



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIERREZ

Reporte final de residencia profesional

Proyecto de residencia:

“Ventilación pasiva industrial usando una chimenea solar”

Datos del Alumno

Nombre: Mario Alfredo Molina Espinosa

Número de control: 09270730

Carrera: Ingeniería Mecánica

Lugar donde se realizó la residencia

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET)

Datos de los asesores

Asesor interno: Ing. Víctor Manuel Vázquez Ramírez

Asesor externo: Dr. Jesús Arce Landa

Periodo de residencia: Agosto-Diciembre del 2013

ÍNDICE

	Página
NOMENCLATURA.....	4
INTRODUCCIÓN.....	7
1 JUSTIFICACIÓN.....	9
2 OBJETIVOS.....	10
2.1 Objetivo general.....	10
2.2 Objetivos específicos.....	10
3 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA EN QUE PARTICIPÓ.....	11
3.1 Misión del CENIDET.....	12
3.2 Visión del CENIDET.....	12
3.3 Instalaciones.....	12
3.4 Directorio.....	13
3.5 Departamento de Ingeniería Mecánica.....	13
3.5.1 Líneas de investigación.....	14
3.6 Localización del CENIDET.....	18
4 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	20
4.1 Alcances.....	20
4.2 Limitaciones.....	20
5 FUNDAMENTO TEÓRICO.....	21

5.1 Antecedentes históricos.....	21
5.1.1 Estudios teóricos.....	21
5.1.2 Estudios experimentales.....	22
5.1.3 Estudios teórico-experimentales.....	24
5.2 Desarrollo bibliográfico.....	25
6 CHIMENEA SOLAR.....	31
6.1 Modelo físico.....	31
6.2 Modelo matemático.....	38
6.3 Cálculo de propiedades termofísicas del aire.....	44
6.4 Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor y pérdidas globales.....	58
6.5 Cálculo del flujo másico en el canal y de la eficiencia.....	60
7 RESULTADOS.....	61
8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	67
8.1 Conclusiones.....	67
8.2 Recomendaciones.....	68
9 REFERENCIAS.....	69
11 ANEXOS.....	70

NOMENCLATURA

	DESCRIPCION	UNIDADES
A_0, A_i	Área de sección transversal a la salida y entrada del canal	m^2
A_r	Razón de áreas (A_0/A_i)	-
b_{f1}, b_{f2}	Distancia entre la placa y el vidrio	m
C_d	Coefficiente de descarga del canal de aire	-
C_f	Calor específico del aire	J/Kg K
C_g	Calor específico de la placa de vidrio	J/Kg K
C_w	Calor específico de la placa metálica	J/Kg K
e_{g1}, e_{g2}	Espesor de las placas de vidrio	m
e_w	Espesor de la placa metálica	m
G	Irradiancia	W/m^2
g	Constante de gravedad	m/s^2
h_{g1}, h_{g2}	Coefficiente de transferencia de calor por convección entre las placas de vidrio y el aire del canal	W/m^2K
h_{rwg1}, h_{rwg2}	Coefficiente de transferencia de calor por radiación entre la placa metálica y las placas de vidrio	W/m^2K
h_{w1}, h_{w2}	Coefficiente de transferencia de calor por convección entre la placa metálica y el aire del canal	W/m^2K
k_f	Conductividad térmica del aire	W/mK
L	Longitud de la chimenea	m
\dot{m}	Flujo másico	Kg/s
q''_1, q''_2	Transferencia de calor hacia la corriente de aire	W/m^2

S_{g1}, S_{g2}	Flujo de calor debido a la irradiancia solar absorbida por las placas de vidrio	W/m^2
S_{w1}, S_{w2}	Flujo de calor debido a la irradiancia solar absorbida en la placa metálica	W/m^2
T_a	Temperatura ambiente	K
T_{g1}, T_{g2}	Temperatura promedio de las placas de vidrio	K
$T_{g1}^{k+1}, T_{g2}^{k+1}$	Temperaturas de las placas de vidrio al paso del tiempo nuevo	K
$T_{g1,i}^k, T_{g2,i}^k$	Temperaturas de las placas de vidrio en el tiempo anterior	K
T_{f1}, T_{f2}	Temperatura promedio del aire en el canal	K
$T_{f1}^{k+1}, T_{f2}^{k+1}$	Temperaturas del fluido al paso del tiempo nuevo	K
$T_{f1,i}^k, T_{f2,i}^k$	Temperaturas del fluido en el tiempo anterior	K
$T_{f,i}$	Temperatura igual a T_a	K
$T_{fl,i}$	Temperatura del aire a la entrada del canal	K
$T_{fo,i}$	Temperatura del aire a la salida del canal	K
T_w	Temperatura promedio de la placa metálica	K
T_w^{k+1}	Temperatura de la placa de metálica al paso del tiempo nuevo	K
$T_{w,i}^k$	Temperatura de la placa metálica en el tiempo anterior	K

U_{t1}, U_{t2}	Coeficientes convectivos globales de transferencia de calor desde la parte superior a la cubierta de vidrio	W/m^2K
V	Velocidad del aire	
W	Ancho del canal de aire	m
ΔT	Diferencia de temperatura entre las placas	K
α	Absortividad térmica	-
α_t	Difusividad térmica	m^2/s
β	Coeficiente de expansión volumétrico	K^{-1}
ϵ_g	Emisividad del vidrio	-
ϵ_w	Emisividad de la placa metálica	-
η	Eficiencia instantánea de la chimenea solar	%
σ	Coeficiente de Stefan-Boltzmann	$5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$
ρ	Densidad	Kg/m^3
τ	Transmitancia del vidrio	-
γ	Constante en la temperatura media de aproximación	-
μ_f	Viscosidad dinámica del aire	$N*s/m^2$
ν	Viscosidad cinemática	m^2/s

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de ventilación natural han sido ampliamente investigados en las últimas 2 décadas. La razón principal consiste en su aplicación directa en construcciones para el ahorro de energía, principalmente en áreas con climas húmedos y cálidos. El uso de estos sistemas de ventilación otorgan muchas ventajas al ser utilizados en casas habitación o edificios pequeños para brindar confort y comodidad a las personas.

La ventilación natural usa fuerzas naturales, como las del viento y la flotabilidad para entregar aire fresco dentro de las construcciones para diluir olores, limitar la concentración de contaminantes como el polvo, humo o proveer oxígeno para la respiración e incrementar el confort térmico.

El término pasivo en la ventilación se utiliza para denotar que el sistema de ventilación carece de cualquier tipo de generación de energía convencional, y que por lo contrario, el sistema aprovecha la energía natural para funcionar.

Una chimenea solar como sistema de ventilación es un dispositivo que aprovecha la energía solar, las fuerzas de convección natural y los cambios de densidad del aire que pasa a través de esta, esto con el objetivo de ventilar o proveer de calefacción a un área determinada. En otras palabras, una chimenea solar es un sistema pasivo de ventilación.

El impacto ambiental, energético y monetario debido a la ventilación o calefacción ordinaria es muy elevado cuando se hace uso de estos sistemas a nivel industrial. Esto significa grandes pérdidas por parte de la empresa que necesite de ventilación como parte esencial de su proceso de producción.

Por ello muchas industrias comienzan a ver los sistemas pasivos como una solución para poder realizar de manera efectiva los procesos requeridos y además obtener grandes ahorros económicos.

El presente trabajo expone el estudio de una chimenea solar para uso industrial

que será instalada en una nave industrial de la empresa automotriz NISSAN en una de sus plantas en la ciudad de Cuernavaca, Morelos.

El trabajo comienza con una revisión bibliográfica en donde se exponen los antecedentes históricos de la ventilación pasiva en sistemas que poseen un funcionamiento parecido al de la chimenea solar. Se continúa con el desarrollo de los sistemas pasivos y los tipos de ventilación natural que actualmente se conocen, para después realizar un pequeño análisis de lo que es una chimenea solar y su funcionamiento.

Posteriormente, se plantea el modelo físico y el modelo matemático representativo de la chimenea solar y en el que se basarán para realizar un código numérico y encontrar una solución. También, se presentan algunas tablas para el cálculo de propiedades del aire a distintas temperaturas que son indispensables para el análisis.

Por último, se presentan los análisis finales y las conclusiones de las actividades que se realizaron durante este proyecto, así como algunas recomendaciones a considerar en un futuro.

El trabajo concluye con un anexo en donde se muestran algunas tablas que sirvieron como apoyo para desarrollar el presente trabajo.

1 JUSTIFICACIÓN

En el ramo industrial, el uso de la ventilación resulta indispensable en el proceso de producción o para tener un área de trabajo adecuada para los trabajadores. Sin embargo, a gran escala, hacer uso de sistemas de ventilación ordinaria genera grandes costos energéticos y monetarios, además del impacto ambiental que estos puedan causar.

En base a esto, resulta importante desarrollar medios alternos de ventilación que puedan cumplir con los requerimientos de una industria y asimismo ayuden a disminuir los costos de la misma. Al mismo tiempo, las industrias que hacen uso de energías limpias obtienen como beneficio extra el aumento de credibilidad ante la sociedad y contribuyen para detener el deterioro del medio ambiente.

Este proyecto se enfoca en la solución a dichos problemas al desarrollar un prototipo de chimenea solar para uso industrial. De obtener resultados satisfactorios se podría cubrir la demanda requerida por la industria y alcanzar los objetivos deseados. Al desarrollar un prototipo especial para la industria, si este funciona adecuadamente, se puede dar paso a la producción en serie de la misma y con esto obtener un nuevo sistema de ventilación funcional en el mercado, que en un futuro bien podría adecuarse para usos con menos demanda como lo pueden ser los hogares domésticos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Satisfacer las demandas industriales de la empresa NISSAN mediante la investigación y construcción de una chimenea solar para uso industrial.

2.2 Objetivos específicos

- a) Realizar un modelo matemático específico para la chimenea solar que se piensa construir y poner en operación.
- b) Realizar una investigación sobre las propiedades relevantes para la solución numérica del modelo de la chimenea solar, y proponer relaciones matemáticas que las representen.
- c) Obtener un prototipo funcional de una chimenea solar para uso industrial.

3 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA EN QUE PARTICIPÓ

El proyecto realizado se llevó a cabo dentro de las instalaciones del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), ubicado en la ciudad de Cuernavaca en el estado de Morelos, en el área de sistemas térmicos dentro del departamento de Ingeniería Mecánica.

El Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET, está ubicado en Cuernavaca, Morelos, ciudad que se ha convertido en sede de numerosas instituciones científicas, dedicadas a la investigación y a la docencia, lo que ha permitido un intercambio fructífero entre éstas.

Cuernavaca se beneficia de su cercanía a la ciudad de México, ya que los profesores investigadores y los estudiantes pueden desplazarse fácilmente para participar o asistir a eventos, intercambiar información, consultar bibliotecas, recibir asesorías y, en general, para relacionarse con todas las actividades que propicien y amplíen el conocimiento y la creatividad. El Centro, naturalmente, participa de esta valiosa sinergia.

El CENIDET ofrece sus programas de posgrado, para egresados de licenciaturas afines que estén interesados en prepararse para la investigación aplicada y el desarrollo tecnológico. Estos programas están estructurados para que el alumno adquiera conocimientos y habilidades que le permitan participarse con éxito en campos como:

- Industria de base tecnológica
- Instituciones de investigación o desarrollo tecnológico
- Escuelas para la formación de ingenieros

El Centro ofrece la posibilidad de realizar trabajos de investigación en convenio con otras instituciones como el Instituto de Investigaciones Eléctricas y el Centro de Investigación en Energía; existen además convenios con importantes universidades e institutos extranjeros, como la Universidad de Oviedo de España,

la Universidad de Concepción de Chile, la Universidad Politécnica de Madrid, la Universidad Federal de Santa Catarina en Brasil, el Instituto Politécnico de Virginia y la Universidad de Texas A&M.

3.1 Misión del CENIDET

Contribuir al desarrollo tecnológico sustentable, nacional y regional a través de la formación de investigadores e innovadores tecnológicos con visión humanista, competitivos en los ámbitos académico, industrial y de investigación tecnológica, así como participar en el fortalecimiento del posgrado y la investigación del SNEST.

3.2 Visión del CENIDET

El CENIDET es una institución clave en la consolidación del posgrado y la investigación en el SNEST, líder en la formación de investigadores e innovadores tecnológicos y aporta soluciones tecnológicas pertinentes, sustentables a problemas de su entorno, con amplio reconocimiento nacional e internacional en sus áreas de competencia.

3.3 Instalaciones

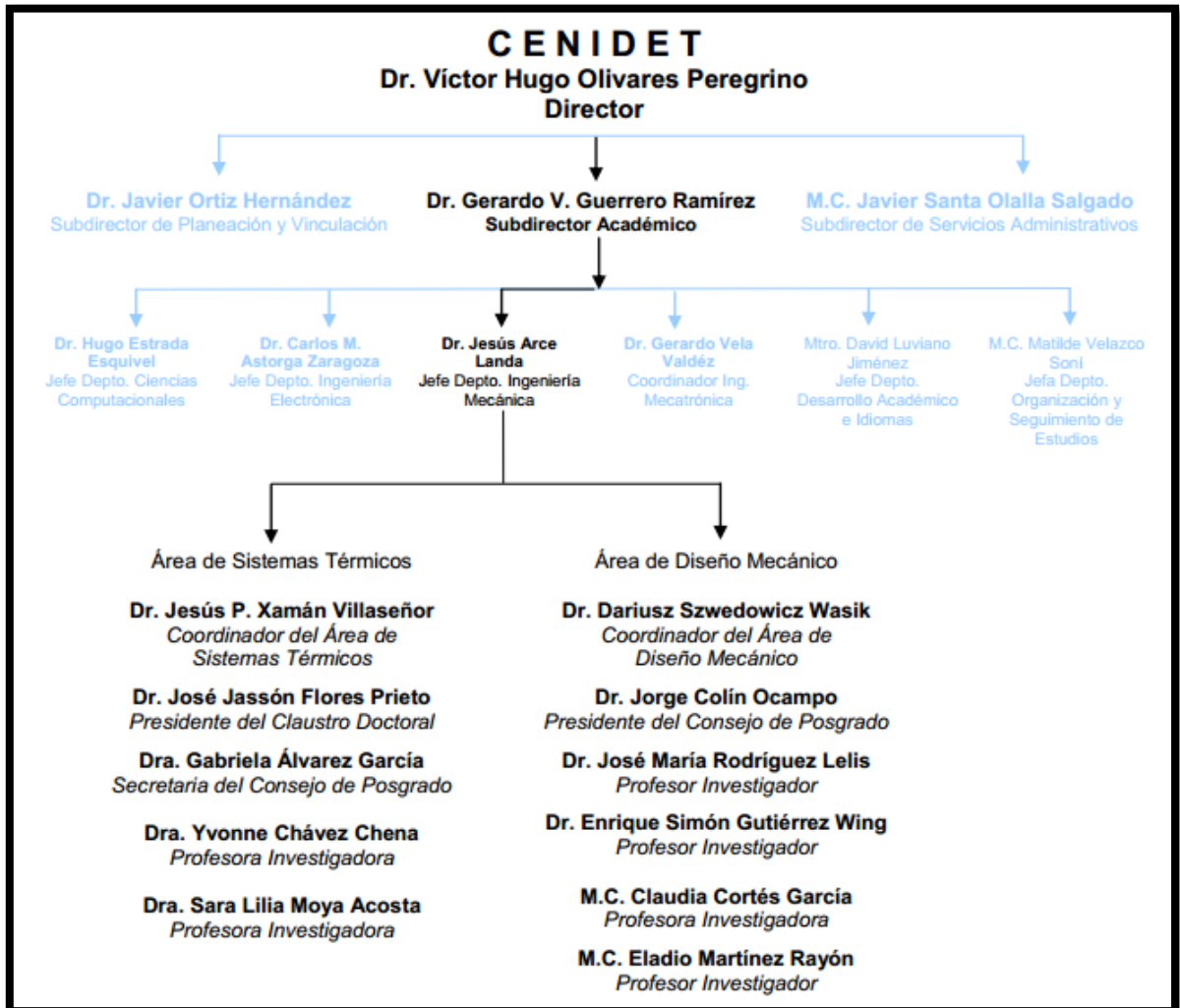
El CENIDET está dividido en dos campus, ambos en la vecindad del Internado Palmira, en el sur de Cuernavaca. El campus principal está situado en el Interior del Internado y es sede de las oficinas administrativas del CENIDET y de los Departamentos de Ciencias Computacionales e Ingeniería Electrónica.

El segundo campus está ubicado sobre la Avenida Palmira, a 200 mts., cuesta abajo de la puerta principal del Internado Palmira. Aquí se encuentran el Departamento de Ingeniería Mecánica (DIM) y la Coordinación de Ingeniería Mecatrónica.

El edificio principal del DIM aloja a las oficinas del Departamento, así como al centro de cómputo, los laboratorios de metrología y sistemas térmicos las aulas y los cubículos de investigadores y alumnos. Los laboratorios de diseño y de

tecnología solar están ubicados en edificios independientes.

3.4 Directorio



3.5 Departamento de Ingeniería Mecánica

Desde 1988 se ofrece el Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica y desde 1996 el Programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica. Ambos programas están incluidos en el Padrón Nacional de Posgrado (PNP) del CONACYT, lo que permite ofrecer becas a todos los estudiantes de tiempo completo.

Su objetivo principal es formar recursos humanos de alto nivel para realizar

investigación aplicada al desarrollo tecnológico en las dos líneas de investigación del Departamento.

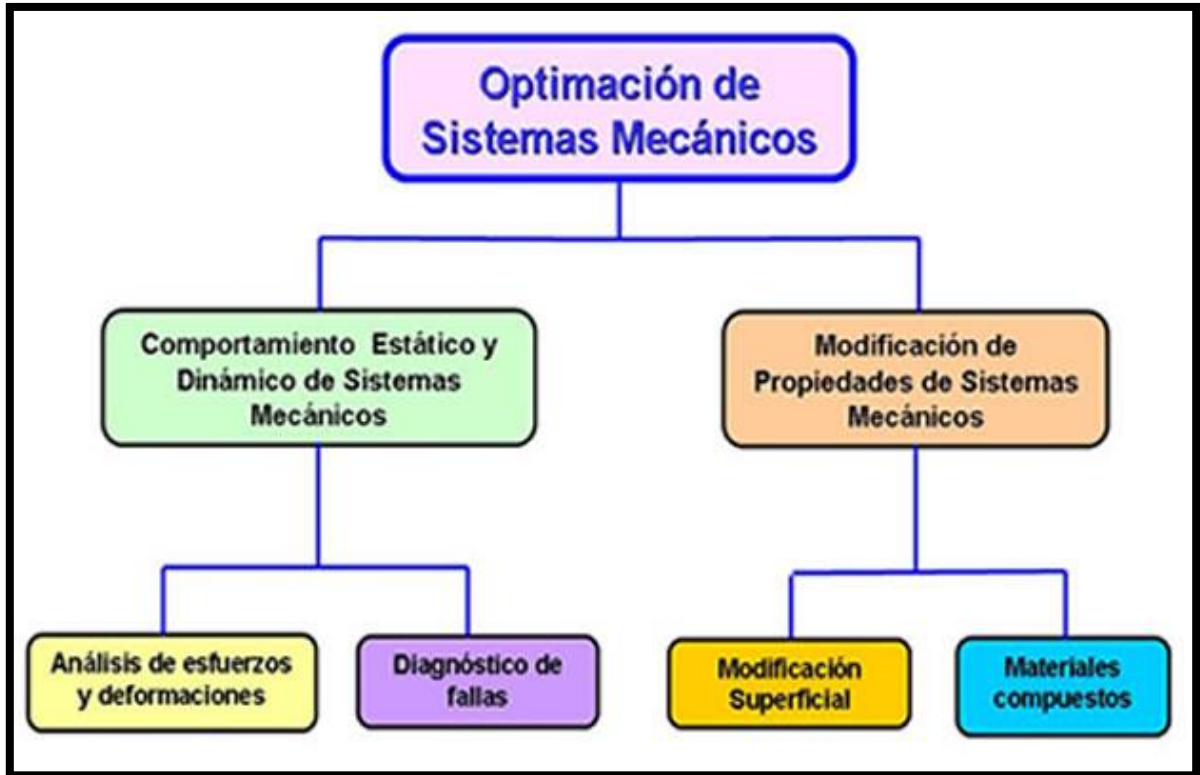
Los programas de posgrado están diseñados conforme a dos líneas de investigación: Diseño Mecánico y Sistemas Térmicos. El Jefe del Departamento es el Dr. Jesús Arce Landa.

3.5.1 Líneas de investigación

- Diseño mecánico

En años recientes, en el campo de Ingeniería Mecánica se ha manifestado una tendencia hacia requerimientos más estrictos de diseño que respondan a los nuevos estándares y normas nacionales e internacionales. Esto conlleva a la necesidad de crear sistemas mecánicos más modernos y complejos de sistemas mecánicos que utilicen nuevos y mejores materiales, con el objeto de obtener mejorar su desempeño y reducir su costo. La línea de investigación está asociada con el tópico de investigación "Optimación de sistemas mecánicos"

El tópico de investigación "Optimación de Sistemas Mecánicos" está dividida en dos sub-tópicos: "Comportamiento Estático y Dinámico de Sistemas Mecánicos" y "Modificación de Propiedades de Sistemas Mecánicos", los cuales se establecieron para responder a la necesidad de analizar conjunta y/o separadamente una amplia variedad de problemas existentes en el proceso de diseño, construcción o rediseño de máquinas y sistemas mecánicos, con sus elementos y uniones. Se abordan temáticas relacionadas con el análisis estático y dinámico de sistemas mecánicos, que han incluido estudios de elementos deformables en uniones mecánicas y de fenómenos de vibración, amortiguamiento, esfuerzos y deformaciones, como los causados por el impacto de componentes mecánicos; también se han abordado problemas de tribología como lo son el desgaste, la fricción y los ajustes de componentes mecánicos.



Con base en la organización actual del trabajo de investigación en el Departamento, es posible realizar contribuciones en campos complejos tales como el análisis y diseño de líneas tecnológicas, sistemas dinámicos, tribología y biomecánica.

En el trabajo de investigación, los investigadores y alumnos diseñan y construyen los sistemas experimentales que permiten determinar el comportamiento estático y dinámico de diferentes tipos de uniones de sistemas mecánicos, máquinas y mecanismos en distintas condiciones de operación. Normalmente se realiza la investigación en una serie de etapas, iniciando con modelos simples de elementos o sistemas mecánicos y posteriormente incrementando la complejidad del modelo, hasta aproximarse lo más posible a condiciones reales de operación. De esta manera los estudiantes pueden conocer no sólo los aspectos teóricos de los problemas atacados, sino también sus aspectos prácticos.

La experimentación comúnmente requiere diseñar estrategias de medición,

diseñar y construir piezas y bancos de prueba, desarrollar sistemas para la adquisición de datos e idear métodos para la interpretación de resultados experimentales. En el desarrollo de sus proyectos de tesis, nuestros estudiantes se involucran en estas actividades, lo cual les brinda una amplia gama de habilidades técnicas propias del trabajo de investigación.

Además del trabajo experimental que se realiza en nuestros laboratorios, parte de nuestro esfuerzo está dedicado al desarrollo de modelos numéricos de sistemas mecánicos. En la actualidad, la línea de Optimación de Sistemas Mecánicos ha profundizado en el uso del método de elementos finitos, ya que es una técnica versátil con amplias posibilidades de aplicación en problemas referentes a los procesos de diseño y rediseño de máquinas y de sus componentes.

Mediante el análisis de vibraciones se estudia también el comportamiento dinámico de componentes de máquinas y estructuras. Aplicaciones de importancia para la industria, como lo son el balanceo de rotores, la validación de modelos numéricos de componentes de máquinas a través de pruebas de vibración y análisis modal, la medición de niveles de vibración y la optimación de componentes de máquinas con base en sus características dinámicas, constituyen la base para el trabajo de investigación en el área de vibraciones mecánicas.

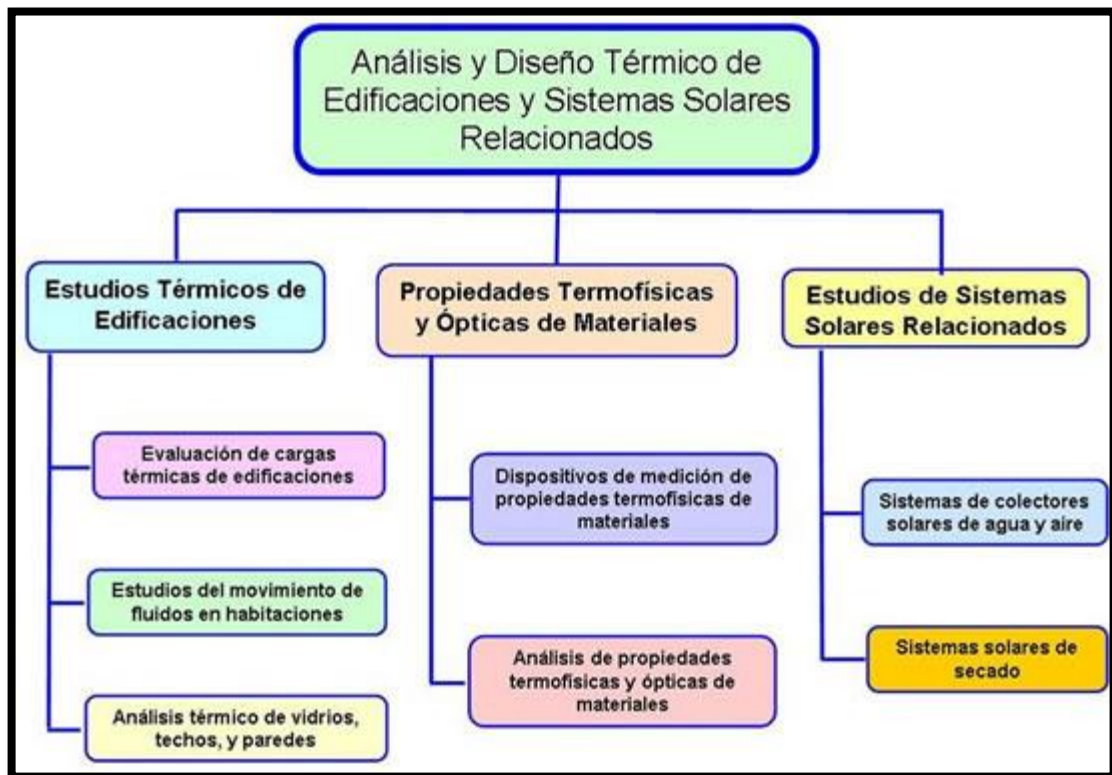
En esta línea de investigación, en apoyo a la industria nacional, también se trabaja en proyectos que desarrollan conocimiento experimental para el recubrimiento de superficies de equipo industrial expuesto a condiciones térmicas o de abrasión extremas. Mediante las técnicas desarrolladas en nuestro laboratorio se espera prolongar la vida útil de estos equipos y minimizar los tiempos muertos derivados de fallas.

