34		33,25		33,25		43,5		33,5		41		35,5		37,75
11:00:00		33,5		33		33		43,25		31,75		38,75		33,5		35,5
11:30:00		33		36		35,75		40		31,25		38,25		32,5		33,5
12:00:00		32,75		35,25		34,75		38,5		32,25		40,5		35,25		36
12:30:00		32,25		36,5		34,25		37,75		33		41		38,25		37,25
13:00:00		33		34,25		35,25		38		34		42,75		38,75		39,75
13:30:00		33		35,25		35,5		35		32,25		41		37		36,75
14:00:00		33,25		35		35,25		31,25		36,25		45,5		42,5		44,5
14:30:00		29,75		31		30,75		29,25		35,75		44,5		40,5		42,75
15:00:00		33		31,5		31,25		31		33,25		40,75		38,25		39
15:30:00		30		30,5		29,25		29,5		33		41,75		38,75		39,5
16:00:00		33,25		32		31,25		31,75		30,75		38,25		35,5		35,5

6.4.2 Temperatura del flujo de aire en las tres cavidades

La Figura 6.6, muestra el comportamiento de las temperaturas del flujo de aire en el periodo de tiempo de 9:00 a 16:00 hrs del día 24 de noviembre del 2021. En la figura se puede apreciar que las temperaturas más altas se encuentran para los sensores que se ubican en la cavidad 2. Esto se debe a que la cavidad 2 se encuentra entre las placas metálicas, que a su vez contribuye al aumento de la temperatura del aire. Las temperaturas más bajas se ubican en la cavidad 3, mientras que las temperaturas en la cavidad 1 son mayores versus la cavidad 3. Esto se debe, a que las magnitudes de la radiación solar son mayores al del lado Oeste. La Tabla 2 muestra las magnitudes de las temperaturas de cada sensor.