Un área novedosa de aplicación de las investigaciones del Departamento, en la cual se utilizan elementos de las diversas disciplinas cultivadas en el grupo de Diseño Mecánico, es el diseño de elementos protésicos para cadera y rodilla, entre otros. Este trabajo ha involucrado desarrollos relacionados con la modificación de las propiedades superficiales de materiales y el diseño de nuevas

estructuras.

- Sistemas térmicos

Esta línea de investigación está asociada con el tópico de investigación "Análisis y diseño térmico de edificaciones y sistemas solares relacionados".



El consenso general de la comunidad que se dedica a los sistemas térmicos ha sido enfocado al campo de la energía. Un gran número de actividades y procesos desarrollados por el hombre involucran de una u otra forma el uso de la energía, en relación con el aprovechamiento y explotación óptima de los recursos energéticos. La dinámica de evolución de los sistemas térmicos permite analizar y resolver problemas complejos relacionados con los nuevos diseños enfocados al ahorro de la energía, tema de especial interés en la industria del país. Por lo anterior, esta segunda Línea de Investigación se ha dividido en tres sub-líneas: a) Estudios térmicos de edificaciones, b) Estudios de sistemas solares relacionados, y c) Propiedades termofísicas y ópticas de materiales. Las primeras dos comprenden tópicos como: ahorro de energía en edificaciones, desarrollo y

estudios de sistemas térmicos alternos para ahorrar energía fósil y reducción de la contaminación ambiental en sistemas relacionados. Los tópicos de investigación comprendidos en la tercer sub-línea son: desarrollo de aparatos para medir propiedades térmicas de materiales y fluidos, medición de propiedades térmicas y medición de propiedades ópticas.

Ambas Líneas de Investigación del Programa de Ingeniería Mecánica han ido consolidándose paulatinamente desde sus inicios y han contribuido de forma general en el desarrollo de normas nacionales, asesorías a gremios, desarrollo de proyectos para industriales, colaboraciones con otras instituciones como el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), el Centro de Investigación en Energía (CIE) de la UNAM, la Facultad de Arquitectura de la UNAM, la Comisión Nacional de Ahorro de Energía, el Instituto Tecnológico de Zacatepec, estancias técnicas en ABB Turbo Systems (The Termal Machinery Laboratory en Baden, Suiza) y en el Lawrence Berkeley Laboratory, entre otras. En general, los esfuerzos de ambas líneas de investigación se han canalizado hacia la vinculación con todas las actividades que propicien y amplíen el conocimiento y la creatividad en el campo de Ingeniería Mecánica. Tales esfuerzos no sólo han fructificado en el ámbito nacional sino que también han impactado internacionalmente mediante la propagación de su producción científica y tecnológica a través de la publicación de artículos en revistas especializadas de reconocido prestigio internacional. También se ha realizado el reconocimiento de la calidad de los alumnos por medio de la obtención de premios en diferentes ocasiones dentro del Concurso de Creatividad de la DGIT y los Premios Juveniles de la Ciencia en los años 1998 y 1999. Lo anterior ha corroborado el impacto de los trabajos que desarrollan nuestros estudiantes.

3.6 Localización del CENIDET

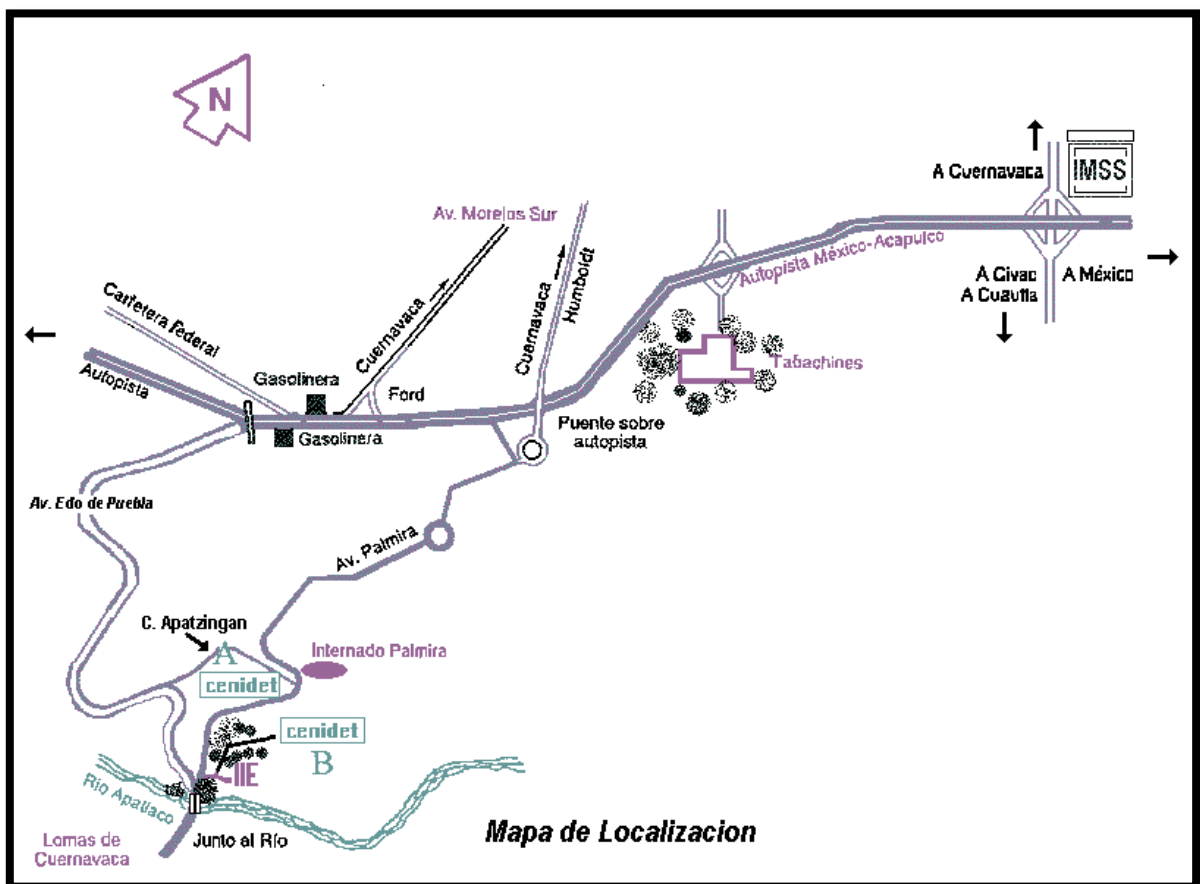
El Centro Nacional de Investigación (CENIDET) se encuentra en la siguiente dirección:

Interior Internado Palmira s/n, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Mor.

Algunos sitios de referencia útiles para llegar al CENIDET son los siguientes:

- A un lado del Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Cerca de la terminal Guacamayas de la Ruta 1 de autobuses colectivos.
- Dentro del Internado Palmira.

El teléfono del CENIDET es el 01(777) 362-7770 con 10 líneas, para el fax marcar 01(777) 362-7795.



4 ALCANCES Y LIMITACIONES

4.1 Alcances

El fin del proyecto es realizar un modelo matemático representativo para la chimenea solar.

Construir un prototipo de la chimenea solar que cumpla con las exigencias propuestas por la empresa NISSAN.

Al mismo tiempo, proponer relaciones matemáticas que involucren a las propiedades necesarias para el análisis en términos de las temperaturas conocidas.

4.2 Limitaciones

Adicionalmente, se contempla realizar la instalación del prototipo de chimenea solar en planta. Sin embargo, esto queda totalmente a disposición del tiempo que dispongan los responsables de la planta NISSAN Cuernavaca.

5 FUNDAMENTO TEORICO

5.1 Antecedentes históricos

Existe una amplia variedad de sistemas de ventilación natural encontrados en la literatura. Torres de ventilación solar, paredes Tromble, doble fachadas, y la chimenea solar son ejemplos entre algunos otros.

Las torres de ventilación solares son apropiadas para áreas donde las construcciones son bajas y la velocidad del viento es suficientemente fuerte para producir ventilación. Las paredes Tromble pueden usarse para ventilar construcciones, pero su principal uso es para calefacción pasiva. La ventilación natural e incluso la intensidad luminosa al interior de las construcciones pueden ser controladas por dobles fachadas. Las chimeneas solares son dispositivos pasivos que pueden adaptarse a las construcciones, pero deben ser instaladas apropiadamente de modo que la radiación debe afectar la placa de absorción sin ninguna sombra para producir suficiente energía de ventilación natural.

Desde 1970, debido a la necesidad de ahorrar energía, los sistemas de ventilación natural se han convertido en el tema de estudio de muchos investigadores, y diferentes estudios teóricos y experimentales han sido publicados.

5.1.1 Estudios teóricos

Bansal et al. Desarrollaron un modelo matemático estable para una chimenea solar que consistía de un calentador de aire solar conectado a una chimenea común. Combinaron las ecuaciones de la tasa de flujo de aire de la chimenea y las ecuaciones del balance de energía para un absorbedor solar convencional y todo derivó en una ecuación para la distribución de la temperatura del aire.

Andersen obtuvo una serie de fórmulas para predecir la ventilación natural en una habitación con aberturas pequeñas. Hamdy y Fikry examinaron el ángulo de inclinación de un colector solar conectado a una chimenea convencional y demostraron que el ángulo óptimo era de 60°.

Aboul Naga y Abdrabboh presentaron una investigación teórica en un sistema de calefacción solar combinado pared-techo para mejorar la ventilación nocturna. Sus resultados mostraron que el flujo de aire es 3 veces más que el flujo de un calentador solar de techo con un máximo de $2.3 \text{ m}^3/\text{s}$ para una pared de 3.45 m de altura.

5.1.2 Estudios experimentales

El rendimiento térmico de las chimeneas solares usando distintas configuraciones ha sido experimentalmente investigado por diferentes investigadores. Uno de los estudios más completos en una chimenea a gran escala realizado bajo condiciones de laboratorio fue llevado a cabo por Bouchair. Las dimensiones de la chimenea fueron de 2 m de altura, 3 m de ancho, profundidad variable (entre 0.1-1 m) y 2 valores a la entrada (0.1m y 0.4 m de alto). La chimenea era parte de un cuarto de 12m^3 . Bouchair obtuvo una tasa óptima del flujo de aire para una relación de aspecto de 10 (altura/profundidad). Se informó de flujo inverso si la profundidad de la cavidad era más grande que 0.5 m; este hecho fue observado por inyección de humo a la chimenea. Un modelo dinámico fue implementado por Bouchair para hacer un estudio paramétrico y obtener un espesor óptimo para la pared de absorción (0.1-0.15 m).

La ventilación de chimeneas solares mediante el uso de distintas técnicas de abastecimiento de energía al sistema, y mediante el uso de diferentes configuraciones geométricas también ha sido investigada por distintos investigadores. Por ejemplo, Ong y Chow construyeron una chimenea solar con las siguientes especificaciones: 2 m de alto, 0.48 m de ancho y 1.02 m de profundidad; ellos encontraron que la tasa del flujo de masa varía con la radiación solar. Los resultados experimentales sirvieron para validar un modelo previo basado en un circuito de la red térmica desarrollado por Ong.

Chen et al., investigaron el rendimiento térmico de una chimenea solar; para ángulos (15° , 30° , 45° y 60°) y 5 flujos de calor ($200\text{-}600 \text{ W/m}^2$), estos flujos se analizaron en lapsos de 100 W/m^2 . Las dimensiones fueron 1.5 m de alto, 0.62 m

de ancho y profundidad variable (0.1-0.6 m). Para este estudio, una relación de aspecto óptimo no fue encontrado; sin embargo, una tasa de flujo de aire máxima fue obtenida para 0.2 m de profundidad, 1.5 m de alto, 45° de inclinación y una irradiación de 400W/m².

Khedari et al., llevaron a cabo un estudio experimental sobre los rendimientos térmicos de chimeneas solares acopladas a un cuarto de 25 m³ y equipado con aire acondicionado. Ellos probaron 2 chimeneas solares: la RSC y la MTW. Los resultados mostraron que el 30% de la energía puede ser ahorrada por el uso de una chimenea solar combinada con el aire acondicionado.

Emad condujo una investigación experimental para estudiar los cambios en la temperatura del aire dentro de una estructura metálica de la construcción. Dos gabinetes de 1 m³ fueron construidos y examinados bajo operación y condiciones climáticas similares. Una de las cabinas fue mantenida como referencia y la otra recibió modificaciones usando 5 diferentes técnicas pasivas solares para lograr enfriamiento tal como: pintar el techo de blanco, aislar el techo, utilizar un estanque de agua en el techo, enfriamiento evaporativo y también una chimenea solar. Las temperaturas internas de las 2 cabinas fueron medidas, y los mejores resultados fueron obtenidos por el enfriamiento evaporativo y la chimenea solar; en ambos casos, las temperaturas interiores fueron reducidas considerablemente. El autor concluyó que usando una chimenea solar como un sistema pasivo no solo reduce la temperatura interior de un espacio, sino que también mejora la tasa de ventilación de aire.

Burek y Habeb realizaron un estudio experimental de un canal vertical simulando una chimenea solar y una pared Tromble. El canal vertical tiene una cubierta transparente y una placa de absorción, pintada de color negro mate. El canal fue abierto por ambos extremos, y sus dimensiones eran: 1.025 m de alto, 0.925 m de ancho y profundidad variable de 0.02-0.11 m. El calor a la entrada a la placa de absorción fue suministrada por medios eléctricos (200-1000 W) en intervalos de 200 W. La temperatura del aire y la velocidad medidos dentro del canal fueron

obtenidos. Los resultados mostraron que la temperatura del aire se incrementó continuamente a lo largo de la altura del canal, mientras que la cubierta y la placa de absorción no lo hicieron. La temperatura de la cubierta así como la de la placa de absorción incrementaron continuamente hasta la mitad de la altura y entonces comenzaron a disminuir, como fue reportado por Hirumlab et al. Los autores concluyeron que la tasa de flujo másico depende del calor de entrada así como de la profundidad del canal, mientras que la eficiencia del sistema depende del calor de entrada solamente.

5.1.3 Estudios teórico-experimentales

Afonso y Oliveira compararon el comportamiento de una chimenea solar con una convencional. Presentaron un modelo térmico y la simulación transitoria de una chimenea solar mediante la aplicación de un modelo de diferencias finitas a la pared de ladrillo de la chimenea suponiendo estado inestable de transferencia de calor unidimensional en la dirección de la pared de ladrillo y no a lo largo del flujo. Derivaron una ecuación de velocidad de flujo volumétrico como una función de la diferencia de las temperaturas entre el exterior y la salida de la chimenea teniendo en cuenta las áreas de la entrada y de la salida. En la simulación, los coeficientes de transferencia de calor a lo largo de la chimenea fueron variados durante el día debido al aumento de la temperatura por la absorción de calor solar. Dos chimeneas fueron construidas, una solar y otra convencional. Midieron las tasas de flujo de aire en las dos chimeneas, con una técnica de gas indicador para comparar satisfactoriamente con su simulación. Sus resultados demostraron que había un incremento significativo en la tasa de ventilación con la chimenea solar y que un incremento en lo ancho de la chimenea es más efectivo que un incremento en la altura de la chimenea.

Un estudio experimental y teórico sobre una pared solar metálica de una chimenea (MSW) fue realizado por Hirumlab et al. El MSW fue construido e instalado en la pared sur de un cuarto de 31 m³, las dimensiones de la chimenea fueron variadas de 1 a 2 m de altura, 0.1-0.145 m de profundidad y 1 m de ancho.

La ventilación óptima fue alcanzada para las dimensiones de 2 m de alto y 0.145 m de profundidad. Un sistema similar acoplado a un cuarto de 25 m³ fue estudiado por Khedari et al., los sistemas eran: colector solar de techo (RSC), la pared Tromble modificada (MTW), la pared Tromble (TW) y la pared solar metálica (MSW). Los resultados mostraron que la temperatura del aire de la habitación fue disminuyendo entre 3° a 6°C usando este sistema pasivo, de modo que la ventilación natural fue mejorada.

5.2 Desarrollo bibliográfico

En países con un clima cálido y húmedo existe una enorme dependencia de la electricidad para utilizar aires acondicionados que proveen al ser humano confort en las áreas urbanas. En las zonas rurales o donde no tienen servicio eléctrico, el enfriamiento por ventilación pasiva proveniente del viento o convección natural juegan un papel muy importante. La ventilación del viento es afectada por tener los techos altos e inclinados y también por las grandes aberturas de puertas y ventanas que se localizan de frente a la dirección de los vientos dominantes. El enfriamiento pasivo se obtiene con ayuda de una chimenea solar.

El término de ventilación pasiva hace referencia a la forma de acondicionar un área determinada a través de medios naturales, esto implica que se dejen de lado medios convencionales de ventilación y que a la vez se deje a un lado los combustibles fósiles, energía eléctrica, etc.

La ventilación pasiva es un término común en temas relacionados con la climatización y el intercambio de aire, y como ya se mencionó, se refiere a aquella ventilación que deja se olvida de los métodos convencionales y los intercambia por métodos naturales, en este caso, el aprovechamiento de la energía solar.

En su forma más simple la ventilación natural implica permitir el ingreso y la salida del viento en los espacios interiores de los edificios, una estrategia conocida como ventilación cruzada. Sin embargo esto no siempre es factible, ya sea porque el viento es demasiado débil o por que la configuración de los edificios reducen

significativamente su fuerza. Por otro lado, las condiciones del aire exterior, como la temperatura, la humedad relativa y el nivel de pureza no son siempre adecuadas.

El movimiento del aire obedece casi siempre a fenómenos convectivos, los cuales a su vez derivan de desequilibrios térmicos provocados por la distribución desigual de la energía calorífica, principalmente relacionada con la radiación solar. Los vientos dominantes en el sitio son flujos de aire generados a gran escala por estos fenómenos. En la escala de un edificio, se puede afirmar que la ventilación natural suele basarse en dos estrategias básicas: la captación y el aprovechamiento de los vientos del sitio, y la generación de fenómenos convectivos a pequeña escala. Existen sistemas de ventilación natural que emplean ambas estrategias. Los tipos de ventilación se pueden agrupar de la siguiente manera:

- Ventilación cruzada: es la estrategia más simple para lograr la ventilación natural, si las condiciones del entorno lo permiten. Esta estrategia consiste en generar aberturas estratégicamente ubicadas para facilitar el ingreso y salida del viento a través de los espacios interiores de los edificios, considerando de manera adecuada la dirección de los vientos dominantes. Siendo más precisos, la ventilación cruzada implica generar aberturas en zonas de alta presión y baja presión del viento.
- Ventilación vertical: la característica común de los sistemas de ventilación vertical es que involucran el uso de espacios o dispositivos de altura considerable, generalmente bastante mayor que la de los espacios anexos a los que sirven, que refuerzan los flujos verticales de aire en el interior de los edificios.
- Torres captadoras: las torres captadoras reciben este nombre porque su cometido principal es captar los flujos de aire y conducirlos al interior del edificio. En su forma más simple, consiste en un dispositivo que se eleva sobre las cubiertas del edificio y las obstrucciones del entorno, generando en su parte superior una abertura orientada hacia la dirección de donde provienen los vientos dominantes. En muchos casos las torres captadoras

de viento se utilizan en conjunto con otras estrategias, como el enfriamiento evaporativo y la masa térmica expuesta, para mejorar su eficiencia y evitar problemas relacionados principalmente con las elevadas temperaturas diurnas del exterior.

- Torres de extracción: tienen una configuración similar al de las torres captadoras, sin embargo, su funcionamiento es todo lo contrario. Estas torres generan bajas presiones de viento para extraer el aire caliente del edificio y propiciar con esto la entrada de aire fresco.
- Chimeneas de ventilación: es un error común confundir las torres captadoras y de extracción con las chimeneas de ventilación. Aunque comparten muchas características, en estas últimas los gradientes de temperatura en su interior, y sus respectivos movimientos convectivos tienen mayor relevancia. Sin embargo, en los edificios este fenómeno solo puede ser aprovechado de manera eficiente por medio de dispositivos conocidos como chimeneas solares, o bien mediante configuraciones del tipo atrio.

El término de atrio hace referencia a un espacio central de varios niveles de altura, rodeado de espacios habitables y protegido por una cubierta que en ocasiones es transparente. Una de las funciones de los atrios, cuando la cubierta es transparente, es la captación de radiación solar durante el invierno, propiciando el calentamiento de los espacios interiores. Estos espacios también pueden emplearse si se diseñan de manera adecuada para propiciar una ventilación natural más adecuada durante el verano. Los atrios pueden aprovechar las presiones del viento en la parte superior del edificio, tal como lo hacen las torres captadoras y de extracción. Sin embargo en este caso cobra gran relevancia un fenómeno conocido como efecto chimenea.

El efecto chimenea se produce debido a la diferencia en las densidades del aire exterior y el aire interior de los edificios, diferencia que a su vez se deriva de la variación en la temperatura y el nivel de humedad del fluido, ya que el aire caliente es menos denso que el aire frío, dado un mismo nivel de

humedad, mientras que el aire húmedo es menos denso que el aire seco dada una misma temperatura. Como resultado, si el aire al interior es más caliente y húmedo, será más denso, y por lo tanto tiende a subir y salir por las aberturas en la parte superior. Al mismo tiempo se produce una depresión que propicia el ingreso de aire fresco a través de las aberturas inferiores para completar un ciclo continuo de ventilación. Mientras más elevado sea el espacio, y mayor la diferencia higrotérmica (adecuación de la temperatura y la humedad a las condiciones de confort), más fuerte será este fenómeno.

Un punto crucial en su funcionamiento es la adecuada configuración de las aberturas superiores, de tal manera que permitan aprovechar las presiones del viento para hacer más intenso el efecto de extracción del aire caliente. Al mismo tiempo se debe cuidar que estas aberturas no permitan que el aire, sobre todo cuando el aire es fuerte, sea conducido al interior invirtiendo el funcionamiento y regresando el aire caliente a los espacios habitables.

- Ventilación más recursos adicionales: en ocasiones las estrategias anteriores no son suficientes para lograr adecuadas tasas de flujo de aire al exterior. Esto debido a la presencia de vientos débiles e inconstantes. Además es posible que las condiciones externas no sean favorables. Entonces se hace necesario la presencia de estrategias adicionales para que la ventilación pueda ser aprovechada como un medio de enfriamiento pasivo.
- Ventilación más enfriamiento evaporativo: el enfriamiento evaporativo se produce cuando un líquido, en este caso agua, pasa del estado líquido al gaseoso. Dado que se trata de un fenómeno que requiere cierta cantidad de energía calorífica, y que dicha energía solo puede tomarse del entorno inmediato, provoca que el aire circundante ceda parte de su calor y disminuya su temperatura. La energía absorbida por el vapor de agua permanecerá en un estado conocido como calor latente hasta que vuelva a condensarse. El enfriamiento evaporativo se puede presentar mediante

técnicas como la de patios “húmedos”, enfriamiento evaporativo en torres captadoras y mediante dispositivos aspersores.

- Ventilación más masa térmica: la ventilación natural eficiente puede emplearse en conjunto con sistemas constructivos de elevada masa térmica para mejorar su efecto de enfriamiento. Esta estrategia es especialmente efectiva en lugares con importantes oscilaciones diarias de temperatura, es decir, donde se tienen temperaturas elevadas durante el día (cercano o superior a los 40 ° C) y relativamente bajas durante la noche (20-25°C).

Durante la noche la ventilación natural es permitida y potenciada en el interior de los edificios. Los flujos de aire fresco del exterior ayudan a enfriar los cerramientos de elevada masa térmica, de tal manera que éstos descargan su energía calorífica y disminuyen su temperatura de manera considerable. Al día siguiente, ya descargados de buena parte de su energía calorífica, los cerramientos con elevada masa térmica pueden funcionar como una esponja térmica, es decir, que son capaces de absorber una parte significativa del calor que se genera en el interior del edificio.

- Ventilación más radiación solar: la radiación solar puede ser empleada para hacer más eficiente el uso de la ventilación natural como medio de enfriamiento. Esta estrategia es implementada mediante dispositivos conocidos como chimeneas solares.

Las chimeneas solares son fundamentalmente una variación de las torres de extracción, se distinguen en que las chimeneas solares utilizan la radiación solar para hacer más eficiente su funcionamiento, o para reducir la altura de las torres. La estrategia consiste en hacer que una parte de la torre tenga la capacidad de absorber importantes cantidades de radiación solar. Entre las variaciones básicas para conseguir esto se encuentra el uso de superficies vidriadas y/o láminas delgadas pintadas de color negro. Estas superficies al absorber la radiación solar y transmitir la energía calorífica al interior de la chimenea, calientan aún más el aire que asciende por ella, reforzando sus movimientos convectivos por diferencia de

presiones. El resultado es una extracción de aire más eficiente. Como ya se hizo mención con anterioridad, en estos sistemas es importante no permitir que los flujos se inviertan.

Una chimenea vertical convencional funciona bajo convección natural cuando la temperatura del aire interior de la chimenea es más caliente que la del aire exterior. El flujo de aire térmicamente inducido depende de la diferencia de la densidad del aire interior y exterior de la chimenea. Como ya se hizo mención, al haber una diferencia de densidad, el aire dentro de la chimenea tiende a ascender y salir por la parte superior, esto también provoca una diferencia de presiones haciendo que entre aire del espacio a ventilar por la parte inferior, esto logra que se haga un ciclo de ventilación.

Una chimenea solar se compone de una o más paredes, hechas de vidrio transparente. Estas paredes transparentes son expuestas a la radiación solar y el interior de la chimenea absorbe la energía del sol, calentando el aire en el interior de la chimenea y provocando el proceso de cambio de densidad que genera la convección natural. La chimenea solar se usa para proveer ventilación a las edificaciones y se coloca en lo alto de las mismas.

6 CHIMENEA SOLAR

6.1 Modelo físico

La chimenea estudiada consiste en una lámina metálica pintada totalmente de color negro mate, que funciona como cuerpo negro para poder captar la mayor cantidad de radiación solar.

Esta lámina está rodeada por 4 paredes de vidrio transparente especial liso de 5mm y tratado térmicamente mediante el proceso de templado. Este vidrio posee una mayor resistencia a los impactos, lo cual asegura mayores índices de seguridad, cosa que es de vital importancia para la empresa en donde se instalará esta chimenea.

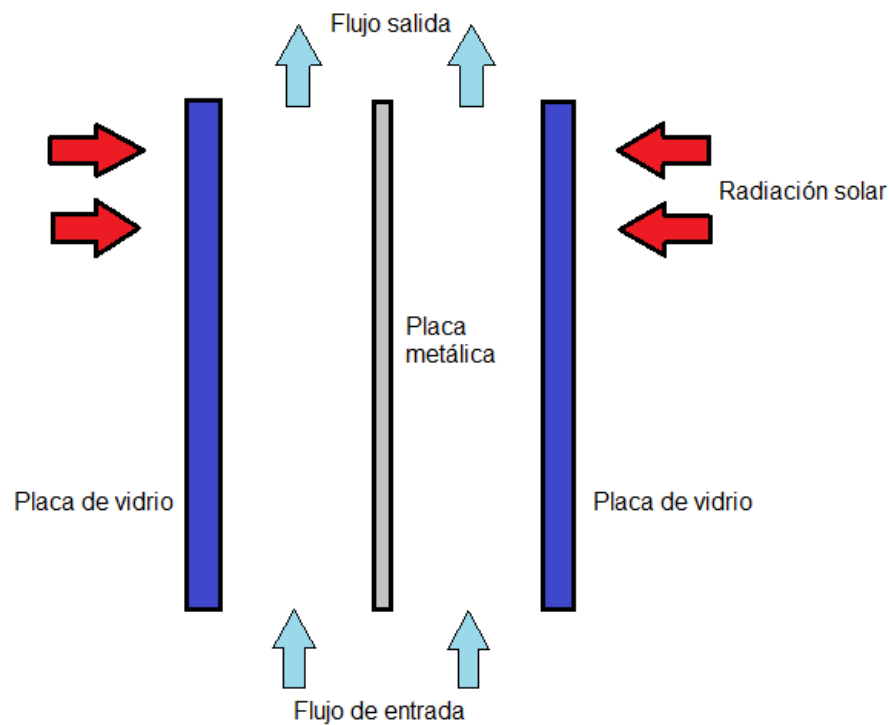


Figura 1. Configuración de las placas que conforman la chimenea solar

En la cavidad formada por la placa de metal y la placa de vidrio pasa aire que en principio proviene del interior de la edificación o área a ventilar, además la

chimenea está diseñada para ser colocada en la parte superior de la edificación, lo que hace que el aire entre en la parte inferior de la chimenea y sea expulsado por la parte superior.

El calor absorbido entre la placa de vidrio y la placa metálica queda atrapado en su gran mayoría, calentando el aire que pasa a través de la chimenea y por lo tanto disminuyendo su densidad. La diferencia de densidades ocasiona que se presente el principio de flotabilidad, que es muy importante para que la convección natural ocurra. Una vez la convección ha comenzado, el aire que entra por la parte inferior es absorbido hasta ser expulsado por la parte superior de la chimenea. Así, la ventilación ocurre.

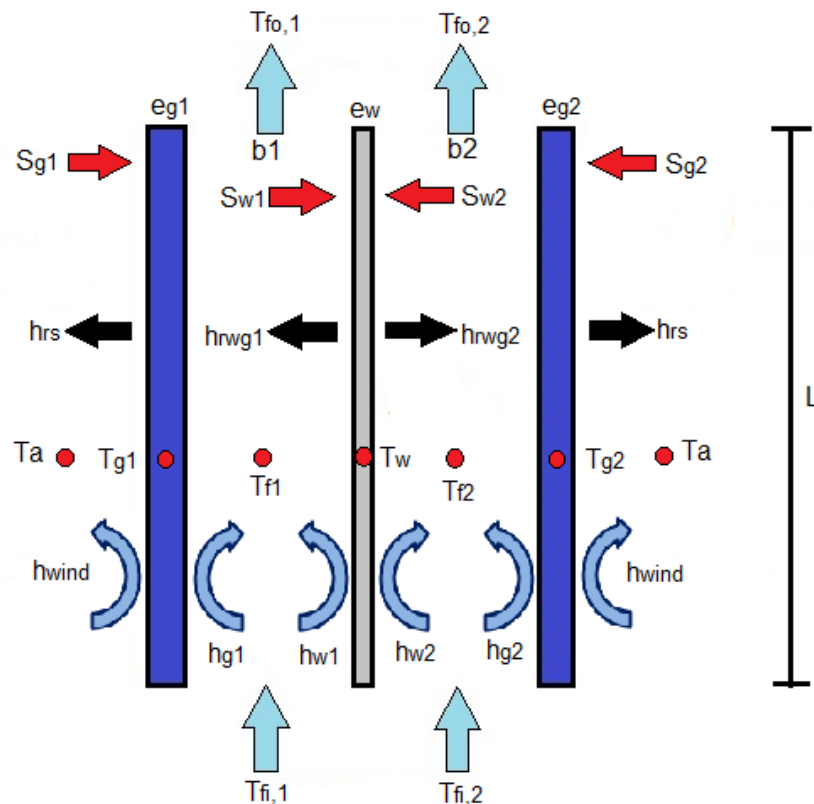


Figura 2. Fenómenos de transferencia de calor presentes sobre las placas

La chimenea se compone de 3 módulos, esto se hace con la finalidad de permitir el fácil acceso al sistema en caso de darle algún tipo de mantenimiento cuando la

chimenea se encuentre instalada.

Los módulos 1 y 2 prácticamente son idénticos, tal como se muestra en la siguiente Fig. 1. El módulo 3 es la parte superior de la chimenea (Fig. 2) y sobre esta se coloca un extractor de aire industrial.

Los módulos 1 y 2 prácticamente son idénticos tal como se muestra en la siguiente imagen:

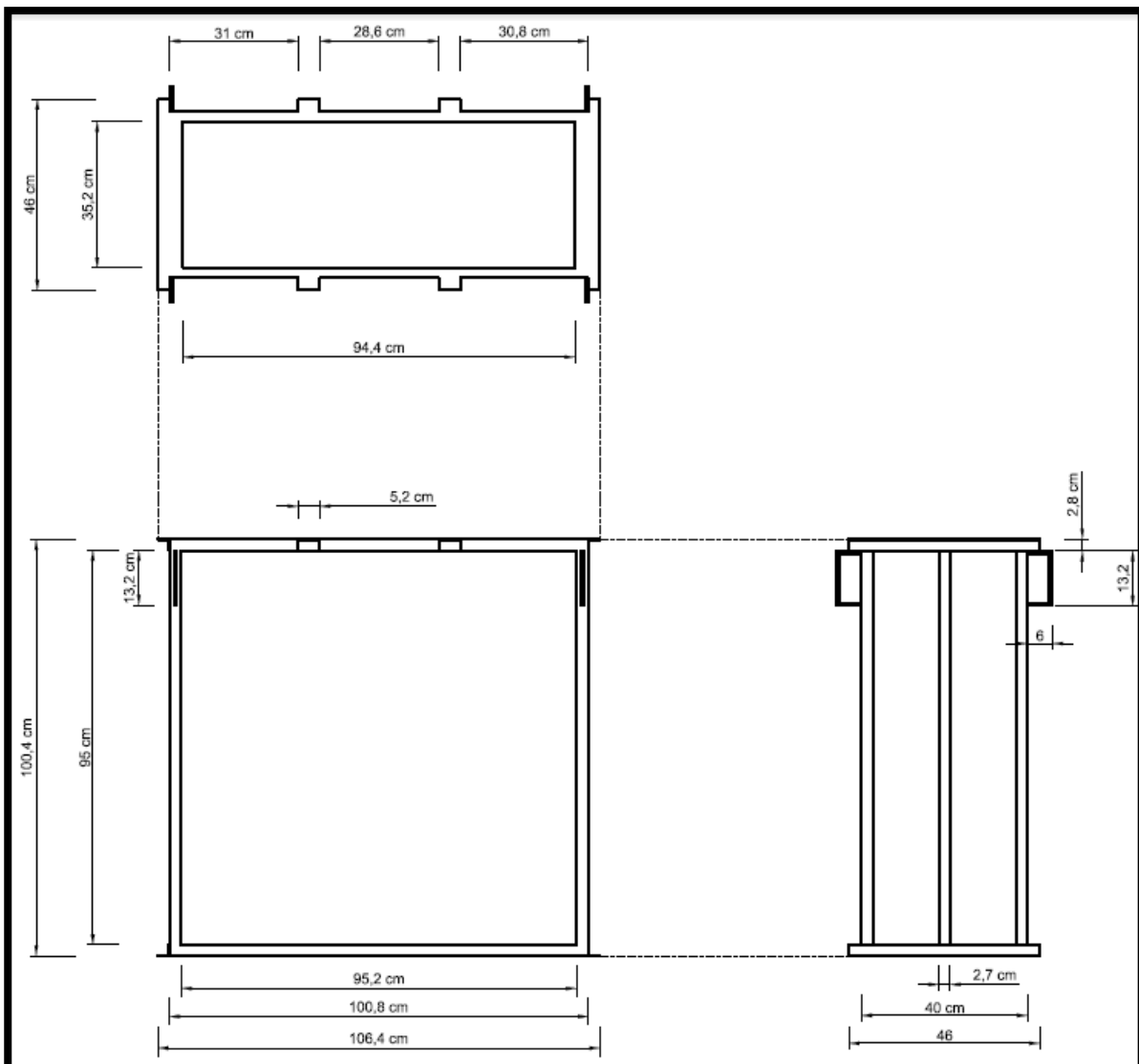


Figura 3. Perspectivas de los módulos inferiores de la chimenea solar.

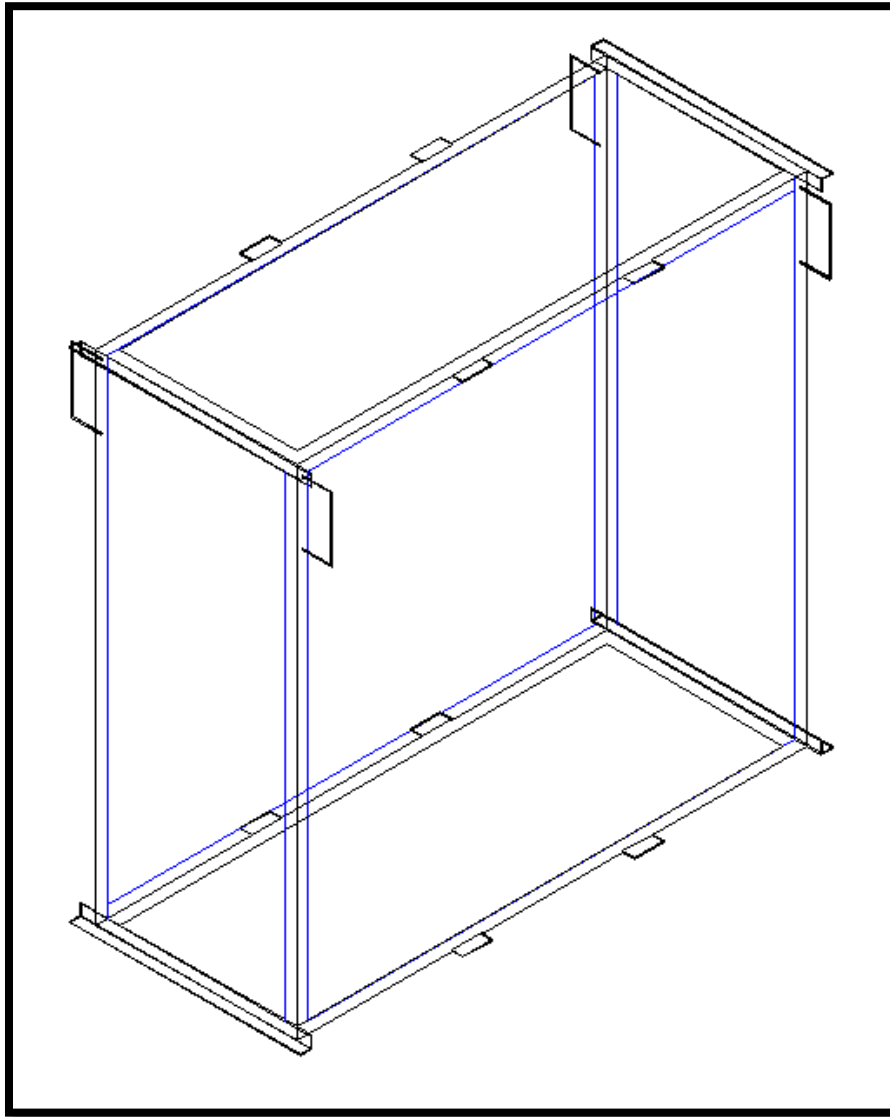


Figura 4. Figura isométrica de los módulos inferiores de la chimenea solar.

El tercer módulo, o parte superior de la chimenea se muestra en las siguientes 2 figuras:

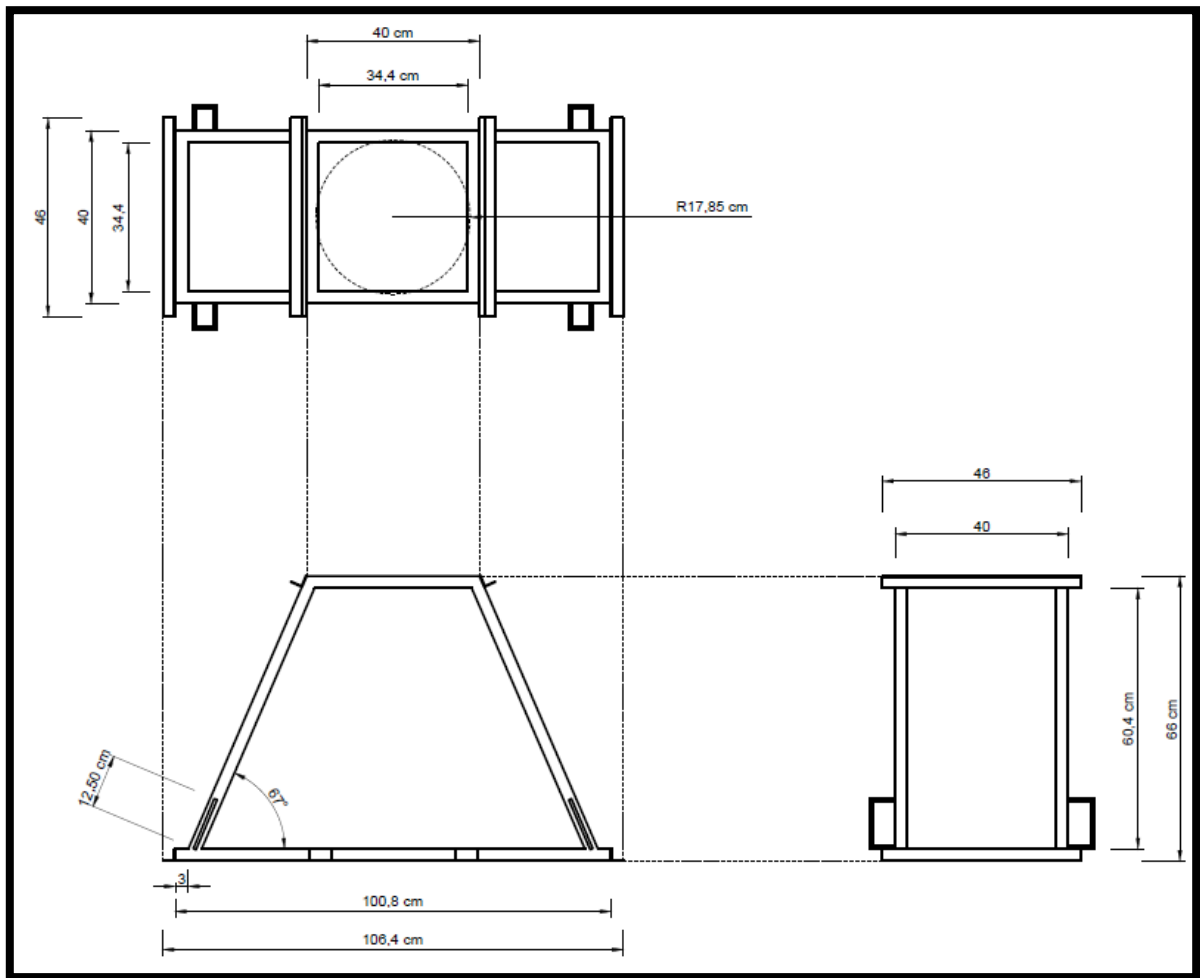


Figura 5. Perspectivas del módulo superior de la chimenea solar

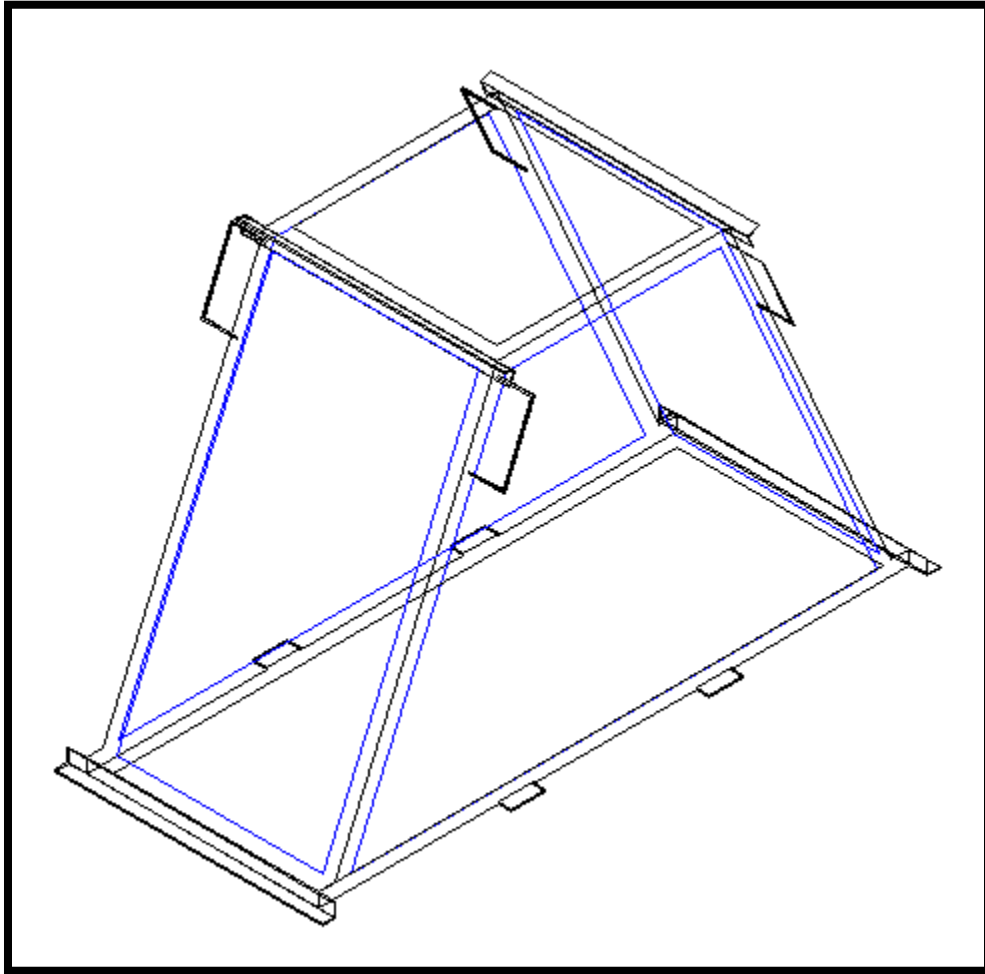


Figura 6. Figura isométrica del módulo superior de la chimenea solar

Los 3 módulos se montan uno sobre otro para formar la estructura final que será la chimenea solar:

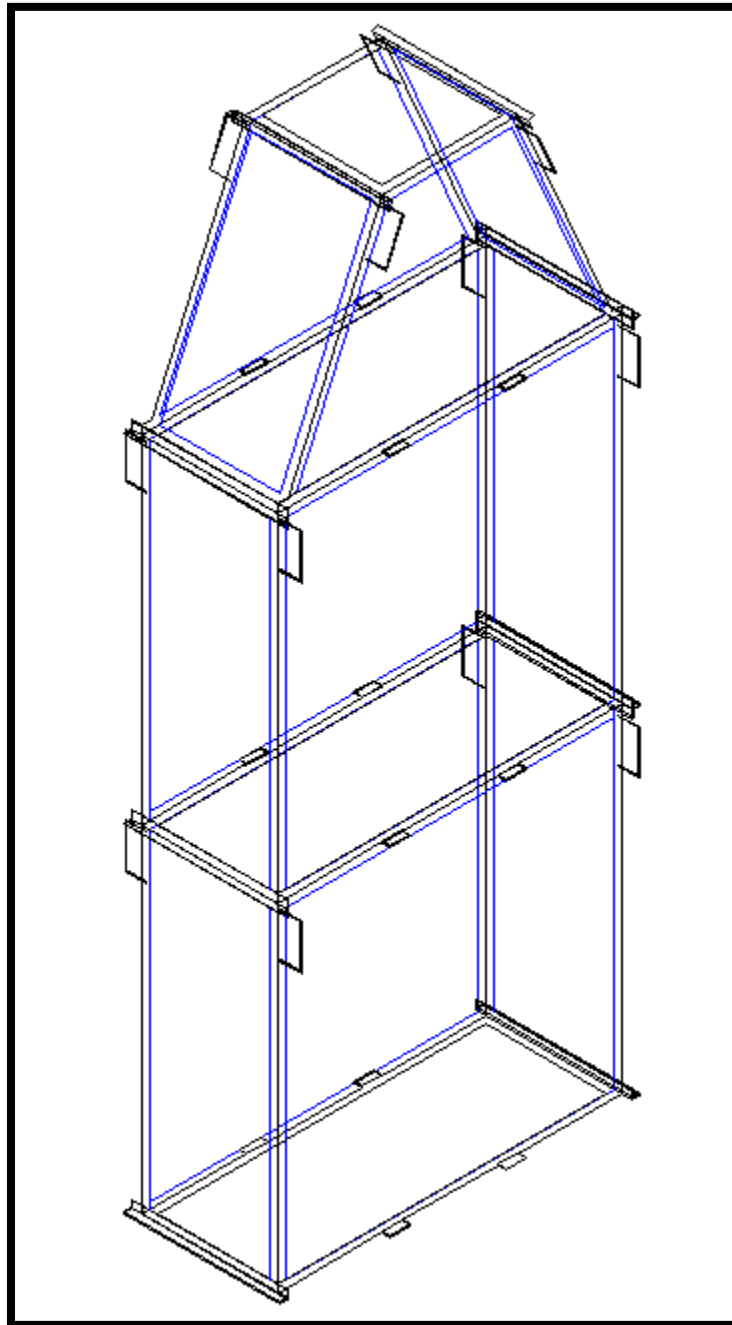


Figura 7. Figura isométrica de la chimenea solar

6.2 Modelo matemático

Para el análisis de la chimenea solar se plantea un modelo matemático en estado transitorio en base al modelo físico. Para realizar el análisis se realiza una analogía eléctrica que facilita el análisis:

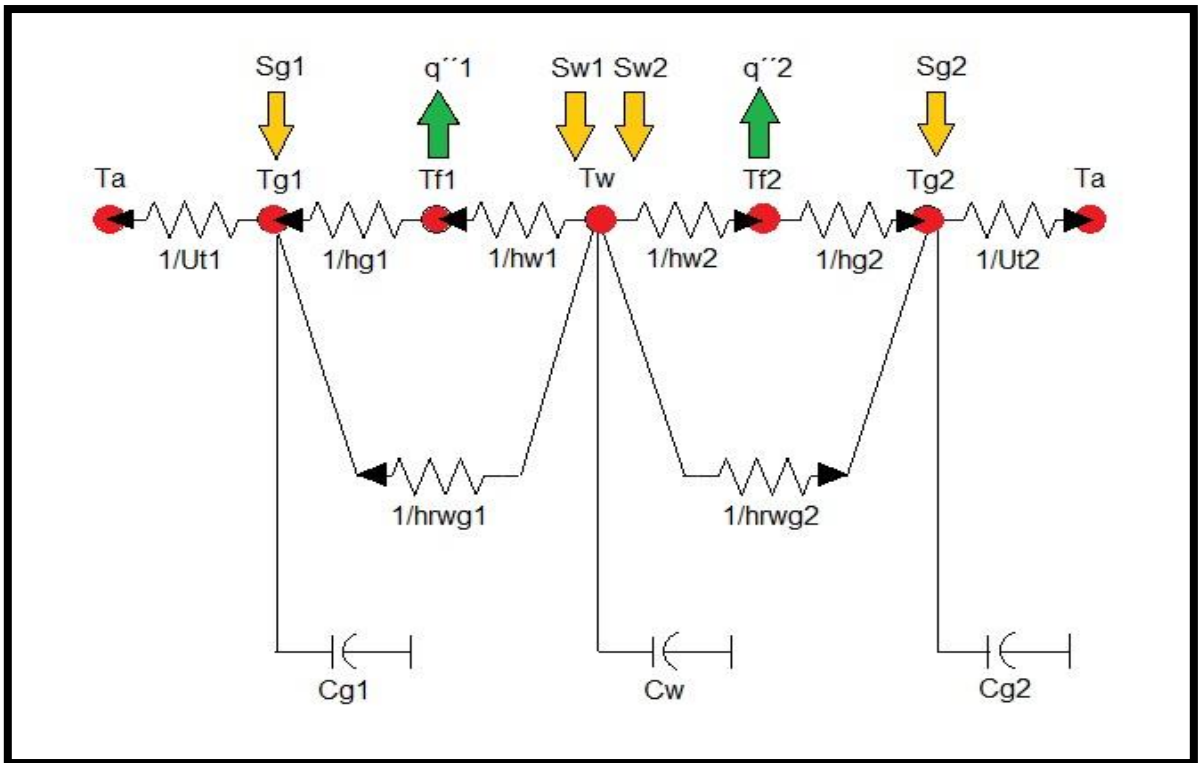


Figura 8. Configuración de la chimenea solar en estado transitorio (analogía eléctrica de los flujos de calor)

Aplicando un balance de energía a cada nodo, y aplicando el principio de conservación de la energía:

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g = \dot{E}_{out} + \dot{E}_{st}$$

Considerando que en para este sistema el término de generación de energía es cero, obtenemos las siguientes ecuaciones para cada nodo:

Para el nodo T_{g1} :

$$\begin{aligned}
 AS_{g1} + Ah_{g1}(T_{f1} - T_{g1}) + Ah_{r_w g1}(T_w - T_{g1}) &= AU_{t1}(T_{g1} - T_{a1}) + (\rho CV)_{g1} \frac{\partial T_{g1,i}}{\partial t} \\
 (-Ah_{g1} - Ah_{r_w g1} - AU_{t1})T_{g1} + (Ah_{g1})T_{f1} + (Ah_{r_w g1})T_w \\
 &= -AS_{g1} - AU_{t1}T_a + (\rho CV)_{g1} \frac{\partial T_{g1,i}}{\partial t} \dots ec. 1
 \end{aligned}$$

Para el nodo T_{f1} :

$$\begin{aligned}
 Ah_{w1}(T_w - T_{f1}) &= q_1'' + Ah_{g1}(T_{f1} - T_{g1}) + (\rho CV)_{f1} \frac{\partial T_{f1,i}}{\partial t} \\
 (Ah_{g1})T_{g1} + (-Ah_w - Ah_{g1})T_{f1} + (Ah_{w1})T_w &= q_1'' + (\rho CV)_{f1} \frac{\partial T_{f1,i}}{\partial t} \dots ec. 2
 \end{aligned}$$

Para el nodo T_w :

$$\begin{aligned}
 AS_{w1} + AS_{w2} &= Ah_{w1}(T_w - T_{f1}) + Ah_{w2}(T_w - T_{f2}) + Ah_{r_w g1}(T_w - T_{g1}) \\
 &\quad + Ah_{r_w g2}(T_w - T_{g2}) + (\rho CV)_w \frac{\partial T_{w,i}}{\partial t} \\
 (Ah_{r_w g1})T_{g1} + (Ah_{w1})T_{f1} + (-Ah_{w1} - Ah_{w2} - Ah_{r_w g1} - Ah_{r_w g2})T_w &+ (Ah_{w2})T_{f2} \\
 + (Ah_{r_w g2})T_{g2} &= -AS_{w1} - AS_{w2} + (\rho CV)_w \frac{\partial T_{w,i}}{\partial t} \dots ec. 3
 \end{aligned}$$