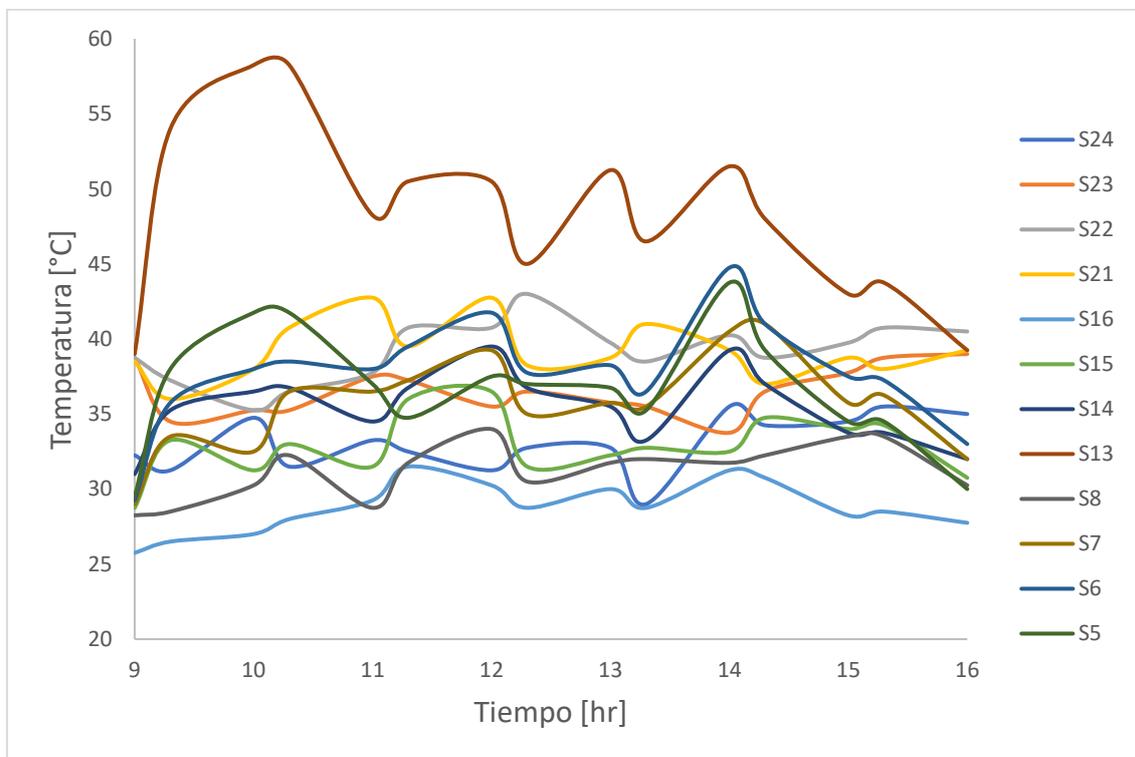


Figura 6.6. Temperaturas del flujo de aire de las tres cavidades.

Tabla 2. Temperaturas de los flujos de aire en las cavidades

Hora	Cavidad 3, orientación Este								Cavidad 2, al centro								Cavidad 3, orientación Oeste							
	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]		
9:00:00		32,2 5		38,7 5		38,7 5		38,5		25,7 5		28,7 5		31		39		28,2 5		29		29,2 5		29,5
9:30:00		31,2 5		34,5		37,2 5		36		26,5		33,2 5		35,2 5		54		28,5		33,5		35,7 5		38
10:00:00		34,7 5		35,2 5		35,2 5		38		27		31,2 5		36,5		58,2 5		30,2 5		32,5		38		41,7 5
10:30:00		31,5		35,2 5		36,5		40,7 5		28		33		36,7 5		58,2 5		32,2 5		36,5		38,5		41,7 5
11:00:00		33,2 5		37,5		37,7 5		42,7 5		29,2 5		31,5		34,5		48,2 5		28,7 5		36,5		38		37
11:30:00		32,5		37,2 5		40,7 5		39,5		31,5		36		36,7 5		50,5		31,7 5		37,2 5		39,5		34,7 5
12:00:00		31,2 5		35,5		40,7 5		42,7 5		30,2 5		36,5		39,5		50,5		34		39,2 5		41,7 5		37,5
12:30:00	24	32,7 5	23	36,5	22	43	21	38,2 5	16	28,7 5	15	31,5	14	36,7 5	13	45	8	30,5	7	35	6	37,7 5	5	37
13:00:00		32,7 5		35,7 5		39,7 5		38,7 5		30		32,2 5		35,5		51,2 5		31,7 5		35,7 5		38,2 5		36,7 5
13:30:00		29		35,5		38,5		41		28,7 5		32,7 5		33,2 5		46,5		32		35,5		36,5		35,2 5
14:00:00		35,5		33,7 5		40,2 5		39,2 5		31,2 5		32,5		39,2 5		51,5		31,7 5		40,5		44,7 5		43,7 5
14:30:00		34,2 5		36,5		38,7 5		37		30,7 5		34,7 5		37		48		32,2 5		41		41		39,2 5
15:00:00		34,5		37,7 5		39,7 5		38,7 5		28,2 5		34		33,7 5		43		33,5		35,7 5		37,5		34,5
15:30:00		35,5		38,7 5		40,7 5		38		28,5		34,2 5		33,7 5		43,7 5		33,5		36,2 5		37,2 5		34,5
16:00:00		35		39		40,5		39,2 5		27,7 5		30,7 5		32		39,2 5		30,2 5		32		33		30

6.4.3 Temperaturas de las placas metálicas

La Figura 6.7, muestra el comportamiento de las temperaturas de las placas metálicas, la figura, presenta que las temperaturas tienden a aumentar su magnitud conforme aumenta la longitud de las placas. Las temperaturas más bajas, se ubican en la parte inferior de la placa, mientras que las temperaturas más elevadas, se ubican en la parte superior con valores similares para ambas placas. Esta similitud se atribuye, a que las placas se consideran con un espesor muy delgado, y debido al intercambio radiativo entre ellas, estas aumentan su temperatura casi al mismo tiempo y con los mismos valores. Esto permite que la energía se incremente en ambas placas y ceda energía al flujo de aire que se encuentra entre ellas. La Tabla 3 muestra las temperaturas de cada sensor.