Para el nodo T_{f2} :

$$\begin{aligned}
 Ah_{w2}(T_w - T_{f2}) &= q_2'' + Ah_{g2}(T_{f2} - T_{g2}) + (\rho CV)_{f2} \frac{\partial T_{f2,i}}{\partial t} \\
 (Ah_{w2})T_w + (-Ah_w - Ah_{g2})T_{f2} + (Ah_{g2})T_{g2} &= q_2'' + (\rho CV)_{f2} \frac{\partial T_{f2,i}}{\partial t} \dots ec. 4
 \end{aligned}$$

Para el nodo T_{g2} :

$$AS_{g2} + Ah_{g2}(T_{f2} - T_{g2}) + Ah_{r_w g2}(T_w - T_{g2}) = AU_{t2}(T_{g2} - T_{a2}) + (\rho CV)_{g2} \frac{\partial T_{g2,i}}{\partial t}$$

$$(Ah_{rwg2})T_w + (Ah_{g2})T_{f2} + (-Ah_{g2} - Ah_{rwg2} - AU_{t2})T_{g2}$$

$$= -AS_{g2} - AU_{t2}T_a + (\rho CV)_{g2} \frac{\partial T_{g2,i}}{\partial t} \dots ec.5$$

En las ecuaciones 2 y 4 tenemos los flujos q'' , para que nuestras ecuaciones queden en términos de las temperaturas y no tengamos incógnitas demás hacemos un balance de calor para un volumen de control como el siguiente:

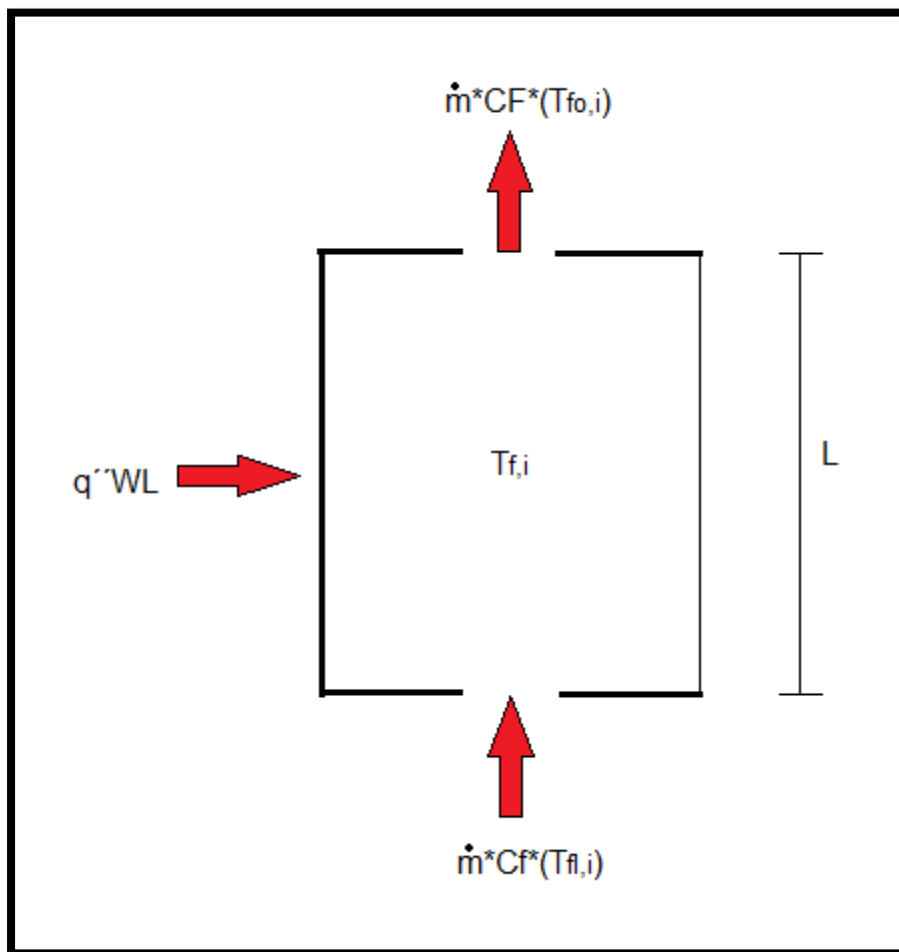


Figura 9. Balance de calor para un volumen de control

La temperatura a la que entra el aire a la chimenea se representa mediante $T_{fi,i}$ mientras que la temperatura del aire a la salida de la chimenea se toma como $T_{fo,i}$. Posteriormente se realiza un balance para el volumen de control antes mostrado, y

al no haber generación de energía ($\dot{E}_g = 0$) y tampoco almacenamiento de esta ($\dot{E}_{st} = 0$), el balance queda:

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$q''W\Delta x + \dot{m}C_f T_{fI,i} = \dot{m}C_f T_{fO,i}$$

De la ecuación anterior se despeja al flujo de calor:

$$q'' = \frac{\dot{m}C_f(T_{fO,i} - T_{fI,i})}{W\Delta x} \dots ec. 6$$

Para que esta ecuación quede en términos de la temperatura del fluido dentro del volumen de control y la temperatura del fluido a la entrada del volumen de control se hace uso de una relación empírica propuesta por Ong y Chow en 2003:

$$T_{f,i} = (1 - \gamma)T_{fI,i} + \gamma T_{fO,i}$$

Se despeja la temperatura de salida:

$$T_{fO,i} = \frac{T_{f,i} - (1 - \gamma)T_{fI,i}}{\gamma}$$

Y sustituyendo en la ecuación 6 obtenemos:

$$q'' = \frac{\dot{m}C_f(T_{f,i} - T_{fI,i})}{\gamma W\Delta x}$$

Dónde:

$$M = \frac{\dot{m}C_f}{\gamma W\Delta x}$$

$$q'' = M(T_{f,i} - T_{fI,i}) \dots ec. 7$$

Así obtenemos que:

$$q_1'' = M(T_{f1,i} - T_{fI1,i}) \dots ec. 8$$

$$q_2'' = M(T_{f2,i} - T_{f12,i}) \dots ec. 9$$

Las ecuaciones 8 y 9 se sustituyen en las ecuaciones 2 y 4, con lo que obtenemos:

$$(Ah_{g1})T_{g1} + (-Ah_w - Ah_{g1})T_{f1} + (Ah_{w1})T_w = M(T_{f1,i} - T_{f11,i}) \\ + (\rho CV)_{f1} \frac{\partial T_{f1,i}}{\partial t} \dots ec. 10$$

$$(Ah_{w2})T_w + (-Ah_w - Ah_{g2})T_{f2} + (Ah_{g2})T_{g2} = M(T_{f2,i} - T_{f12,i}) \\ + (\rho CV)_{f2} \frac{\partial T_{f2,i}}{\partial t} \dots ec. 11$$

Las ecuaciones 1, 3, 5, 10 y 11 contienen temperaturas a un paso de tiempo distinto por lo que se deben de resolver un sistema de ecuaciones en cada paso del tiempo. Manipulando las ecuaciones algebraicamente obtenemos las siguientes ecuaciones y la matriz equivalente:

$$\left(-h_{g1} - h_{rwg1} - U_{t1} - \frac{(\rho C)_{g1} e_{g1}}{\Delta t} \right) T_{g1}^{k+1} + (h_{g1})T_{f1}^{k+1} + (h_{rwg1})T_w^{k+1} \\ = -S_{g1} - U_{t1}T_a - (\rho C)_{g1} e_{g1} \frac{T_{g1,i}^k}{\Delta t} \dots ec. 12$$

$$(h_{g1})T_{g1}^{k+1} + \left(-h_w - h_{g1} - M_1 - \frac{(\rho C)_{f1} b_{f1}}{\Delta t} \right) T_{f1}^{k+1} + (h_{w1})T_w^{k+1} = -M_1(T_{f11,i}) \\ - (\rho C)_{f1} b_{f1} \frac{T_{f1,i}^k}{\Delta t} \dots ec. 13$$

$$(h_{rwg1})T_{g1}^{k+1} + (h_{w1})T_{f1}^{k+1} + \left(-h_{w1} - h_{w2} - h_{rwg1} - h_{rwg2} - \frac{(\rho C)_w e_w}{\Delta t} \right) T_w^{k+1} \\ + (h_{w2})T_{f2}^{k+1} + (h_{rwg2})T_{g2}^{k+1} = -S_{w1} - S_{w2} - (\rho C)_w e_w \frac{T_{w,i}^k}{\Delta t} \dots ec. 14$$

$$(h_{w2})T_w^{k+1} + \left(-h_w - h_{g2} - M_2 - \frac{(\rho C)_{f2}b_{f2}}{\Delta t}\right)T_{f2}^{k+1} + (h_{g2})T_{g2}^{k+1} = -M(T_{f12,i}) - (\rho C)_{f2}b_{f2} \frac{T_{f2,i}^k}{\Delta t} \dots ec. 15$$

$$(h_{rwg2})T_w^{k+1} + (h_{g2})T_{f2}^{k+1} + \left(-h_{g2} - h_{rwg2} - U_{t2} - \frac{(\rho C)_{g2}e_{g2}}{\Delta t}\right)T_{g2}^{k+1} = -S_{g2} - U_{t2}T_a - (\rho C)_{g2}e_{g2} \frac{T_{g2,i}^k}{\Delta t} \dots ec. 16$$

Con las ecuaciones (12-16) se forma la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} \left(-h_{g1} - h_{rwg1} - U_{t1} - \frac{(\rho C)_{g1}e_{g1}}{\Delta t}\right) & (h_{g1}) & (h_{rwg1}) & 0 & 0 \\ (h_{g1}) & \left(-h_w - h_{g1} - M_1 - \frac{(\rho C)_{f1}b_{f1}}{\Delta t}\right) & (h_{w1}) & 0 & 0 \\ (h_{rwg1}) & (h_{w1}) & \left(-h_{w1} - h_{w2} - h_{rwg1} - h_{rwg2} - \frac{(\rho C)_w e_w}{\Delta t}\right) & (h_{w2}) & (h_{rwg2}) \\ 0 & 0 & (h_{w2}) & \left(-h_w - h_{g2} - M_2 - \frac{(\rho C)_{f2}b_{f2}}{\Delta t}\right) & (h_{g2}) \\ 0 & 0 & (h_{rwg2}) & (h_{g2}) & \left(-h_{g2} - h_{rwg2} - U_{t2} - \frac{(\rho C)_{g2}e_{g2}}{\Delta t}\right) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} T_{g1}^{k+1} \\ T_{f1}^{k+1} \\ T_w^{k+1} \\ T_{f2}^{k+1} \\ T_{g2}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S_{g1} - U_{t1}T_a - (\rho C)_{g1}e_{g1} \frac{T_{g1,i}^k}{\Delta t} \\ -M_1(T_{f11,i}) - (\rho C)_{f1}b_{f1} \frac{T_{f1,i}^k}{\Delta t} \\ -S_{w1} - S_{w2} - (\rho C)_w e_w \frac{T_{w,i}^k}{\Delta t} \\ -M(T_{f12,i}) - (\rho C)_{f2}b_{f2} \frac{T_{f2,i}^k}{\Delta t} \\ -S_{g2} - U_{t2}T_a - (\rho C)_{g2} \frac{T_{g2,i}^k}{\Delta t} \end{bmatrix}$$

Este sistema de ecuaciones puede ser resuelto por una inversión de matriz o cualquier otro método numérico. Sin embargo, el sistema pierde su linealidad al

trabajar con diferentes estados en el tiempo (transitorio), por lo que se tiene que hacer uso de métodos iterativos que permitan llegar a un resultado y ahorren tiempo de procesamiento.

Para facilitar el trabajo, la solución de este tipo de sistemas, se realiza con ayuda de la herramienta computacional. En este caso, se da solución al problema mediante un código numérico desarrollado en FORTRAN.

6.3 Cálculo de propiedades termofísicas del aire

Para realizar el análisis, primero se deben determinar las propiedades del aire en un rango de temperaturas en las que funcionara la chimenea solar. Para este caso particular, las propiedades deseadas son la densidad, el calor específico, la conductividad térmica y la viscosidad dinámica.

Para relacionar estas cuatro propiedades con los cambios de temperatura, se deben determinar relaciones matemáticas que nos permitan obtener el valor de la propiedad en el momento deseado. Sin embargo, también se debe ser cuidadoso al momento de elegir dichas relaciones, ya que, además, dichas relaciones deben ser fáciles de manejar.

Para poder realizar lo anterior, a partir de la bibliografía “Convective heat and mass transfer” (William Kays/Michael Crawford), se obtuvo una tabla (Ver anexo A1) en donde se tabulan datos de las 4 propiedades del aire que son de interés, dadas para diferentes temperaturas. Lo interesante de esta tabla, es que nos muestra los datos a rangos de temperaturas cercanos, no mayores a 10°C, y esto, es de mucha importancia para obtener relaciones que tengan mejor precisión.

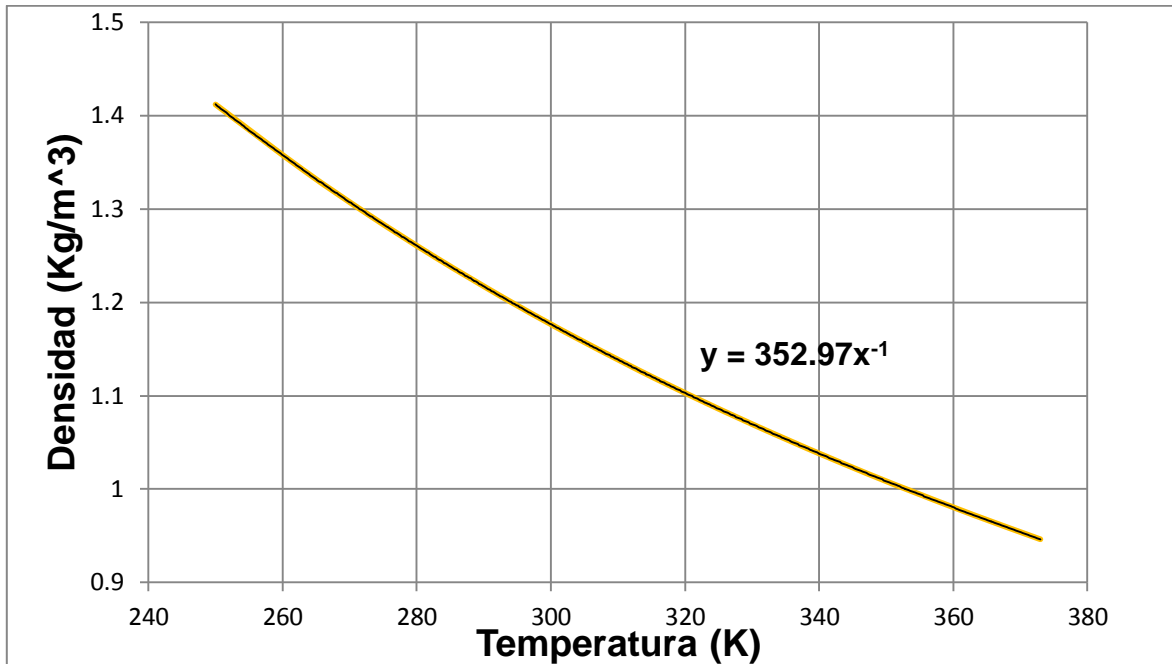
Los datos tabulados son analizados a través de un archivo de Excel, en donde se genera una gráfica para cada propiedad y al mismo tiempo una línea de tendencia y su correspondiente ecuación matemática.

Una vez que se han probado cada una de las ecuaciones posibles, se elige aquella que arroje resultados que mejor se apeguen a los datos tabulados en la

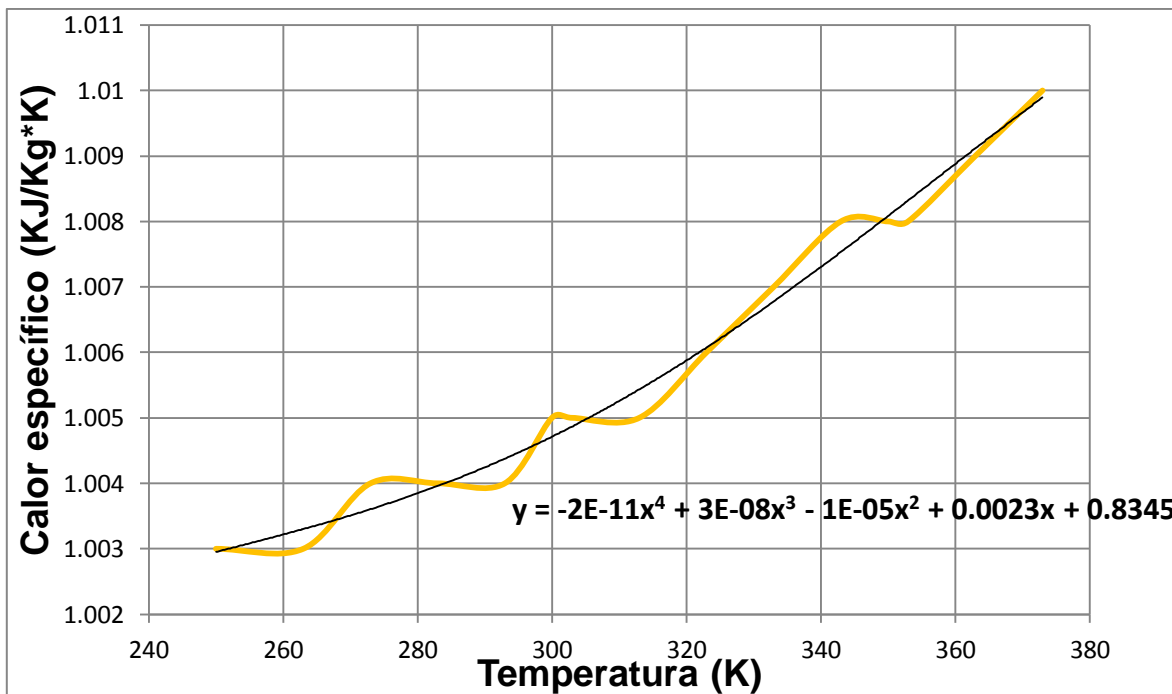
bibliografía.

Las primeras gráficas hechas para cada propiedad fueron las siguientes:

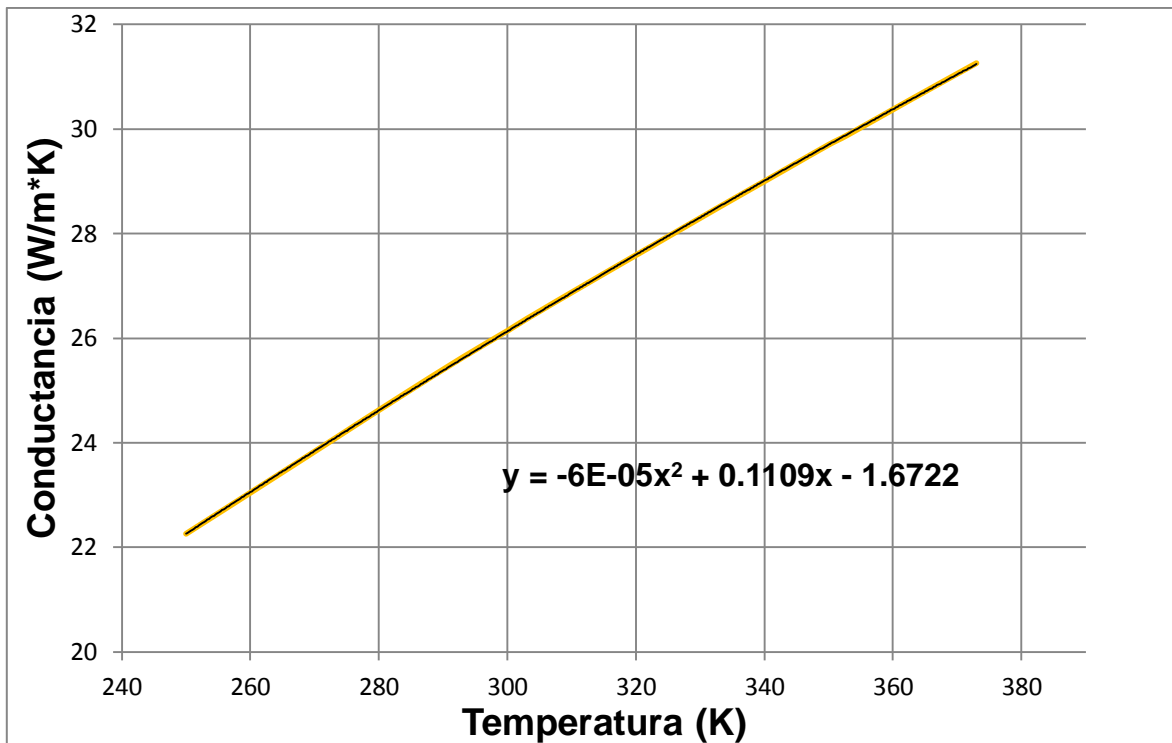
Gráfica A: Densidad



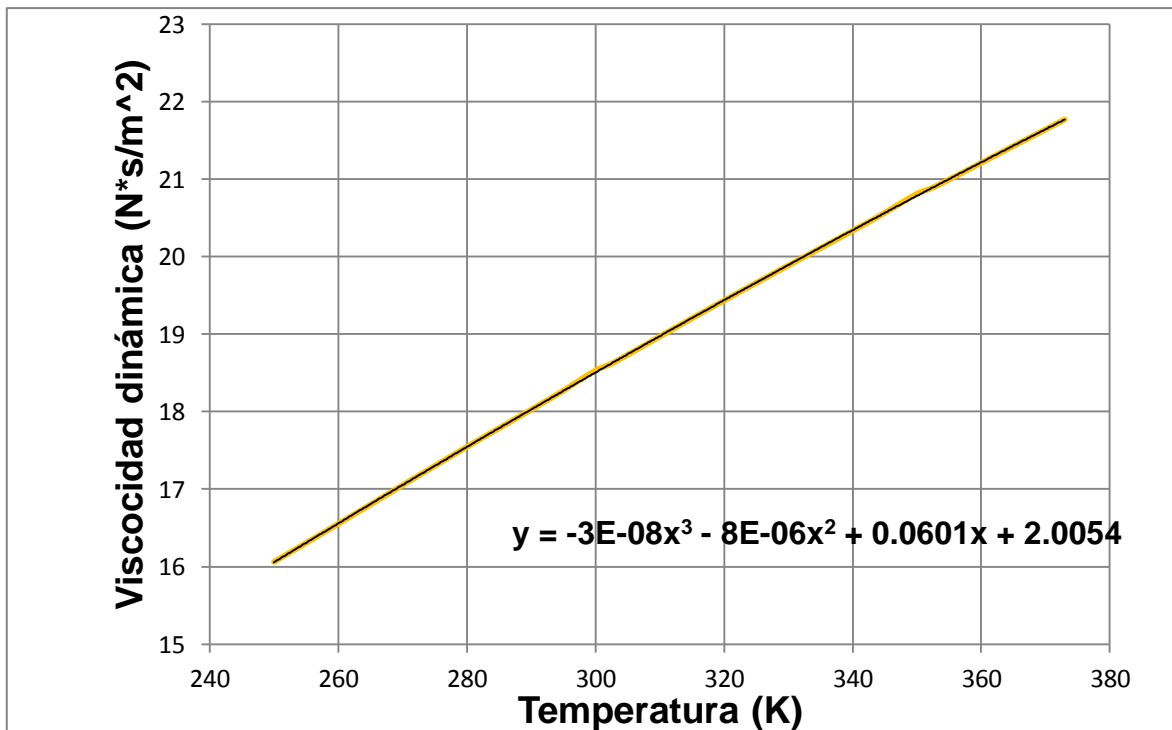
Gráfica B: Calor específico



Gráfica C: Conductividad térmica



Gráfica D: Viscosidad dinámica



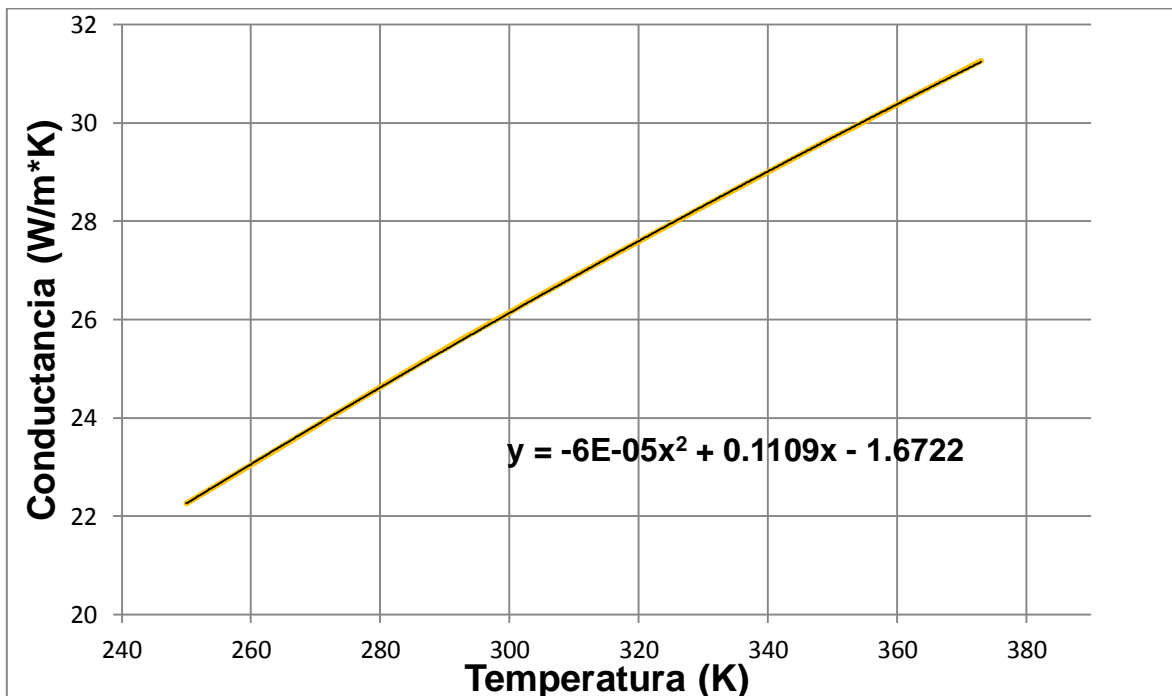
Con estas gráficas se obtienen nuevos datos que son comparados con los datos que están tabulados en la bibliografía. Con esta nueva información, se obtiene el porcentaje de error que existe entre los resultados de las ecuaciones obtenidas y los de la tabla (Ver Anexos A2 y A3).