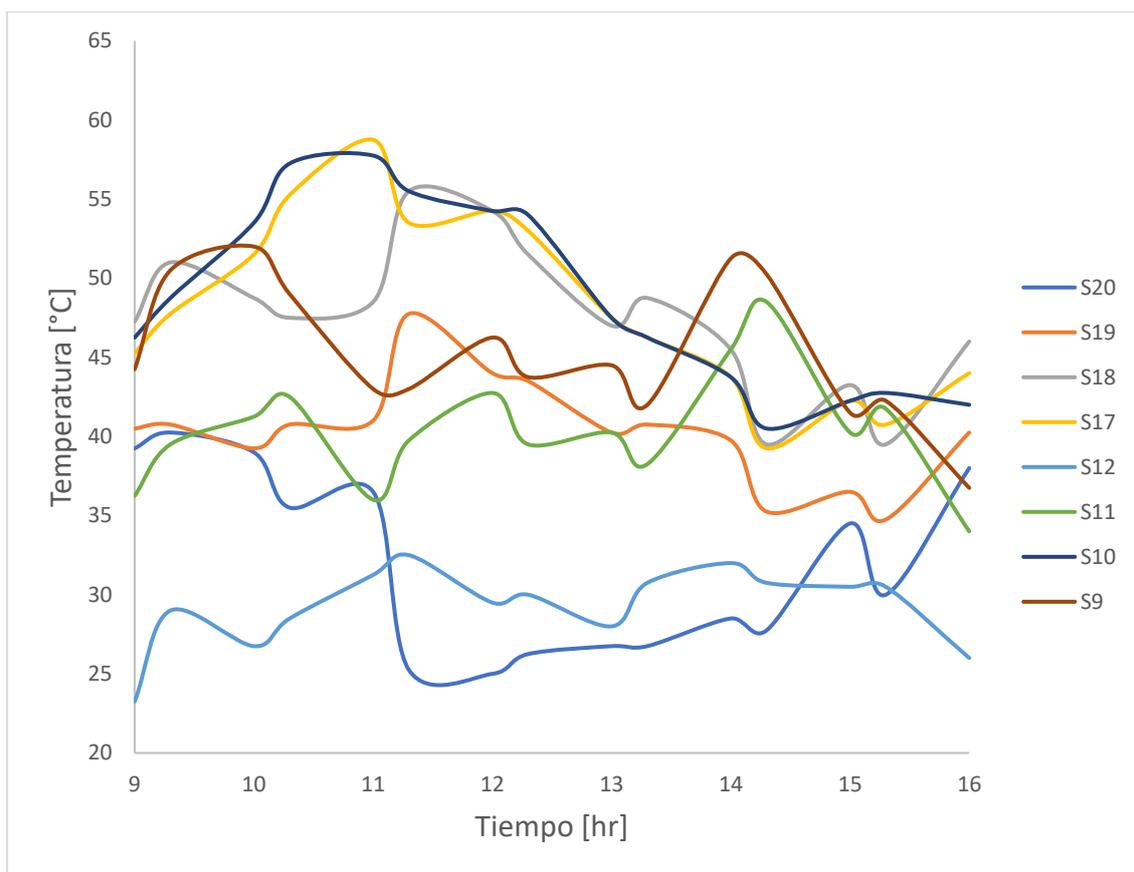


Figura 6.7. Temperaturas de las placas metálicas

Tabla 3. Temperaturas de las placas metálicas

Hora	Placa metálica 1 Este								Placa Metálica 2 Oeste							
	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]	Sensor	T [°C]
9:00:00	20	39,25	19	40,5	18	47,25	17	45,25	12	23,25	11	36,25	10	145	9	44,25
9:30:00		40,25		40,75		51		47,75		29		39,5		158		50,5
10:00:00		39		39,25		48,75		51,5		26,75		41,25		165		52
10:30:00		35,5		40,75		47,5		55,25		28,5		42,5		170		49
11:00:00		36,5		41		48,5		58,75		31,25		36		144		43
11:30:00		25,25		47,75		55,5		53,5		32,5		39,75		159		43
12:00:00		25		44		54,25		54,25		29,5		42,75		171		46,25
12:30:00		26,25		43,5		51,5		53		30		39,5		158		43,75
13:00:00		26,75		40,25		47		47,5		28		40,25		161		44,5
13:30:00		26,75		40,75		48,75		46,25		30,75		38,25		153		42
14:00:00		28,5		39,75		45,5		43,75		32		45,5		182		51,25
14:30:00		27,75		35,25		39,5		39,25		30,75		48,5		194		50,25
15:00:00		34,5		36,5		43,25		42,25		30,5		40,25		161		41,5
15:30:00		30		34,75		39,5		40,75		30,5		41,75		167		42,25
16:00:00		38		40,25		46		44		26		34		136		36,75

6.4 Validación del modelo experimental

La validación del modelo experimental se llevó a cabo para el día 24 de noviembre del 2021. Para esto, se considera realizar la comparación del modelo experimental versus a un modelo en estado transitorio. Los datos simulados se obtienen a partir del modelo en estado transitorio presentado del artículo e investigación de Tlatelpa et al. 2022. Para ello, se realizó una simulación numérica con el modelo computacional propuesto con las dimensiones de la chimenea presentada en la subsección 5.3. La Tabla 4 muestra los resultados del modelo físico de la chimenea solar experimental. Como se puede apreciar, los datos experimentales son muy cercanos a los resultados de la simulación en estado transitorio, con un valor máximo entre los datos de 0.2 %, mientras que para el menor con 0 %.

Los resultados han sido satisfactorios para el modelo experimental versus al simulado. Esto ha demostrado que la chimenea solar experimental es capaz de extraer flujo másico hacia el exterior de una casa habitación. Las condiciones ambientales juegan un papel muy importante. Entre mayor es la radiación solar mayor es la capacidad de extracción de aire.

Tabla 4. Comparación entre modelo simulado versus experimental.

Hora	Radiación solar $\left(\frac{W}{m^2}\right)$		Flujo másico $\left(\frac{kg}{s}\right)$		
	O. Este	O. Oeste	Experimental	Edo. transitorio	% ERP
9:00	416	342	0,17	0,16	0,01
9:30	383	383	0,13	0,15	0,02
10:00	322	407	0,30	0,17	0,13
10:30	325	552	0,33	0,16	0,17
11:00	228	584	0,18	0,16	0,02
11:30	116	596	0,30	0,1	0,20
12:00	100	554	0,08	0,16	0,08
12:30	98	507	0,13	0,12	0,01
13:00	193	495	0,10	0,14	0,04
13:30	264	448	0,20	0,13	0,07
14:00	329	415	0,05	0,16	0,11
14:30	338	338	0,22	0,16	0,06
15:00	342	281	0,36	0,16	0,20
15:30	285	197	0,18	0,15	0,03
16:00	333	197	0,17	0,15	0,02

6.5 Discusión

Se han presentado los resultados de la chimenea solar. Como se pudo apreciar en la sección 6, los resultados han sido confiables y satisfactorios para el modelo experimental que se ajusta a un modelo teórico presentado en un artículo de investigación por Tlatelpa et al. 2022. Para realizar una comparación de los resultados presentados en la Tabla 4, es necesario convertir el flujo másico a flujo volumétrico a partir de la ecuación 1 (White 2004). Esta ecuación permite conocer la cantidad de flujo por volumen de aire requerido para recintos establecidos por la norma ASHRAE Estándar 62.1 2019.

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (1)$$

La Tabla 5 muestra la conversión del flujo. Estos valores, son comparados para conocer la cantidad de caudal a remover en algunos espacios presentes, en la Tabla 6. Como se puede apreciar, el valor mínimo de caudal se encuentra para el horario de las 12:00 hrs con una magnitud de 238.4 y un máximo de $1048,9 \frac{m^3}{h}$ para las 15:00 hrs.