Como se puede apreciar, para el caso de la densidad, la conductividad térmica y la viscosidad dinámica se generan líneas de tendencia muy cercanas a las gráficas, por lo que encontrar su ecuación característica se simplifica, sin embargo, como ya se hizo mención, se necesita de ecuaciones que tengan un adecuado nivel de precisión y a la vez, que sean relaciones simples.

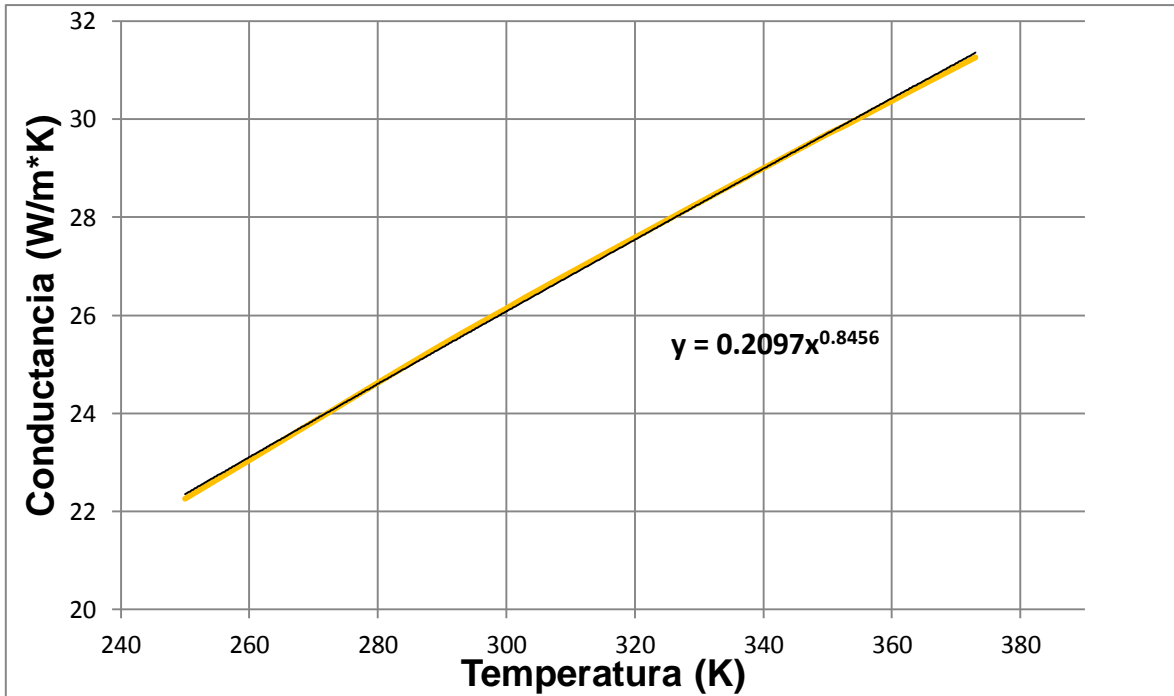
Para obtener ambas características se procede a realizar una comparación entre todas las ecuaciones posibles, y obtener los porcentajes de error. Con estos datos, se podrá elegir una relación sencilla y que sea confiable.

Para el caso de la conductancia térmica, tenemos las siguientes gráficas comparativas:

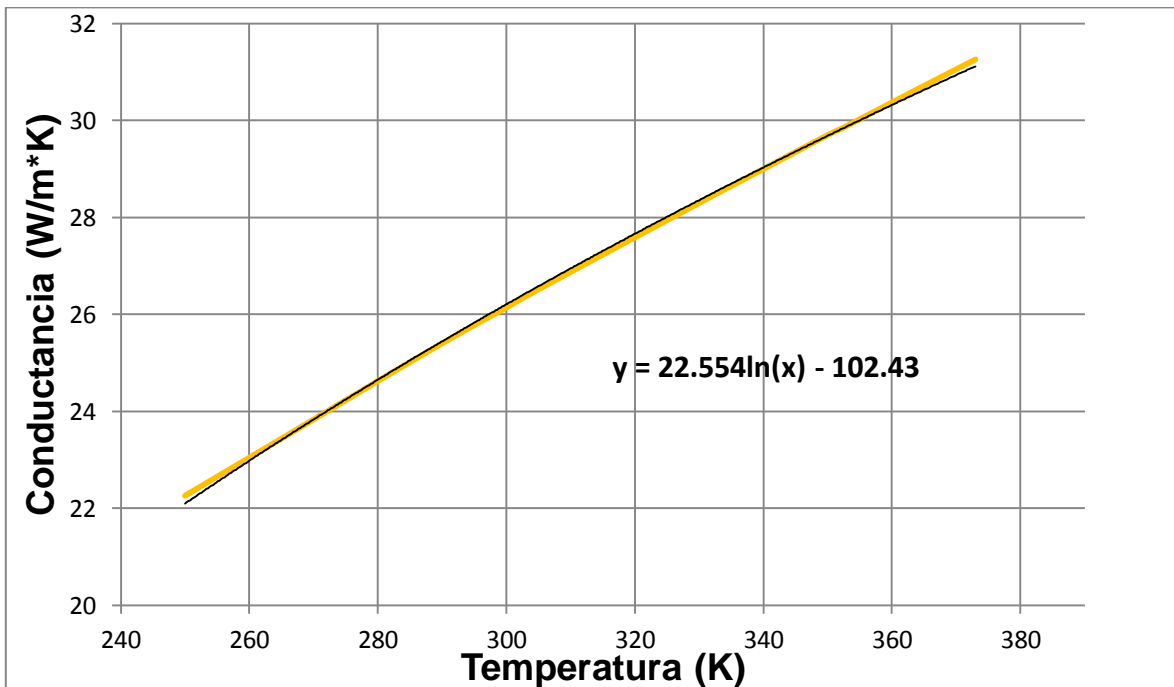
- Polinómica



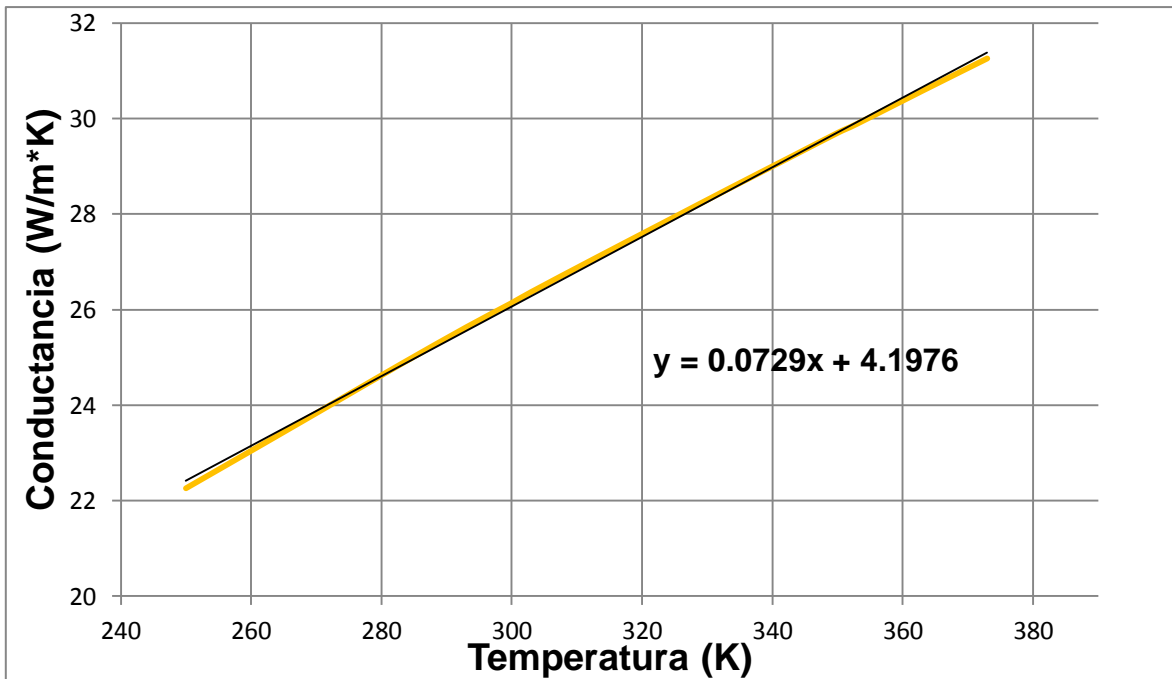
- Potencial



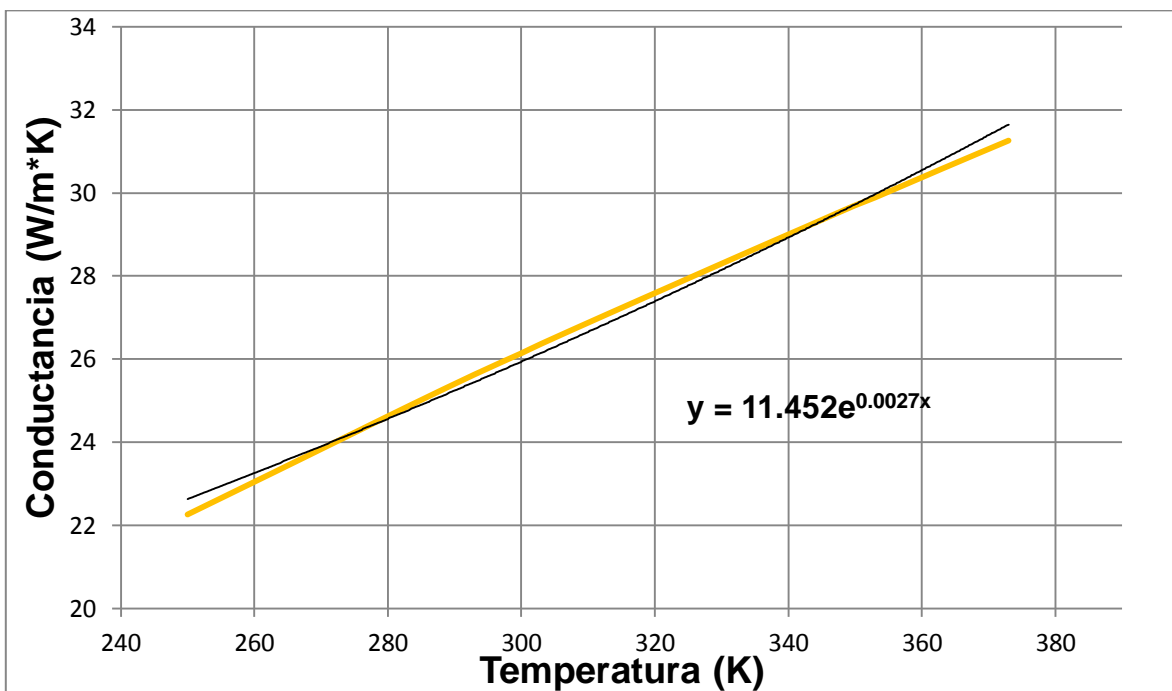
- Logarítmica



- Lineal

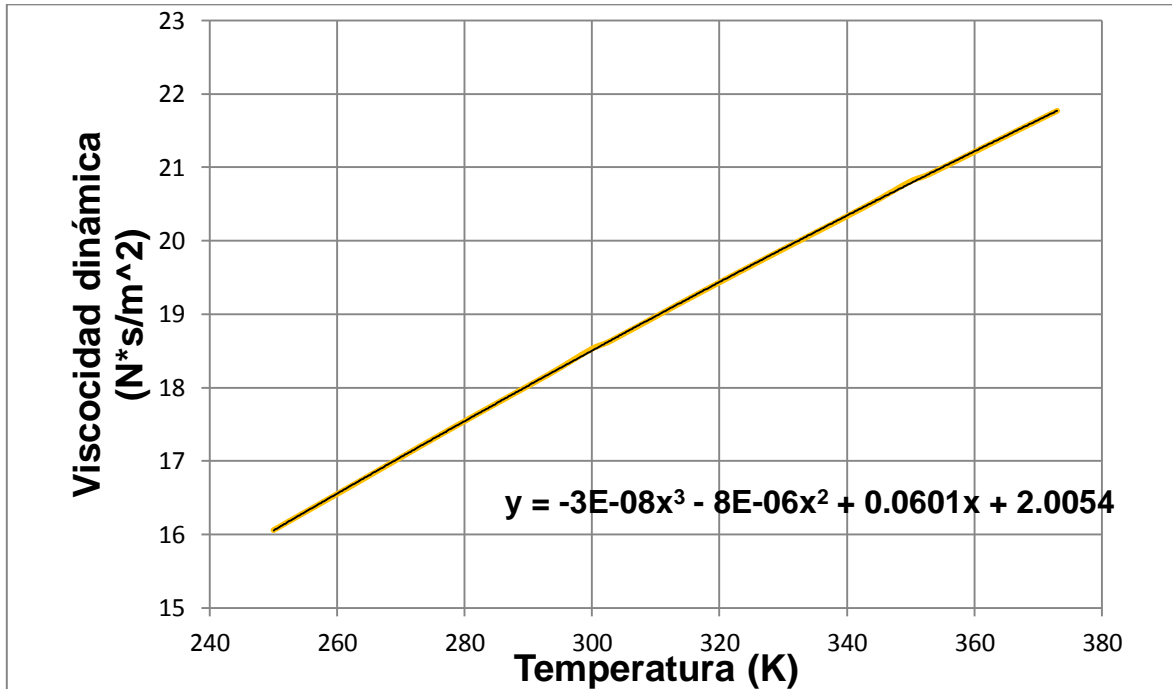


- Exponencial

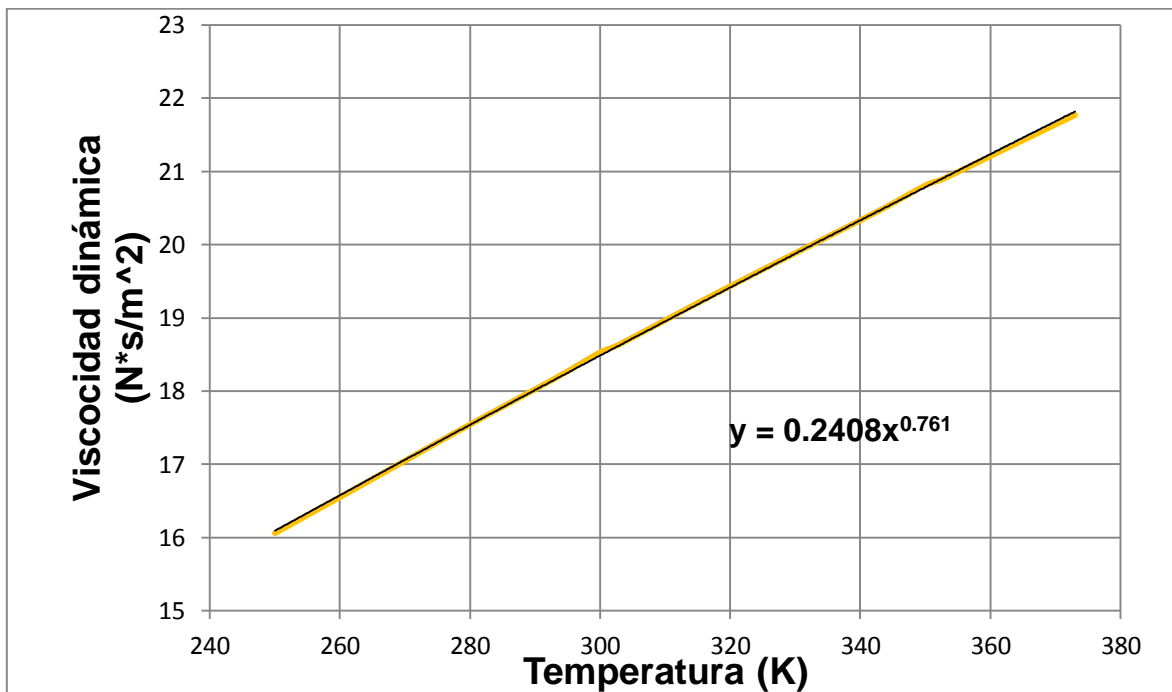


Para el caso de la viscosidad dinámica se tienen las siguientes gráficas comparativas:

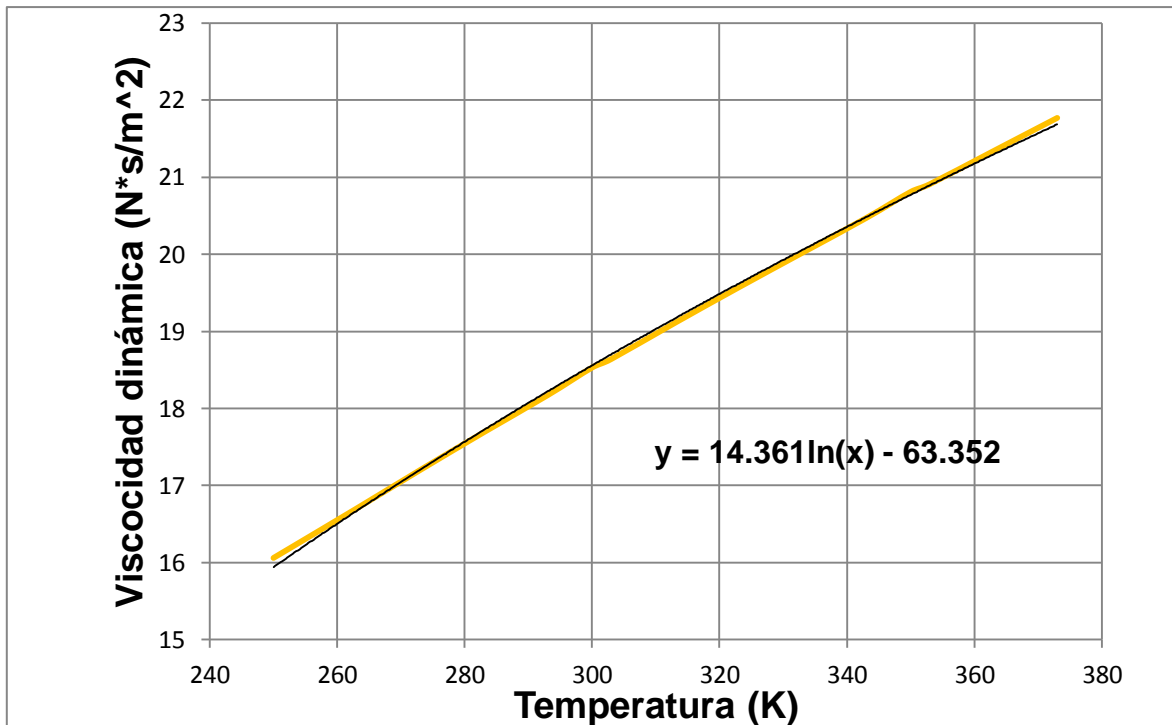
- Polinómica



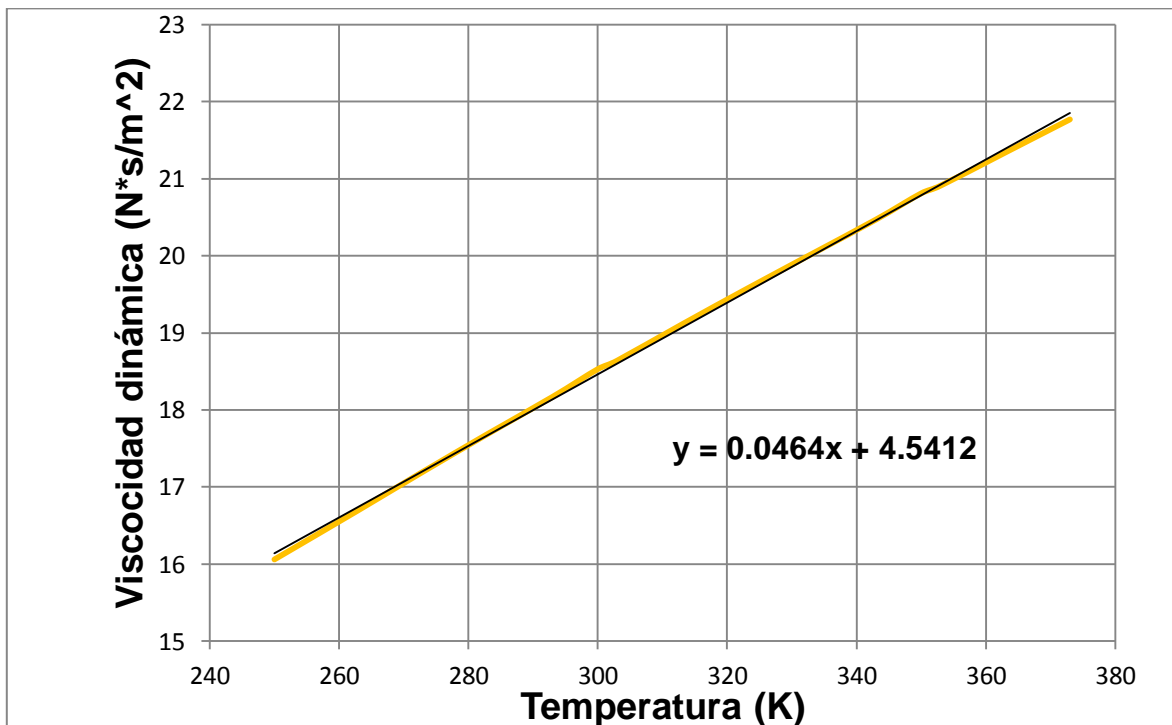
- Potencial



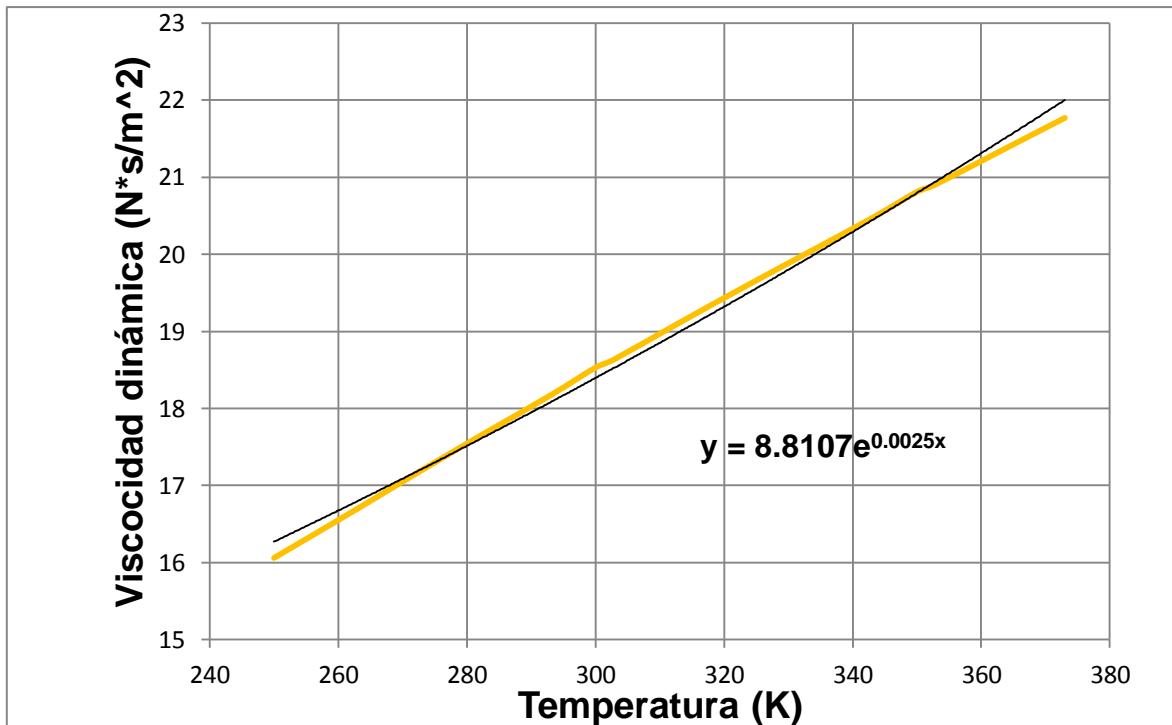
- Logarítmica



- Lineal



- Exponencial



En los anexos (Ver Anexos A4 y A5) se presentan las tablas en donde se comparan los porcentajes de error para cada caso.

Para el calor específico, se puede apreciar que la primera gráfica trazada para esta propiedad, muestra como los datos aumentan escalonadamente. Al obtener una línea de tendencia y obtener su ecuación, se puede apreciar que los resultados tienen un alto porcentaje de error, por lo que se concluye que las relaciones obtenidas a partir de la gráfica no son las adecuadas.

Para solucionar el problema se realizó un estudio por intervalos en la gráfica, y se obtuvieron varias ecuaciones que representaban cada intervalo. Sin embargo, el resultado fue similar al anterior, y no se obtuvieron datos que mostraran un grado de aceptación adecuada para todo el rango del análisis.

Del análisis anterior, y a través de la observación de la gráfica, de donde se concluye que existe una mala interpretación por parte de Excel, se optó por realizar un segundo análisis por intervalos, en donde ahora se tomaron intervalos

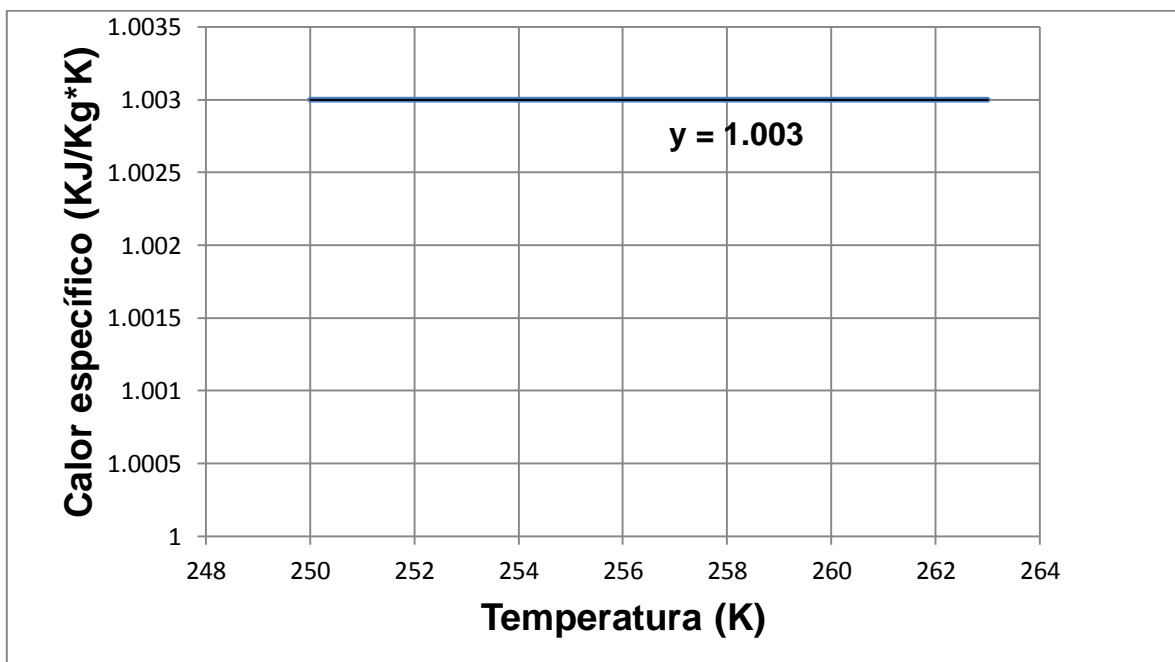
en donde los datos se mantienen constantes y también en donde existen intervalos en donde los datos se comportan de forma lineal.