Tabla 5. Conversión de flujo másico a volumétrico.

Hora	Flujo másico			
	Experimental		Modelo transitorio	
	$\frac{kg}{s}$	$\frac{m^3}{h}$	$\frac{kg}{s}$	$\frac{m^3}{h}$
9:00	0,17	476,80920	0,16	460,8
9:30	0,13	381,44736	0,15	432,0
10:00	0,30	858,25656	0,17	489,6
10:30	0,33	953,61840	0,16	460,8
11:00	0,18	524,49012	0,16	460,8
11:30	0,30	858,25656	0,10	288,0
12:00	0,08	238,40460	0,16	460,8
12:30	0,13	381,44736	0,12	345,6
13:00	0,10	286,08552	0,14	403,2
13:30	0,20	572,17104	0,13	374,4
14:00	0,05	143,04276	0,16	460,8
14:30	0,22	619,85196	0,16	460,8
15:00	0,36	1048,9802	0,16	460,8
15:30	0,18	524,49012	0,15	432,0
16:00	0,17	476,80920	0,15	432,0

La Tabla 6 muestra caudales de aire requeridos para la ventilación de distintos tipos de ocupación de acuerdo con nivel de ocupación establecidos por la norma ASHRAE Estándar 62.1 2019. Los resultados de la chimenea solar experimental en este trabajo se obtienen diferentes caudales de flujo volumétrico durante el día. Considerando un promedio, se obtiene de $556.3 \frac{m^3}{h}$. Este último valor, se usa para calcular el número de ocupantes de cada espacio establecido en la Tabla 6. Sin embargo, tomando en cuenta el espacio del laboratorio de Universidad, la tabla nos indica que, se requiere $30.96 \frac{m^3}{h}$ por persona. Por lo tanto, para este tipo de espacios en la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla ingresan un promedio de 23 alumnos a prácticas. Por consiguiente, al dividir el caudal promedio de $556.3 \frac{m^3}{h}$ entre el requerido y establecido por la norma ASHRAE Estándar 62.1 2019 ($30.96 \frac{m^3}{h}$), como resultados indica que el máximo de ocupantes debe de ser de 24.18 personas. Con estos resultados, se demuestra que la chimenea solar es factible para poder ventilar un recinto de este tipo, garantizando la calidad y el confort térmico del espacio. Al igual en la Tabla 7 se muestra una comparación con el caudal promedio y el número máximo de ocupantes que deben estar dentro del tipo de recinto.

Tabla 6. Valores de Caudales de Aire externo, para ventilación general de distintos tipos de ocupación, de acuerdo con nivel de ocupación por defecto de ASHRAE Estándar 62.1 2019

Tipo de ocupación	Caudal de aire por persona $\left(\frac{m^3}{h}\right)$
Sala de clases (desde 9 años en adelante)	24,2
Laboratorio de computación	26,6
Salón de conferencias	15,3
Biblioteca	30,6
laboratorios de Universidad	30,9
cafeterías/Comedor comida-rápida	16,9
Conferencia/Reuniones	11,2
Espacios de oficina	30,6

Tabla 7. Número de ocupantes en base al caudal promedio.

Tipo de ocupación	Caudal de aire por persona $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)$	Caudal proporcionado por la chimenea $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)$	Número de ocupantes por tipo de ocupación
Sala de clases (desde 9 años en adelante)	24,2	556,3	23,0
Laboratorio de computación	26,6		20,9
Salón de conferencias	15,3		36,4
Biblioteca	30,6		18,2
laboratorios de Universidad	30,9		18,0
cafeterías/Comedor comida-rápida	16,9		32,9
Conferencia/Reuniones	11,2		49,7
Espacios de oficina	30,6		18,2

Como se demuestra, la chimenea solar experimental proporciona resultados prometedores para el diseño de este tipo para ventilar pasivamente edificaciones y/o naves industriales para fines de confort térmico. Sin embargo, en caso de requerir mayor cantidad de caudal a extraer en algún tipo de recinto mostrado en la Tabla 6 o 7, o algún otro, es necesario construir otra chimenea de mayor dimensión que proporcione los caudales requeridos.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados del estudio experimental de la chimenea solar, se concluye lo siguiente:

- a) Para la construcción de la chimenea solar se consideró como material el acero ductil y pintura de color negro mate para las placas de absorción de energía radiante. El espesor de las placas fue de aproximadamente 1mm con la finalidad de que estas puedan absorber la máxima radiación solar posible durante el día y a su vez puedan emitir esta energía al fluido que pasa a través de estas cavidades para aumentar la capacidad de expulsión.
- b) La estructura de la chimenea es de acero y pintada de color blanca para evitar ganancia de energía y pueda afectar el funcionamiento de esta. Así mismo, las placas metálicas fueron colocadas con unas guías de madera para evitar el contacto con la estructura y haya pérdidas conductivas.
- c) La chimenea solar se instrumentó con sensores de temperatura tipo K y para la medición del flujo de aire se usaron anemómetros digitales. Para la adquisición y registro de datos fue a través del uso de un microcontrolador tipo Arduino y dos computadoras portátiles.
- d) El modelo experimental se validó con un modelo matemático en estado transitorio (Tlatelpa-Becerro, A et al. 2022). Los resultados del modelo experimental concuerdan con el modelo teórico, Tabla 5. El modelo teórico se alimentó con datos experimentales de clima que fueron registrados y almacenados con una estación meteorológica instalada en la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla.

7.2 RECOMENDACIONES

- a) Se recomienda implementar sensores de mayor precisión tal como los PT100 para la instrumentación de la chimenea solar experimental. Esto ayudará a mejorar la adquisición de datos con menor error en las mediciones.
- b) Se recomienda hacer uso de anemómetros digitales de mayor precisión, para obtener mejor respuesta en la magnitud del flujo de aire.
- c) Se recomienda realizar pruebas experimentales con algún tipo de sustancia que permita visualizar el comportamiento de la velocidad del flujo de aire al interior de la chimenea solar.
- d) Se recomienda construir una habitación, la cual permita la instalación del modelo experimental para validar su funcionamiento con el acoplamiento.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afonso Clito, Oliveira Armando., 2000, “Solar Chimneys: Simulation and Experiment”, *Energy and Building*, Vol. 32, Págs. 71-79.
- Arce J., Jiménez M.J., Guzmán J.D., Heras M.R., Álvarez G., Xamán J., 2009, “Experimental study for natural ventilation on a solar chimney”, *Renewable Energy*, Vol. 34, Págs. 2928 – 2934.
- ASHRAE Estándar 62.1 2019. ISSN 1041-2336.
https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE_PREVIEW_ONLY_STANDARDS/STD_62.1_2019
- ASHRAE Estándar 62.1 2019. ISSN 1041-2336.
https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE_PREVIEW_ONLY_STANDARDS/STD_62.1_2019
- Bansal N.K., Mathur R., Bhandari M.S., 1993, “Solar Chimney for Enhanced Stack Ventilation”, *Building and Environment*, Vol. 28, Págs. 373-377.
- Bassiouny R, Nader S.A. Koura, 2008, “An analytical and numerical study of solar chimney use for room natural ventilation”, *Energy and Buildings*, Vol. 40, Págs. 865-873.
- Bejalwara, A. y Belkhode, P. (2018). “Analysis of Experimental Setup of a Small Solar Chimney Power Plan”, *Procedia Manufacturing*, 2nd International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering. Vol (20), Págs. 481 – 486.
- Harris D.J., Helwig N., 2007, “Solar Chimney and Building Ventilation”, *Applied Energy*, Vol. 84, Págs. 135-146.
- Hazim B. Awbi, 2003, “Ventilation of Buildings” *Renewable and Sustainable Energy*” Second Edition, Spon Press.
- Hirunlabh, J., Kongduang, W., Namprakai, P. and Khedari, J. (1999). Study of natural ventilation of houses by a metallic solar wall under tropical climate. *Renewable Energy* 18(1), 109–119. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00783-6](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00783-6)
- Imran, A.A., Jalil, J.M. and Ahmed, S.T. (2015). Induced flow for ventilation and