Estos intervalos son:

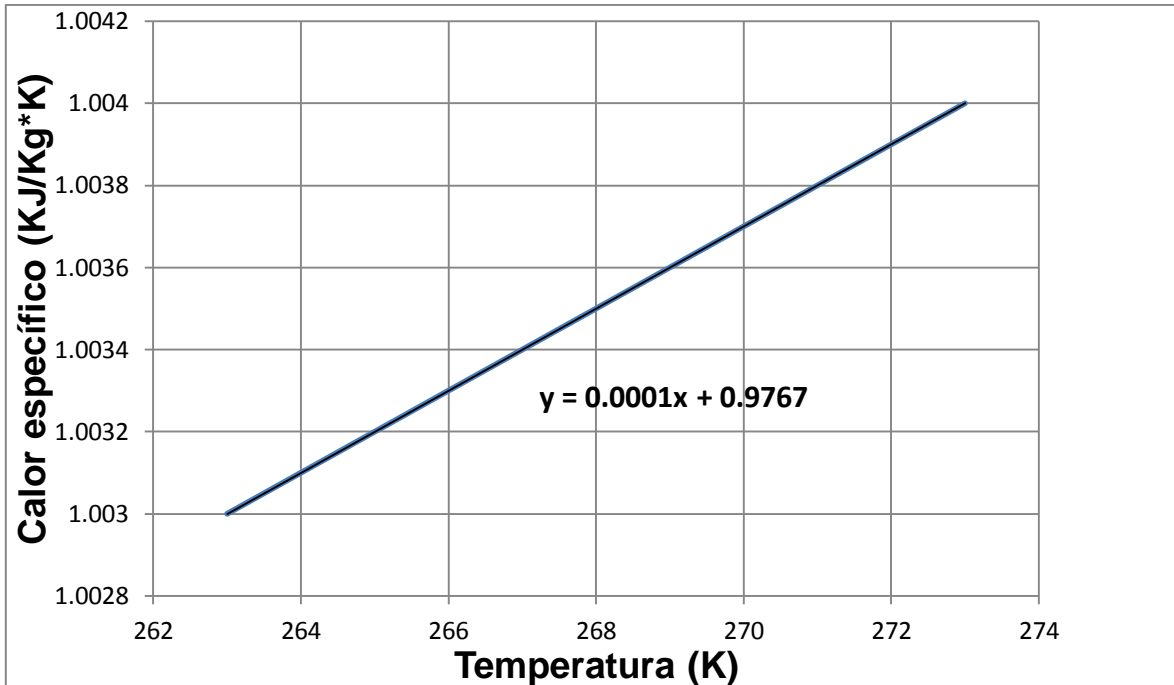
- De 250 a 263 K el valor es constante a 1.003
- De 263 a 273 K los valores tienen un comportamiento lineal.
- De 273 a 293 K los valores son constantes a 1.004
- De 293 a 300 K los valores tienen un comportamiento lineal.
- De 300 a 313 K los valores son constantes a 1.005
- De 313 a 343 K los valores tienen un comportamiento lineal.
- De 343 a 353 K los valores son constantes a 1.008
- De 353 a 373 K los valores tienen un comportamiento lineal.

Para estos 8 intervalos, las ecuaciones son:

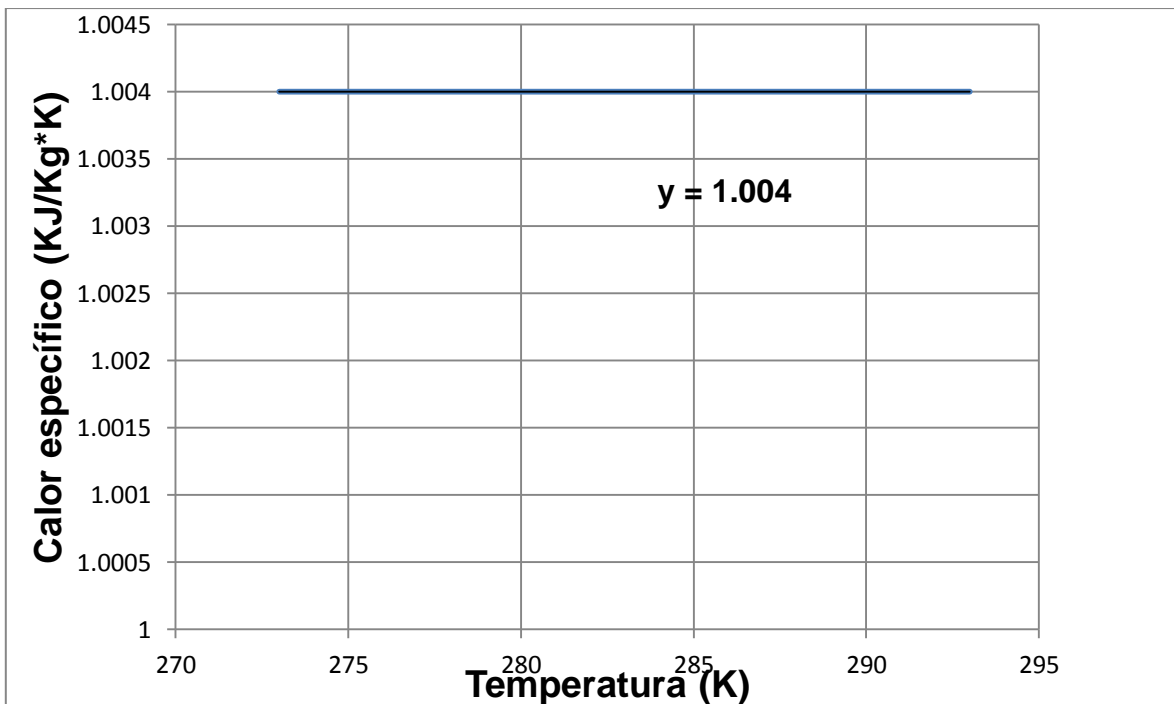
De 250 a 263K:



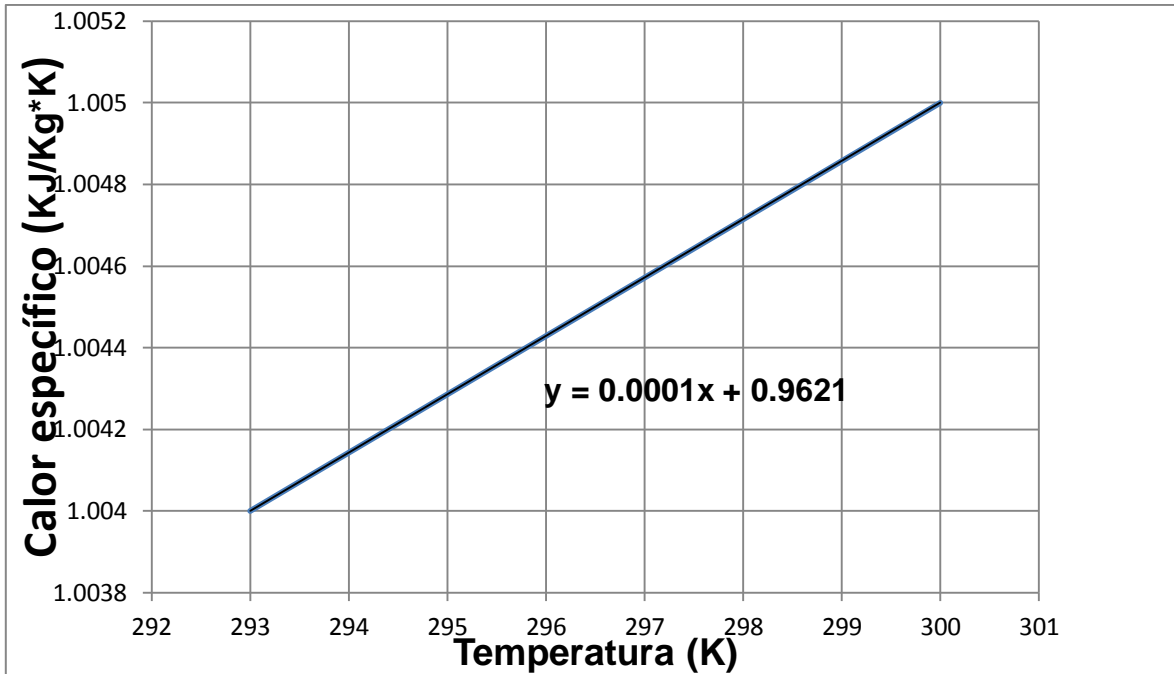
De 263 a 273K:



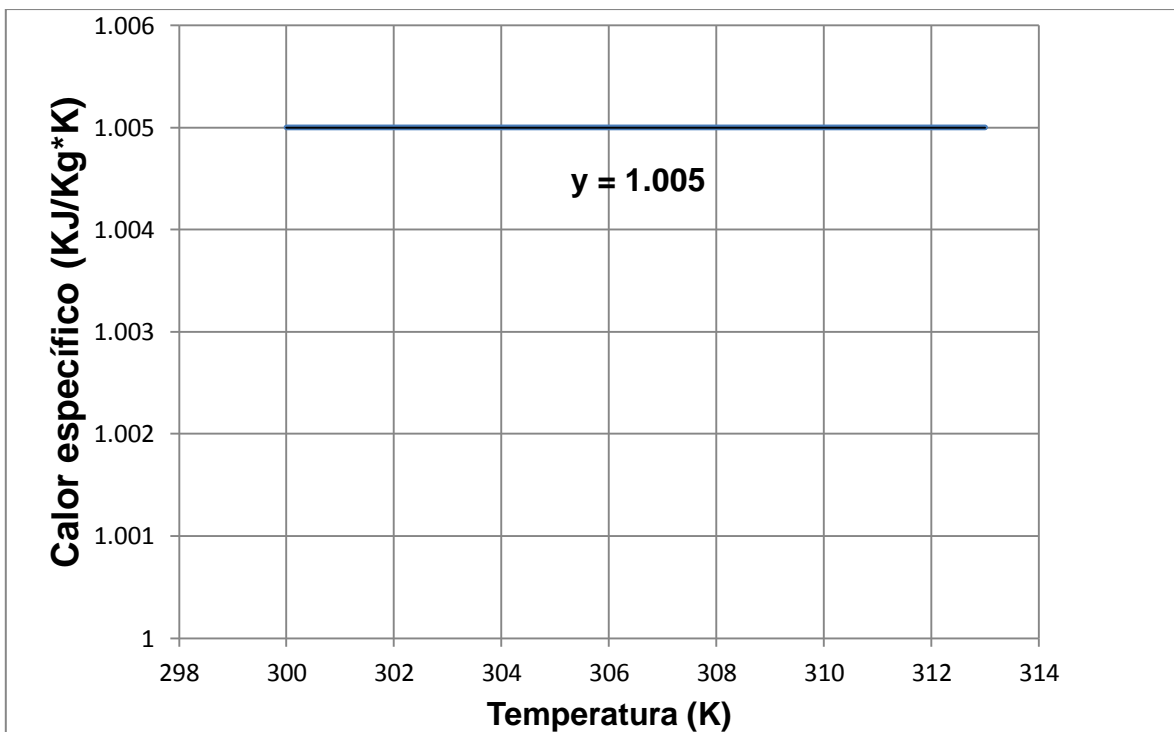
De 273 a 293K:



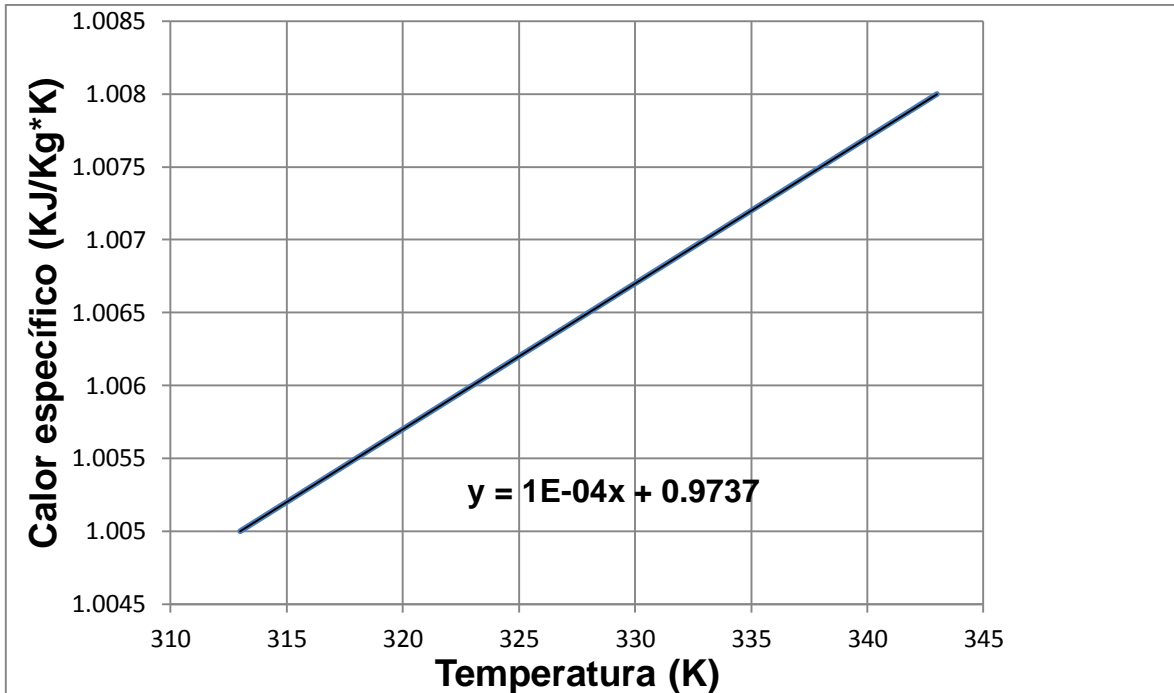
De 293 a 300K:



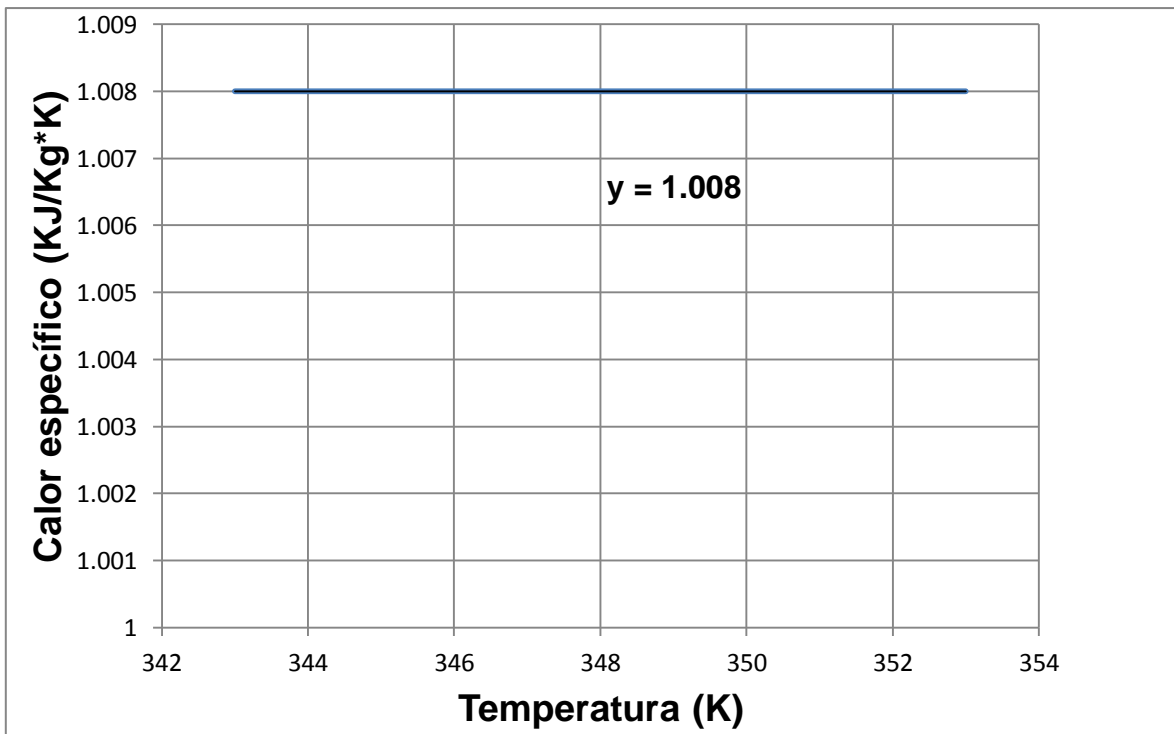
De 300 a 313K:



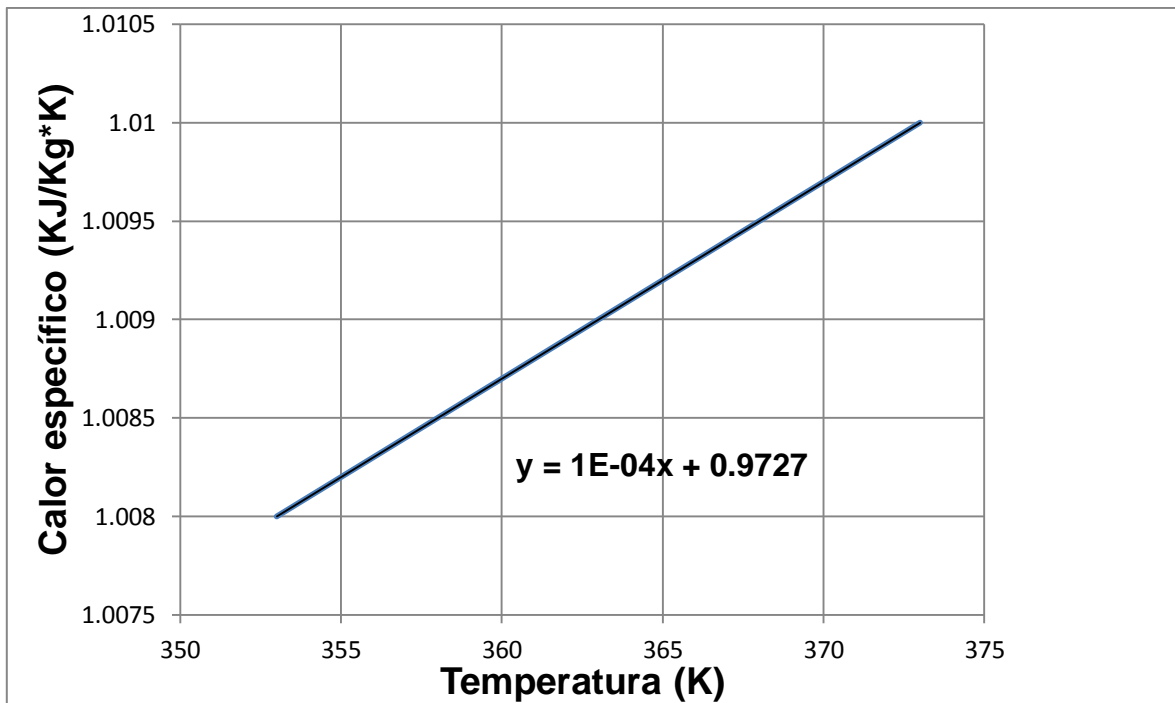
De 313 a 343



De 343 a 353K:



De 353 a 373K:



Como puede apreciarse, de esta manera, se obtienen las relaciones matemáticas necesarias para el sistema:

- Densidad

$$\rho = 352.97T^{-1} \dots \dots ec. 17$$

- Conductividad térmica

$$k = 0.2097T^{0.8456} \dots \dots ec. 18$$

- Viscosidad dinámica

$$\mu = 0.2408T^{0.761} \dots \dots ec. 19$$

- Calor específico

De 250 a 263K:

$$C = 1.003 \dots \dots ec. 20$$

De 263 a 273K:

$$C = 0.0001T + 0.9767 \dots \dots ec. 21$$

De 273 a 293K:

$$C = 1.004 \dots \dots ec. 22$$

De 293 a 300K:

$$C = 0.0001T + 0.9621 \dots \dots ec. 23$$

De 300 a 313K:

$$C = 1.005 \dots \dots ec. 24$$

De 313 a 343K:

$$C = (1 * 10^{-4})T + 0.9737 \dots \dots ec. 25$$

De 343 a 353K:

$$C = 1.008 \dots \dots ec. 26$$

De 353 a 373K:

$$C = (1 * 10^{-4})T + 0.9727 \dots \dots ec. 27$$

6.4 Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor y pérdidas globales

Para poder obtener una solución numérica, además de las propiedades del aire, también se deben de conocer los coeficientes de transferencia de calor involucrados. Para esto, se recurre a la bibliografía, en donde diversos autores han propuesto relaciones útiles para este caso.

Las relaciones que aquí se presentan, también fueron utilizadas por Ong en 2003.

- Coeficiente de transferencia de calor debido al viento (Mc Adams, 1954)

$$h_{wind} = 5.7 + 3.8V \dots \dots ec. 28$$

Donde V es la velocidad del viento.

- Coeficiente de transferencia de calor por radiación desde la superficie

superior hasta la bóveda celeste (Duffie and Beckman, 1991)

$$h_{rs} = \frac{\sigma \varepsilon_1 (T_g + T_s)(T_g^2 + T_s^2)(T_g - T_s)}{(T_g + T_a)} \dots \dots ec. 29$$

- Temperatura de la bóveda celeste (Swinbank, 1963)

$$T_s = 0.0552 T_a^{3/2} \dots \dots ec. 30$$

- Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la placa de absorción hacia la cubierta de vidrio (Duffie and Beckman, 1991)

$$h_{rwg} = \frac{\sigma (T_g^2 + T_w^2)(T_g + T_w)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1\right)} \dots \dots ec. 31$$

- Coeficiente global de pérdidas de calor

$$U_t = h_{wind} + h_{rs} \dots \dots ec. 32$$

- Coeficiente de transferencia de calor por convección natural para el aire entre la placa y el vidrio (DeWitt, 1996)

El número de Nusselt está dado por:

Para flujo laminar ($Ra < 10^9$)

$$Nu = \frac{0.68 + (0.67 Ra^{1/4})}{\left[1 - (0.492/Pr)^{1/6}\right]^{4/9}} \dots \dots ec 33$$

Para flujo turbulento ($Ra > 10^9$)

$$Nu = \left\{ \frac{0.825 + \left(0.67 Ra^{1/6}\right)}{\left[1 - (0.492/Pr)^{1/6}\right]^{2/7}} \right\}^2 \dots \dots ec. 34$$

El número de Rayleigh se da por:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha_t} \dots \dots ec. 35$$

El número de Prandtl se da por:

$$Pr = \frac{C_f\mu_f}{k_f} \dots \dots ec. 36$$

El subíndice f indica que se trata de las propiedades del aire.

- Los flujos de calor absorbidos

El flujo de calor absorbido de la radiación solar por la cubierta de vidrio:

$$S_1 = \alpha_1 G \dots \dots ec. 37$$

El flujo de calor absorbido de la radiación solar por la placa de absorción es:

$$S_2 = \alpha_1 \tau G \dots \dots ec. 38$$

6.5 Cálculo del flujo másico en el canal y de la eficiencia

La relación para el flujo másico a través de cada canal de la chimenea solar fue propuesta por Bansal et al. (2004), y se define por:

$$\dot{m} = C_d \frac{\rho_{f,0,1} A_{o,1}}{\sqrt{1 + A_{r,1}^2}} \dots \dots ec. 39$$

La eficiencia del sistema de ventilación pasivo para el canal de flujo de aire fue propuesto por Ong (2003), y se define por:

$$\eta = \frac{\dot{m} C_f (T_{f,0} - T_{f,l})}{WLH} \times 100 \dots \dots ec. 40$$

Donde H es la irradiancia en W/m²

7 RESULTADOS

Durante la estancia de residencia profesional se realizó el modelo matemático que representa el comportamiento de la chimenea solar, este modelo se desarrolló considerando convección natural en todo el sistema, la transferencia de calor es considerada bidimensional y el análisis es bajo un estado transitorio. El modelo es desarrollado en el apartado 6.2 de este trabajo.

Se logró realizar todo el estudio necesario para determinar cuáles eran las propiedades que tenían un mayor impacto sobre el comportamiento del aire cuando este, se analiza a través de un modelo, matemático en régimen transitorio.

Se llegó a la conclusión, de que eran 4 las propiedades del aire que tomaban mayor importancia. Estas 4 propiedades son la conductividad térmica, la densidad, el calor específico y la viscosidad dinámica del aire

Las relaciones matemáticas que simplifiquen la determinación de estas 4 propiedades son reportadas en el punto 6.3 del presente trabajo.

También, se corroboraron las relaciones para determinar los coeficientes de transferencia de calor y de pérdidas globales, los cuales son de vital importancia para poder obtener un resultado adecuado con el código numérico que se pretende emplear para darle solución y seguimiento a la chimenea solar.

Al igual que las relaciones anteriores, se corrobora el empleo de las relaciones para obtener el flujo másico del aire a través de los canales y de la eficiencia, como las adecuadas para el caso de la chimenea solar.

Se construyó y dejó listo un prototipo de la chimenea solar que seguirá bajo un largo seguimiento y que aun continuara bajo estudio, para su futura instalación en la planta NISSAN Cuernavaca, en cuanto así lo decidan las personas a cargo dentro de la planta.

Las siguientes imágenes muestran algunas de las partes de la chimenea solar:



Figura 10. Módulos de la chimenea solar, estructura y vidrios templados.



Figura 11. Módulos inferiores de la chimenea solar.

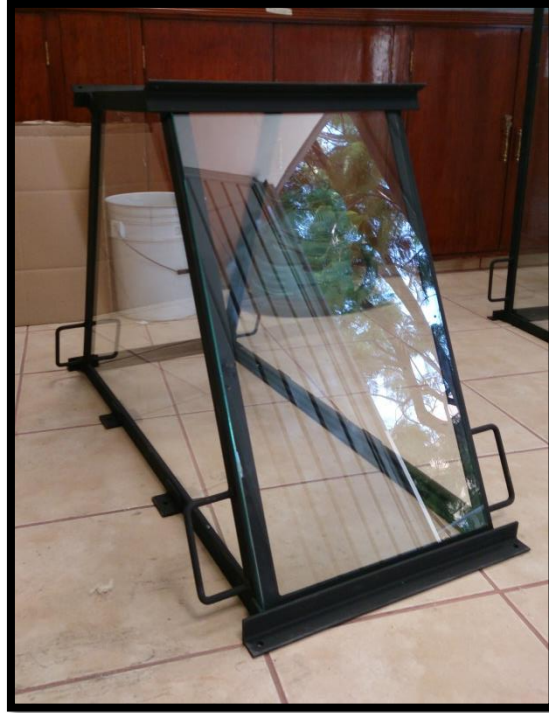


Figura 12. Módulo superior de la chimenea solar.



Figura 13. Extractor de aire tipo industrial.



Figuras 14 y 15. Placas metálicas expuestas al sol.



Figura 16. Módulo superior con el extractor de aire montado.



Figura 17. Módulos totalmente listos para su próxima instalación.

La Figura 17 muestra lo que es la chimenea solar totalmente completa, con las láminas metálicas color negro en su interior, los vidrios templados colocados y fijos y con el extractor de aire industrial montado.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

El proyecto de residencia profesional sufrió algunas modificaciones con respecto a lo inicial. Esto debido a que durante el desarrollo de la estancia surgieron nuevas actividades que fueron realizadas y que complementaban el desarrollo del proyecto, cabe decir, que dichas actividades no estaban programadas dentro de los planes originales.

Otro de los factores que influyeron en el avance del proyecto, en cuanto a la construcción del prototipo de chimenea solar, fue la demora en cuanto a la entrega y disponibilidad de los materiales. Por este motivo se tuvo un avance lento con respecto a los tiempos programados, sin embargo, la construcción fue realizada y la chimenea logró terminarse, y con esto, el proyecto de residencia se dio por concluido.

Algunas actividades ya se encuentran en programación, y dentro del CENIDET, ya se planea continuar con actividades como la adquisición de datos y el análisis de los mismos, es decir, el monitoreo de la chimenea solar.

De funcionar el actual proyecto, obtener los resultados esperados, y de contar con el apoyo de la empresa NISSAN, se planea realizar la fabricación en serie de los prototipos de chimenea necesarios para satisfacer las necesidades de la nave industrial de la planta.

Además, se tiene en mente, fusionar el presente proyecto con uno desarrollado a la par de este, el cual trata sobre un seguidor solar, para que en un futuro, se pueda contar con una chimenea solar que pueda seguir el movimiento del sol y así lograr obtener una mayor eficiencia al tener mayores índices de radiación durante el día.

Dichas actividades están pensadas para ser desarrolladas en los siguientes meses.

8.2 Recomendaciones

En realidad la chimenea solar se realiza con mucho detalle y no existen demasiadas modificaciones, por lo que algunas de las recomendaciones podrían ser:

- En cuanto a la obtención de las relaciones matemáticas, se podría indagar aún más e investigar otras relaciones, o incluso, proponer algunas, así como se hizo con las propiedades del aire en el presente trabajo.
- En cuanto al diseño de la estructura de la chimenea, está ya sufrió modificaciones con respecto al diseño inicial. En lo que sí se puede realizar un análisis a mayor detalle, es en cuanto a la instalación de las placas absorbedoras metálicas y buscar un método para que estas queden aseguradas firmemente y al mismo tiempo, sean fáciles de retirar y volver a instalar. El método utilizado actualmente, mediante alambres de acero galvanizado, no convence totalmente.
- El diseño de la chimenea está pensado para dar fácil acceso al mantenimiento de la misma una vez que se encuentre instalada en planta, una recomendación relacionada con el punto anterior, es la modificación de la forma de montar las placas para facilitar el mantenimiento.
- Se tiene contemplado colocar una especie de filtro por los canales de la chimenea, esto para evitar la entrada de partículas extrañas dentro de la edificación. Por otro lado, se requiere que el flujo de aire no sea obstruido, por lo que esta situación requiere de un mayor análisis para una adecuada elección.

9 REFERENCIAS

- 1) Duffie J. and William A. Beckman, 1991, "Solar engineering Of Thermal Processes", 2nd edition.
- 2) Incropera Frank P., 2002, "Heat and Mass Transfer", Fifth Edition, JHON WILEY & SONS.
- 3) Mills A. F., 1999, "Heat Transfer", 2nd edition, Prentice Hall.
- 4) Adrian Bejan. "Convection Heat Transfer", 2nd Edition, JHON WILEY & SONS Inc.
- 5) William Kays and M. Crawford, "Convective Heat and Mass Transfer", 4th Edition, Mc Graw Hill.
- 6) J. Arce, M. J. Jiménez, et. al., "Experimental study for natural ventilation on a solar chimney", Renewable Energy, Vol. 34, 2009.
- 7) K. S. Ong, "A mathematical model of a solar chimney", Renewable Energy, Vol. 28 (2003), Págs. 1047-1060
- 8) K. A. R. Ismail, J. R. Henriquez, "Simplified model for a ventilated glass window under forced air flow conditions", Applied Thermal Engineering, Vol. 26, 2006. Págs. 295-302
- 9) <http://www.sol-arq.com/index.php/ventilacion-natural>, 8 de septiembre del 2013.

ANEXOS**A1 Tabla de propiedades del aire**

T (K)	T (°C)	Densidad (Kg/m ³)	Calor específico (Cp) (KJ/Kg*K)	Conductancia (k)	Viscosidad Dinámica (N s/m ²)*10 ⁻⁶
250	-23.15	1.4119	1.003	22.26	16.06
263	-10.15	1.3421	1.003	23.28	16.7
273	-0.15	1.293	1.004	24.07	17.2
283	9.85	1.2473	1.004	24.86	17.69
293	19.85	1.2047	1.004	25.63	18.17
300	26.85	1.1766	1.005	26.14	18.53
303	29.85	1.165	1.005	26.37	18.64
313	39.85	1.1277	1.005	27.09	19.11
323	49.85	1.0928	1.006	27.8	19.57
333	59.85	1.06	1.007	28.51	20.02
343	69.85	1.0291	1.008	29.21	20.47
350	76.85	1.0085	1.008	29.7	20.81
353	79.85	1	1.008	29.89	20.91
363	89.85	0.9724	1.009	30.58	21.34
373	99.85	0.9463	1.01	31.26	21.77

T (K)	T (°C)	Densidad (Kg/m ³)	Ecuación obtenida	% Error	Conductancia (k) (W/m ² K)*10 ⁻³	Ecuación obtenida	% Error
250	-23.15	1.4119	1.4119	0.0014	22.26	22.3028	0.1923
263	-10.15	1.3421	1.3421	0.0007	23.28	23.3444	0.2765
273	-0.15	1.293	1.2929	0.0054	24.07	24.1318	0.2566
283	9.85	1.2473	1.2472	0.0045	24.86	24.9072	0.1897
293	19.85	1.2047	1.2047	0.0020	25.63	25.6706	0.1583
300	26.85	1.1766	1.1766	0.0028	26.14	26.1978	0.2211
303	29.85	1.165	1.1649	0.0071	26.37	26.4220	0.1970
313	39.85	1.1277	1.1277	0.0000	27.09	27.1614	0.2634
323	49.85	1.0928	1.0928	0.0012	27.8	27.8888	0.3193
333	59.85	1.06	1.0600	0.0028	28.51	28.6042	0.3303
343	69.85	1.0291	1.0291	0.0032	29.21	29.3076	0.3340
350	76.85	1.0085	1.0085	0.0014	29.7	29.7928	0.3125
353	79.85	1	0.9999	0.0085	29.89	29.9990	0.3645
363	89.85	0.9724	0.9724	0.0032	30.58	30.6784	0.3216
373	99.85	0.9463	0.9463	0.0000	31.26	31.3458	0.2743

A2 Porcentajes de error para la densidad y la conductancia

T (K)	T (°C)	Viscosidad Dinámica (Ns/m ²)*10 ⁻⁶	Ecuación obtenida	% Error	Calor específico (Cp) (KJ/Kg*K)	Ecuación obtenida	% Error
250	-23.15	16.06	16.0617	0.0103	1.003	1.1751	17.1610
263	-10.15	16.7	16.7126	0.0755	1.003	1.1978	19.4184
273	-0.15	17.2	17.2061	0.0353	1.004	1.2164	21.1565
283	9.85	17.69	17.6930	0.0171	1.004	1.2362	23.1256
293	19.85	18.17	18.1733	0.0181	1.004	1.2571	25.2113
300	26.85	18.53	18.5054	0.1328	1.005	1.2725	26.6169
303	29.85	18.64	18.6467	0.0359	1.005	1.2793	27.2911
313	39.85	19.11	19.1130	0.0158	1.005	1.3027	29.6199
323	49.85	19.57	19.5721	0.0108	1.006	1.3274	31.9451
333	59.85	20.02	20.0238	0.0190	1.007	1.3534	34.3956
343	69.85	20.47	20.4679	0.0103	1.008	1.3807	36.9735
350	76.85	20.81	20.7742	0.1723	1.008	1.4006	38.9509
353	79.85	20.91	20.9042	0.0276	1.008	1.4094	39.8186
363	89.85	21.34	21.3326	0.0348	1.009	1.4394	42.6574
373	99.85	21.77	21.7528	0.0789	1.01	1.4708	45.6263

A3 Porcentajes de error para la viscosidad dinámica y el calor específico

T (K)	T (°C)	Conductancia (k) (W/m²K)*10-3	Ecuación polinómica	% Error	Ecuación potencial	% Error	Ecuación logarítmica	% Error	Ecuación lineal	% Error	Ecuación exponencial	% Error
250	-23.15	22.26	$-0.00006T^2 + 0.1109T - 1.1$	0.1923	$Cp=0.2097*(T^0.8456)$	0.4087	$Cp=22.554 \ln(T) - 102.43$	0.7142	$Cp=0.0729(T) + 4.1976$	0.7305	$Cp=11.452 * e^{0.0027(T)}$	1.0427
263	-10.15	23.28		0.2765		0.2144		0.1531		0.3879		0.0670
273	-0.15	24.07		0.2566		0.0326		0.0666		0.1217		0.5686
283	9.85	24.86		0.1897		0.1546		0.1505		0.1275		1.0935
293	19.85	25.63		0.1583		0.2683		0.1975		0.2837		1.4395
300	26.85	26.14		0.2211		0.2423		0.2797		0.2770		1.5186
303	29.85	26.37		0.1970		0.2768		0.2561		0.3174		1.5836
313	39.85	27.09		0.2634		0.2250		0.2948		0.2757		1.5775
323	49.85	27.8		0.3193		0.1529		0.2848		0.2004		1.4663
333	59.85	28.51		0.3303		0.0966		0.1994		0.1287		1.2907
343	69.85	29.21		0.3340		0.0204		0.0828		0.0264		1.0194
350	76.85	29.7		0.3125		0.0244		0.0343		0.0424		0.7951
353	79.85	29.89		0.3645		0.1085		0.0257		0.1382		0.6240
363	89.85	30.58		0.3216		0.1885		0.2212		0.2626		0.2080
373	99.85	31.26		0.2743		0.2874		0.4310		0.4136		0.2929

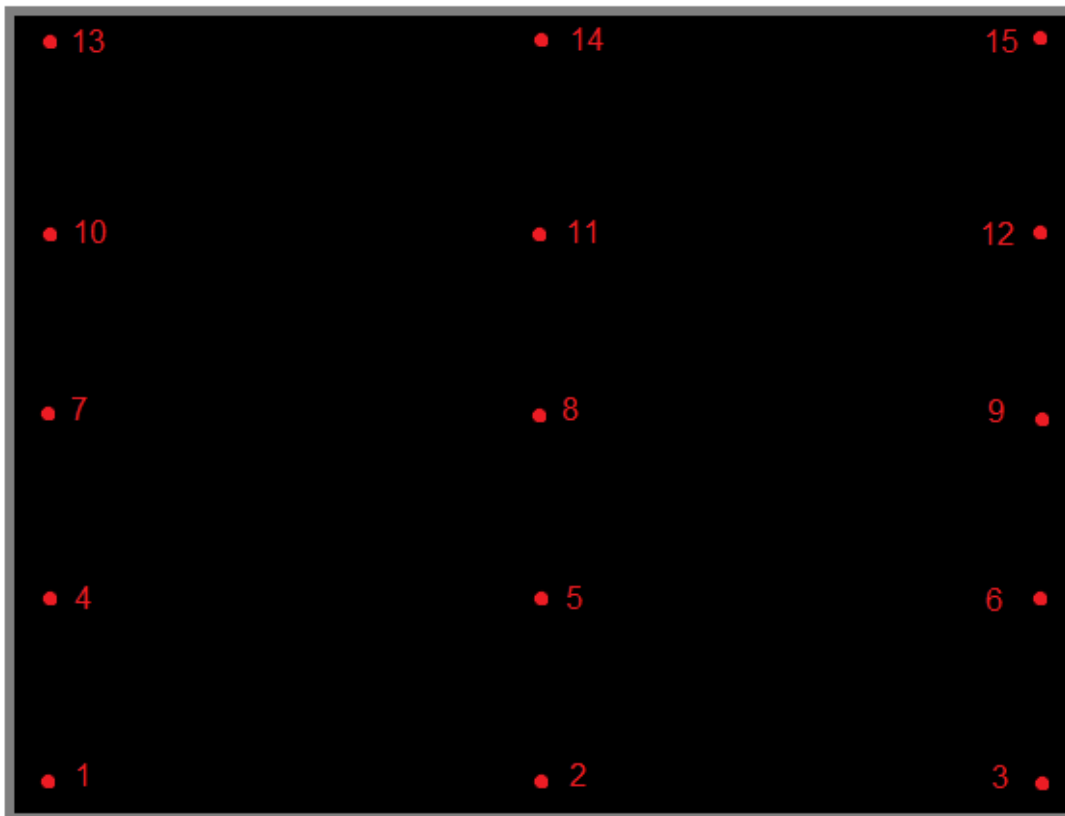
A4 Porcentajes de error de la conductancia para cada ecuación obtenida

T (K)	T (°C)	Viscosidad Dinámica (N s/m ²)*10 ⁻⁶	Ecuación Dinámica $T^3 - (8E-06T^2) + (0.0601$	% Error	Ecuación potencial $Vd=0.2408(T+0.761)$	% Error	Ecuación logarítmica $Vd=14.361\ln(T) - 63.352$	% Error	Ecuación lineal $Vd=0.0464T + 4.5412$	% Error	Ecuación exponencial $Vd=8.107e^{-0.0025T}$	% Error
250	-23.15	16.06	16.0617	0.0103	16.0875	0.1713	15.9417	0.7366	16.1412	0.5056	16.4606	2.4941
263	-10.15	16.7	16.7126	0.0755	16.7203	0.1213	16.6697	0.1814	16.7444	0.2659	17.0043	1.8222
273	-0.15	17.2	17.2061	0.0353	17.2019	0.0110	17.2056	0.0327	17.2084	0.0488	17.4348	1.3650
283	9.85	17.69	17.6930	0.0171	17.6793	0.0603	17.7223	0.1824	17.6724	0.0995	17.8761	1.0522
293	19.85	18.17	18.1733	0.0181	18.1528	0.0949	18.2210	0.2805	18.1364	0.1849	18.3287	0.8733
300	26.85	18.53	18.5054	0.1328	18.4819	0.2598	18.5600	0.1620	18.4612	0.3713	18.6523	0.6598
303	29.85	18.64	18.6467	0.0359	18.6223	0.0947	18.7029	0.3375	18.6004	0.2124	18.7927	0.8190
313	39.85	19.11	19.1130	0.0158	19.0882	0.1139	19.1692	0.3099	19.0644	0.2386	19.2684	0.8289
323	49.85	19.57	19.5721	0.0108	19.5506	0.0992	19.6209	0.2599	19.5284	0.2126	19.7562	0.9514
333	59.85	20.02	20.0238	0.0190	20.0095	0.0524	20.0587	0.1935	19.9924	0.1379	20.2563	1.1804
343	69.85	20.47	20.4679	0.0103	20.4652	0.0236	20.4836	0.0667	20.4564	0.0664	20.7691	1.4612
350	76.85	20.81	20.7742	0.1723	20.7822	0.1334	20.7738	0.1741	20.7812	0.1384	21.1358	1.5655
353	79.85	20.91	20.9042	0.0276	20.9177	0.0366	20.8963	0.0653	20.9204	0.0497	21.2949	1.8407
363	89.85	21.34	21.3326	0.0348	21.3671	0.1270	21.2975	0.1991	21.3844	0.2081	21.8340	2.3147
373	99.85	21.77	21.7528	0.0789	21.8136	0.2002	21.6878	0.3776	21.8484	0.3601	22.3867	2.8328

A5 Porcentajes de error de la viscosidad dinámica para cada ecuación obtenida

A6 Análisis de temperaturas en las placas

En esta sección se muestra un esquema de las placas metálicas usadas en el interior de la chimenea solar y los puntos elegidos para su análisis. Posteriormente, se muestra una tabla con las lecturas de temperatura para cada punto, tanto al sol como a la sombra. Finalmente, se presentan las graficas que fueron utilizadas para comparar la distribución de las temperaturas de acuerdo a la dirección en la placa.



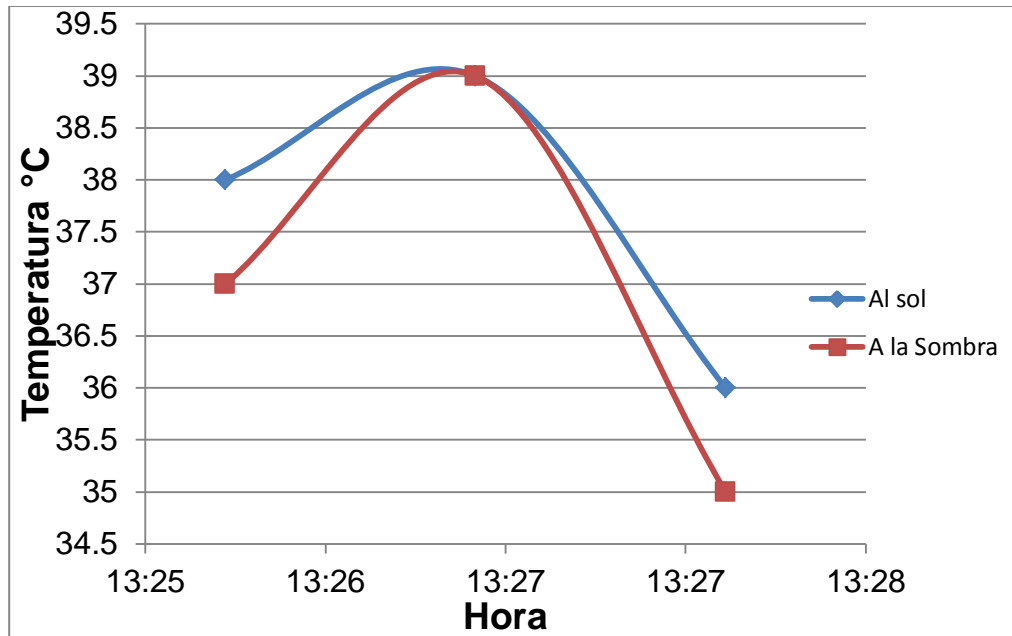
Placa Superior						
Punto	Hora	Primera toma		Segunda toma		
		Sol (°C)	Sombra (°C)	Hora	Sol (°C)	Sombra (°C)
1	13:26	38	37	14:05	39	38
2	13:27	39	39	14:06	42	42
3	13:28	36	35	14:06	37	37
4	13:30	39	39	14:07	41	41
5	13:31	45	44	14:08	45	44
6	13:32	42	41	14:09	37	35
7	13:33	39	39	14:10	42	42
8	13:34	42	41	14:10	45	45
9	13:35	36	36	14:11	43	43
10	13:36	39	39	14:12	43	42
11	13:37	41	41	14:12	48	46
12	13:38	38	38	14:13	42	41
13	13:39	39	39	14:14	41	41
14	13:40	40	40	14:15	46	46
15	13:40	37	36	14:15	40	40

Placa inferior						
Punto	Hora	Primera toma		Segunda toma		
		Sol (°C)	Sombra (°C)	Hora	Sol (°C)	Sombra (°C)
1	13:48	37	37	14:26	38	38
2	13:49	32	32	14:27	31	31
3	13:50	33	33	14:28	38	38
4	13:51	41	41	14:28	43	42
5	13:52	38	38	14:29	40	39
6	13:53	38	38	14:30	38	38
7	13:53	39	39	14:31	42	42
8	13:54	40	40	14:31	44	44
9	13:55	36	36	14:32	45	45
10	13:56	44	43	14:33	45	45
11	13:57	44	44	14:33	51	50
12	13:57	43	42	14:34	49	49
13	13:58	43	43	14:35	43	43
14	13:59	48	48	14:36	44	44
15	14:00	42	42	14:37	38	38

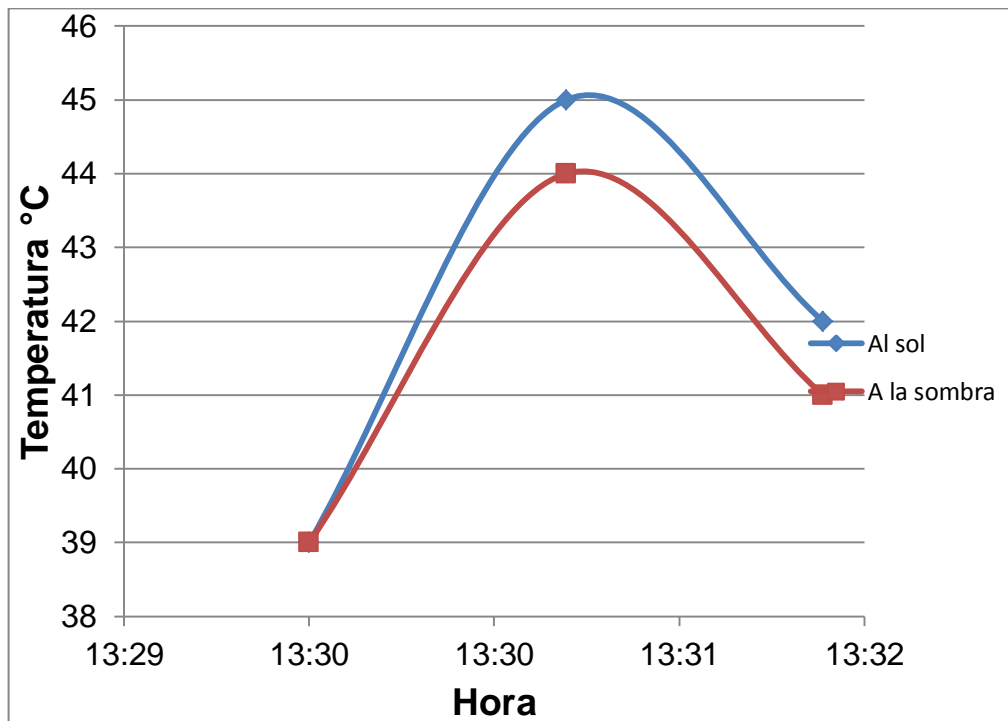
Gráficas para la lámina superior en la chimenea solar