- cooling by a solar chimney. *Renewable Energy* 78, 236–244.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.019>
- Ismail K.A.R., Henriquez J.R., 2006, “Simplified Model for a Ventilated Glass Window under Forced Air Flow Condition”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, Págs.295-302.
- Khedari, J., Kaewruang, S., Pratinthong, N. and Hirunlabh, J. (1999). Natural ventilation of houses by a trombe wall under the climatic conditions in thailand. *International Journal of Ambient Energy* 20(2), pp. 85–94.
<https://doi.org/10.1080/01430750.1999.9675323>
- Kohloss, F.H. (2004). ASHRAE for standard ventilation for acceptable air quality. *ANSI/ASHRAE Addendum n to ANSI/ASHRAE Standard 62-2001* 8400.
- Kwang Ho Lee, Richard K. Strand, 2009, “Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney”, *Solar Energy*, Vol. 41, Págs. 615-621.
- Layeni, A.T., Adekojo, W.M., Babatunde, A.A., Bukola, O.B., Collins, N.N. and Solomon, O.G. (2020). Computational modelling and simulation of the feasibility of a novel dual purpose solar chimney for power generation and passive ventilation in buildings. *Scientific African* 8, 1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00298>
- Mathur J., Bansal N.K., Mathur S., Jai M., Anupma, 2006, “Experimental investigations on solar chimney for room ventilation”, *Solar Energy*, Vol. 80, Págs. 927-935.
- Mathur J., Bansal N.K., Mathur S., Jai M., Anupma, 2006, “Experimental investigations on solar chimney for room ventilation”, *Solar Energy*, Vol. 80, Págs. 927-935.
- Ong K.S., 2003, “A mathematical model of a solar chimney”, *Renewable Energy*, Vol. 28, Págs. 1047-1060.
- Ong K.S., Chow C.C., 2003, “Performance of a Solar Chimney”, *Solar Energy*, Vol. 74 Págs. 1-17.
- Patel, S.K., Prasad, D. and Ahmed, R.M. (2014). Computational studies on the effect of geometric parameters on the performance of a solar chimney power

- plant. *Energy Conversion and Management* 77, 424–431. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.056>
- Saifi, N., Settou, N., Dokkar, B., Negrou, B. and Chennouf, N. (2012). Experimental study and simulation of airflow in solar chimneys. *Energy Procedia* 18, 1289–1298. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.146>
- Shi, L. and Zhang, G. (2016). An empirical model to predict the performance of typical solar chimneys considering both room and cavity configurations. *Build. Environ* 103, 250-261. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.024>
- Sudprasert, S., Chinsorranant, Ch. and Rattanadecho, P. (2016). Numerical study of vertical solar chimneys with moist air in a hot and humid climate. *Int. J. Heat Mass Tran* 102, 645-656. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.054>
- Tlatelpa-Becerro, A., Rico-Martínez, R., Cárdenas-Manríquez, M., Urquiza, G., Alarcón-Hernández, F., & Fuentes-Albarran, M. (2022). Prediction of the dynamic behavior of a solar chimney by means of artificial neural networks. *Revista Mexicana De Ingeniería Química*, 21(1), IE2495. <https://doi.org/10.24275/rmiq/IE2495>
- White F.M. 2004. *Mecánica de fluidos*. Mc Graw Hill.
- Zha, X., Zhanga, J. y Qina, M. (2017). “Experimental and Numerical Studies of Solar Chimney for Ventilation in Low Energy Buildings”, *Procedia Engineering*, 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017, 19-22 October 2017, Jinan, China, Vol. (205), Págs. 1612 – 1619.
- Zhongbao, L. and Su, Y. (2012). An unsteady model for natural ventilation with solar chimney. *Advanced Materials Research* 354–355, 286–289. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.354-355.286>