Primera toma de datos

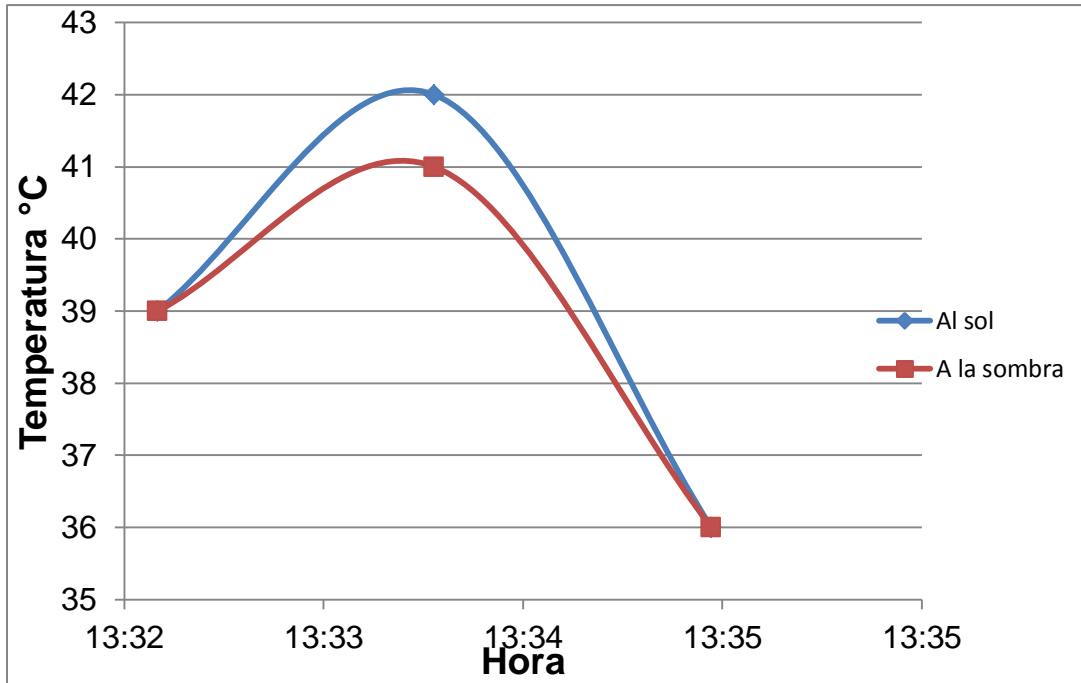
- Para los puntos 1, 2 y 3



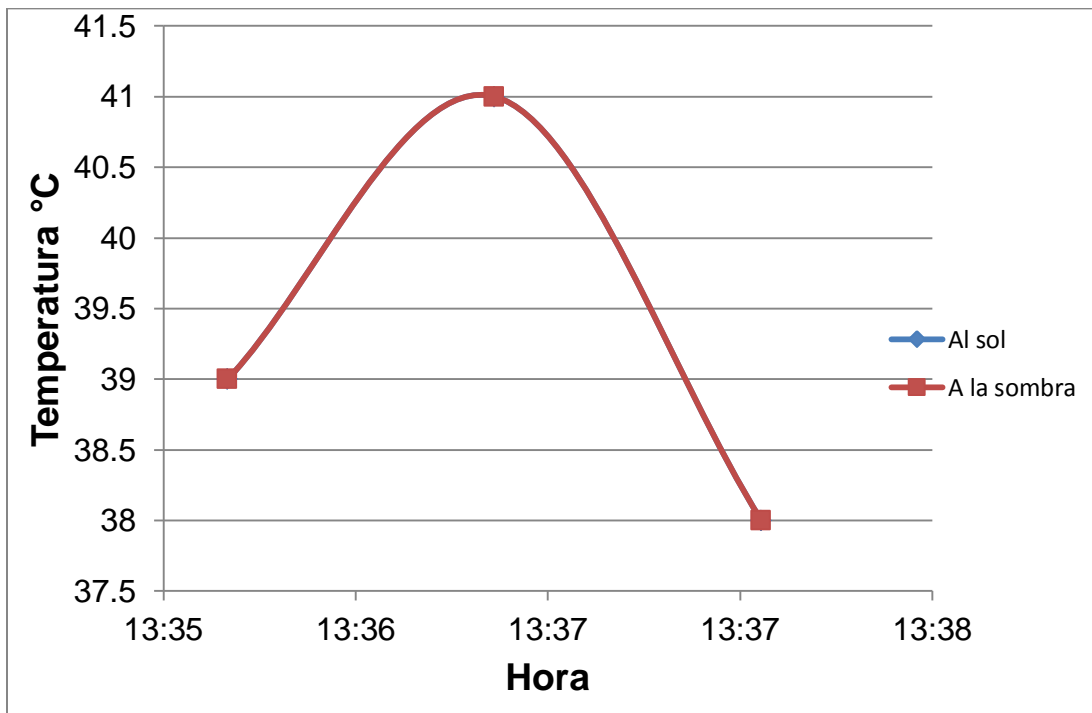
- Para los puntos 4, 5 y 6



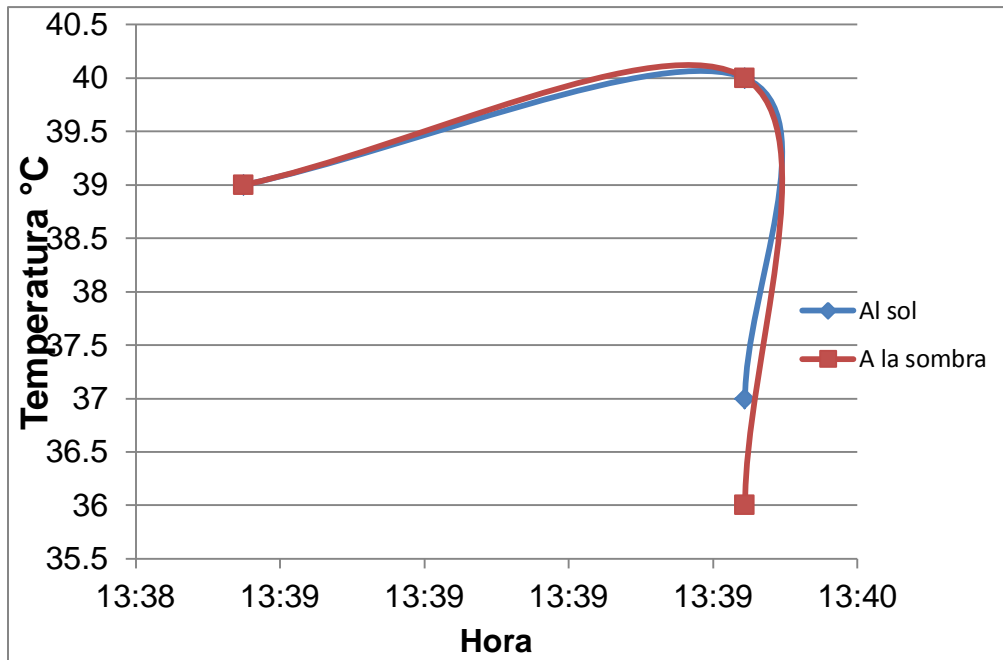
- Para los puntos 7, 8 y 9



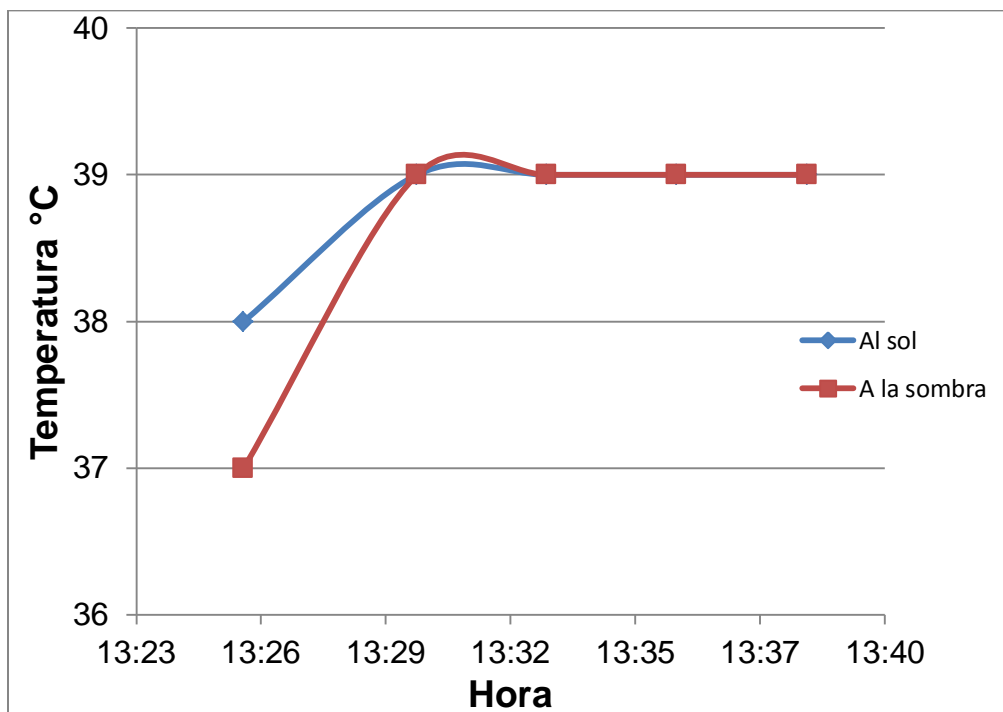
- Para los puntos 10, 11 y 12



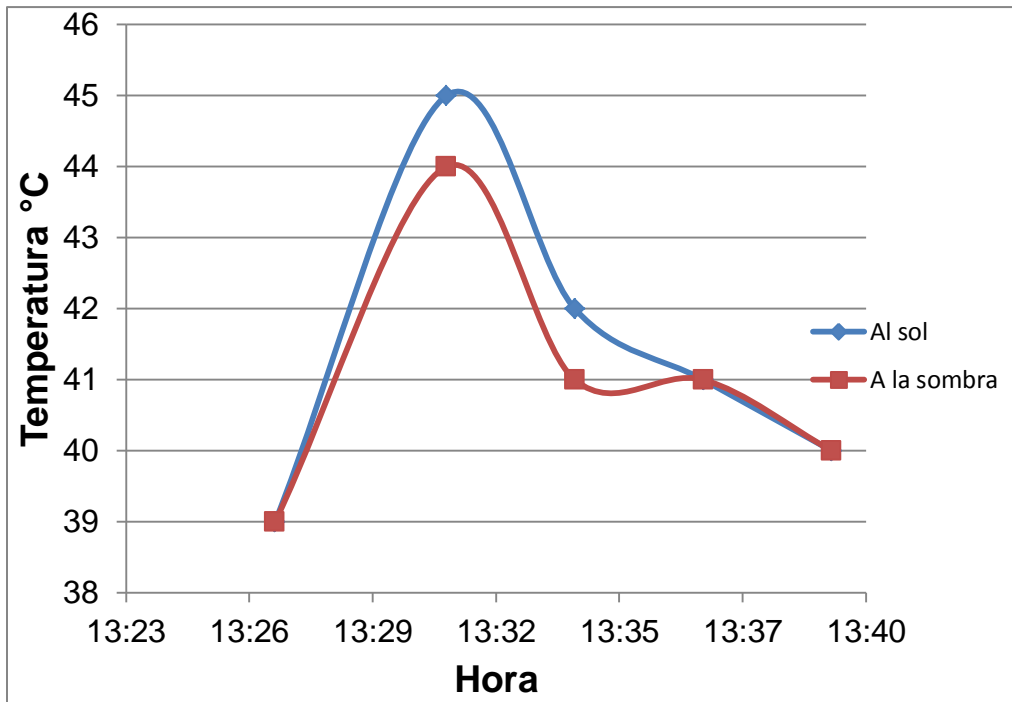
- Para los puntos 13, 14 y 15



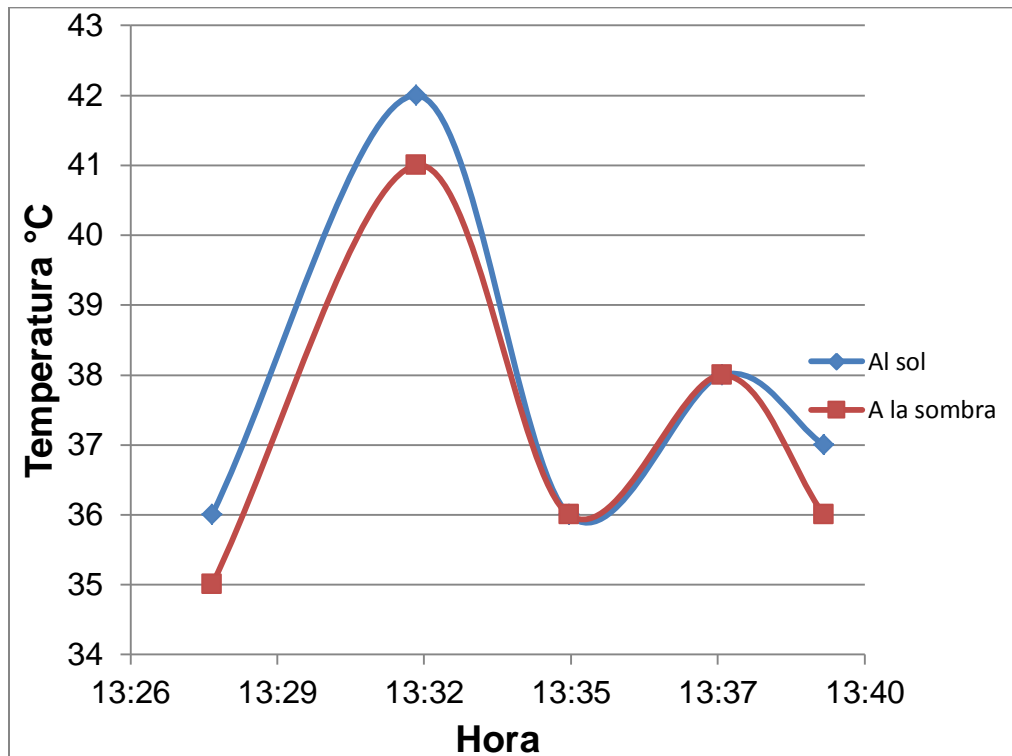
- Para la columna de puntos de la izquierda (1, 4, 7, 10 y 13)



- Para la columna de puntos del centro (2, 5, 8, 11 y 14)

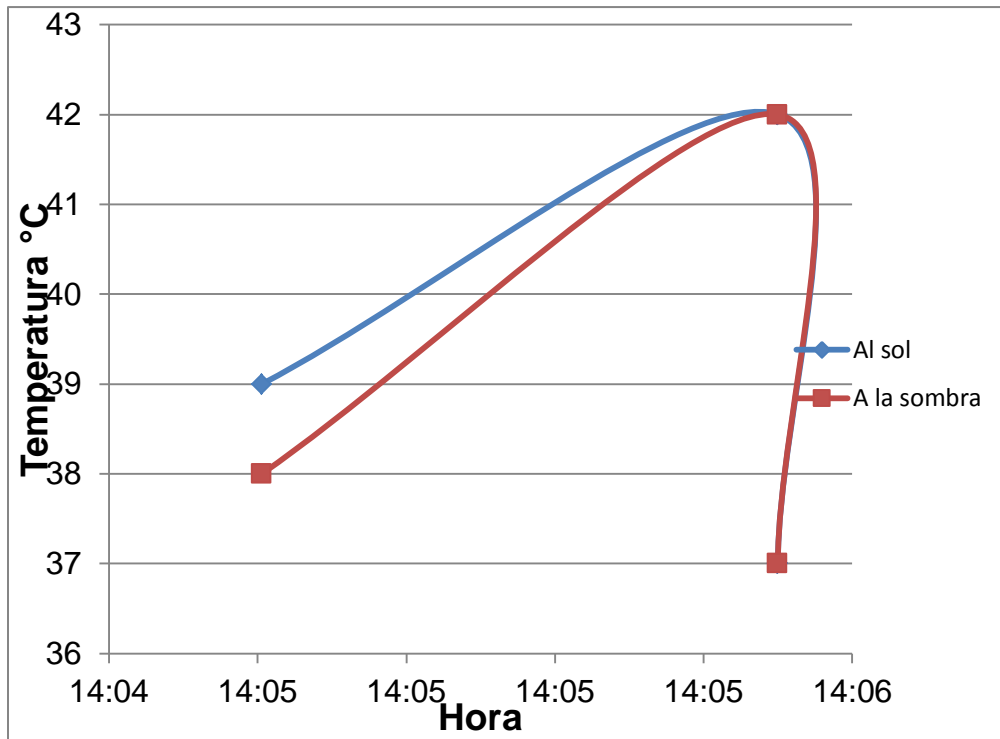


- Para columna de puntos de la derecha (3, 6, 9, 12 y 15)

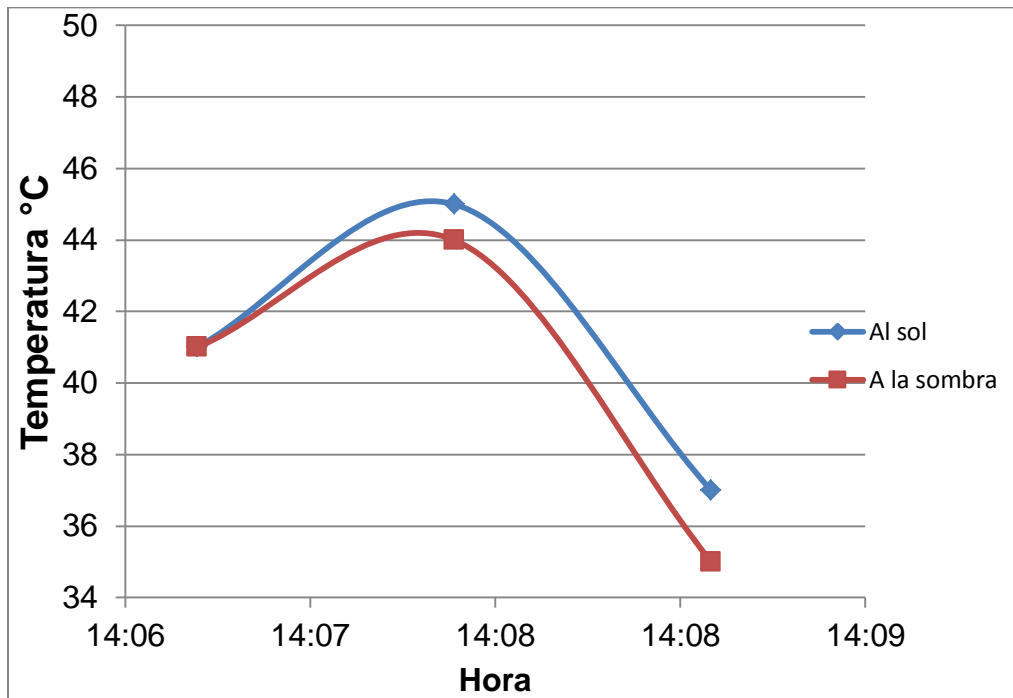


Para la segunda toma de datos

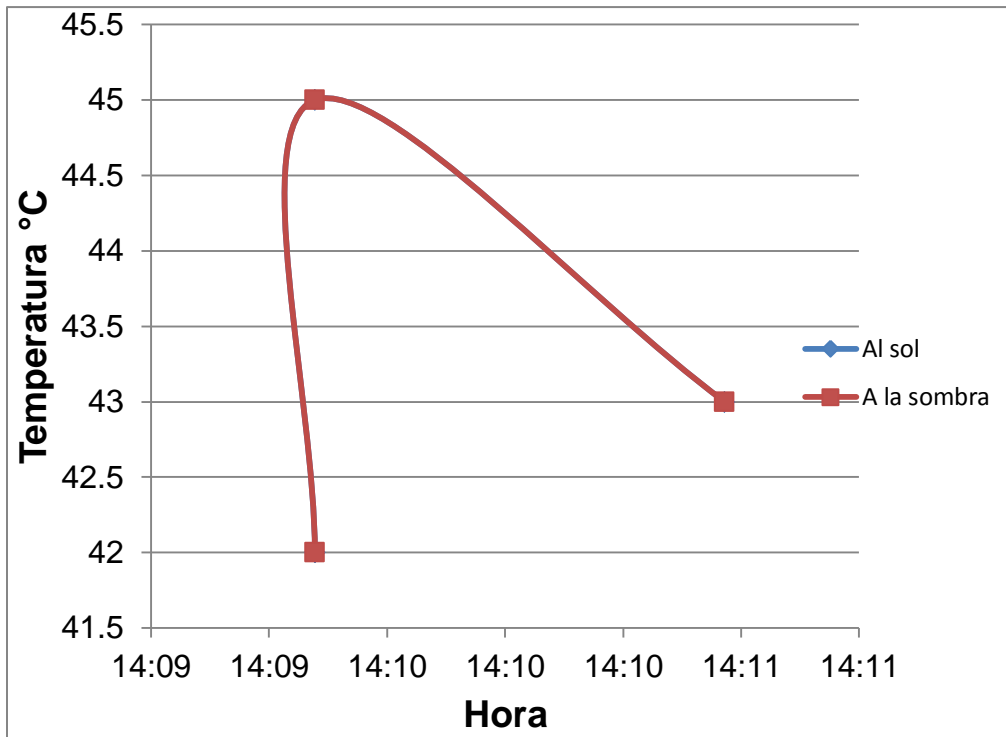
- Para los puntos 1, 2 y 3



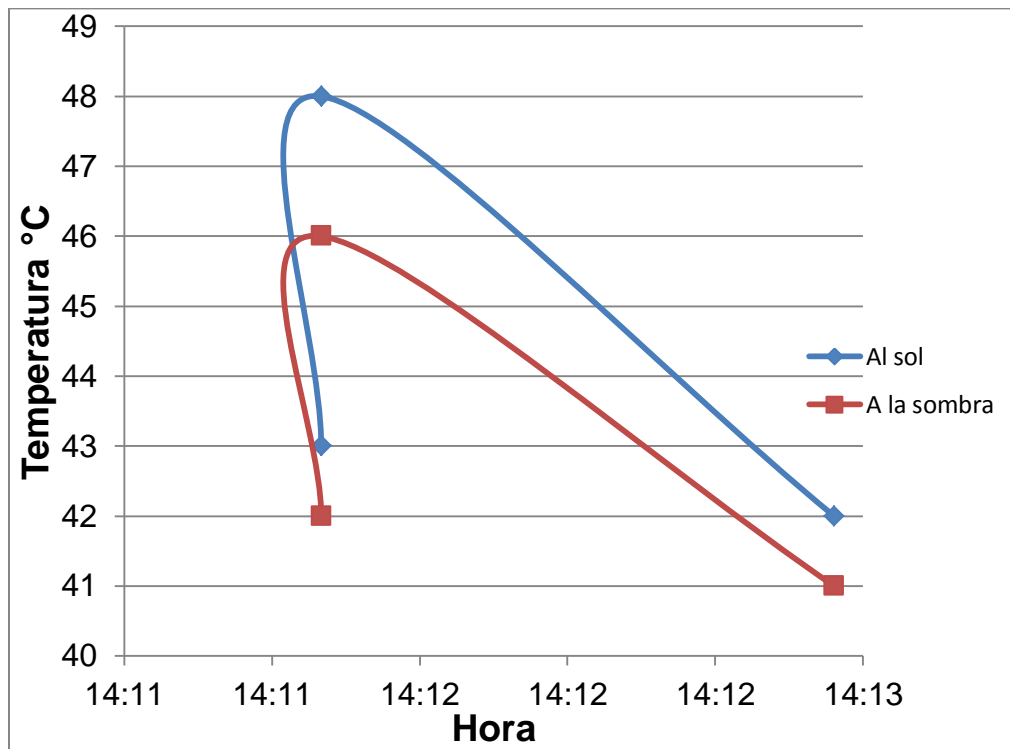
- Para los puntos 4, 5 y 6



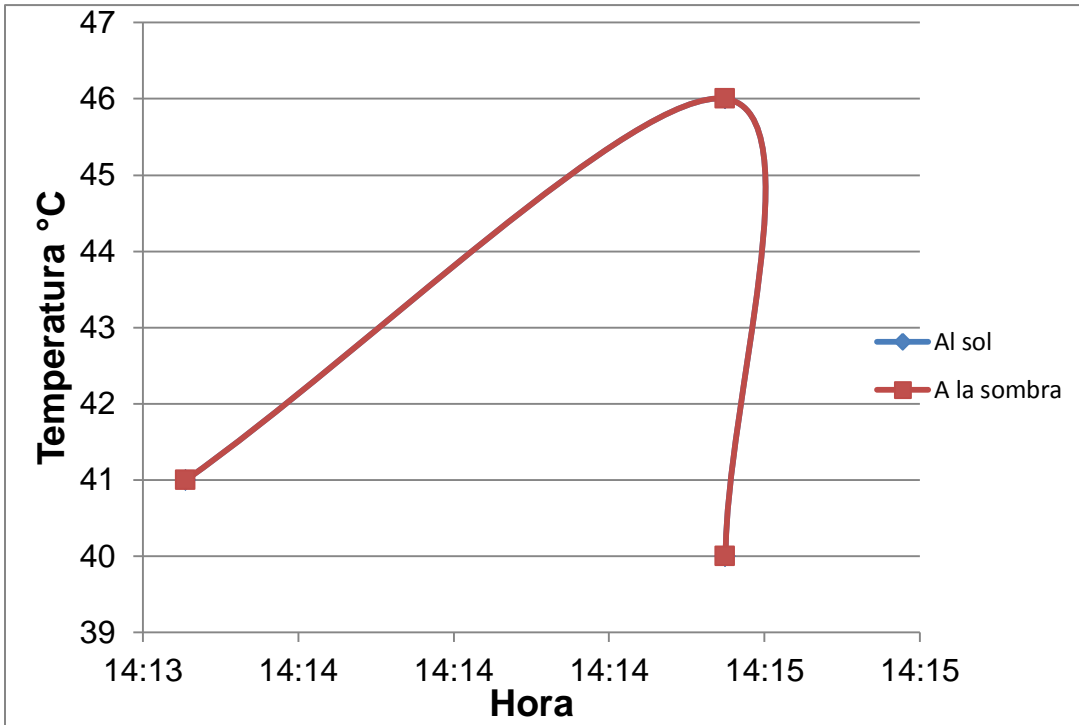
- Para los puntos 7, 8 y 9



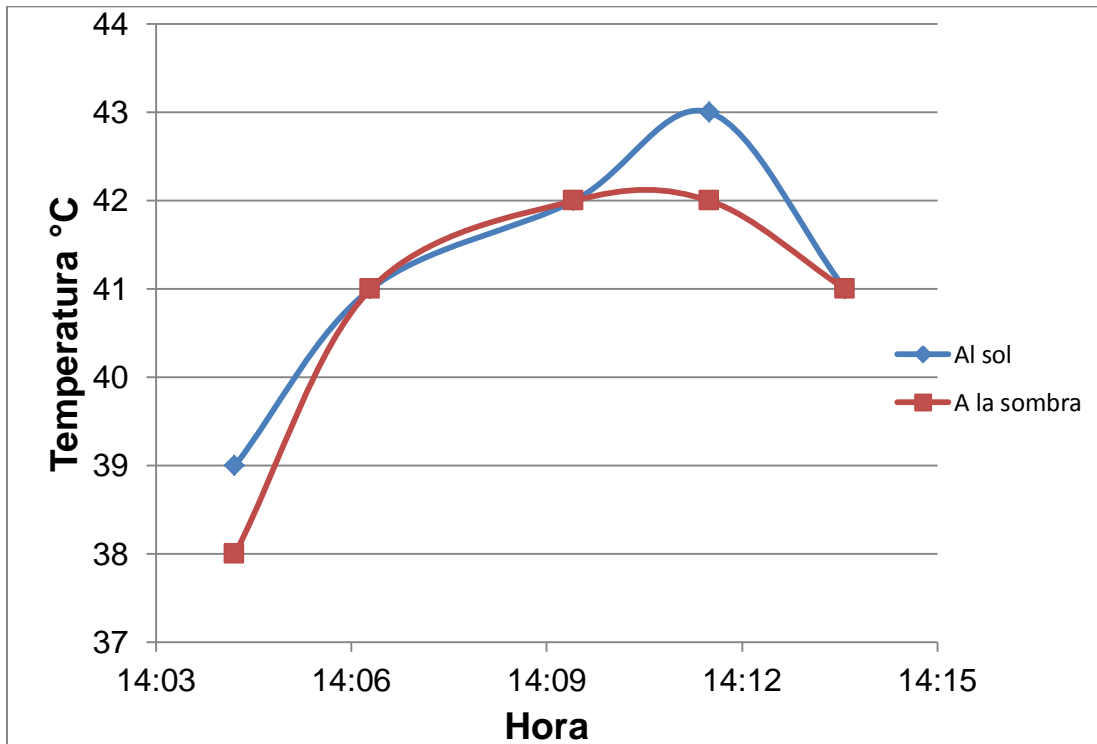
- Para los puntos 10, 11 y 12



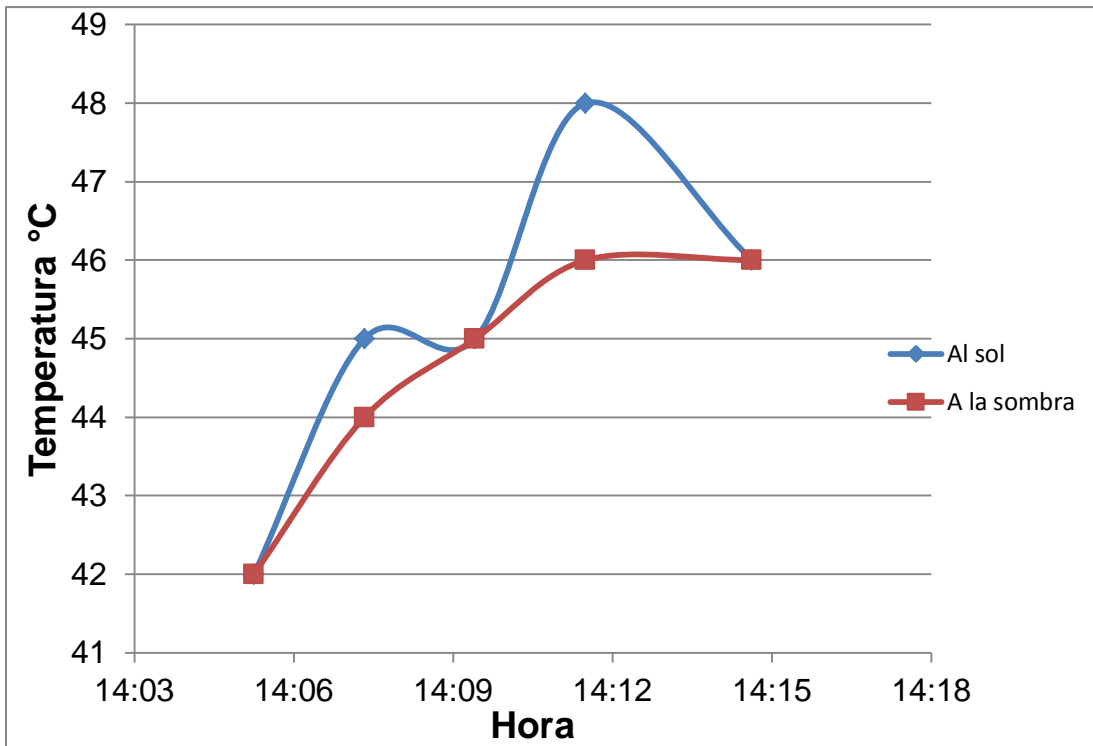
- Para los puntos 13, 14 y 15



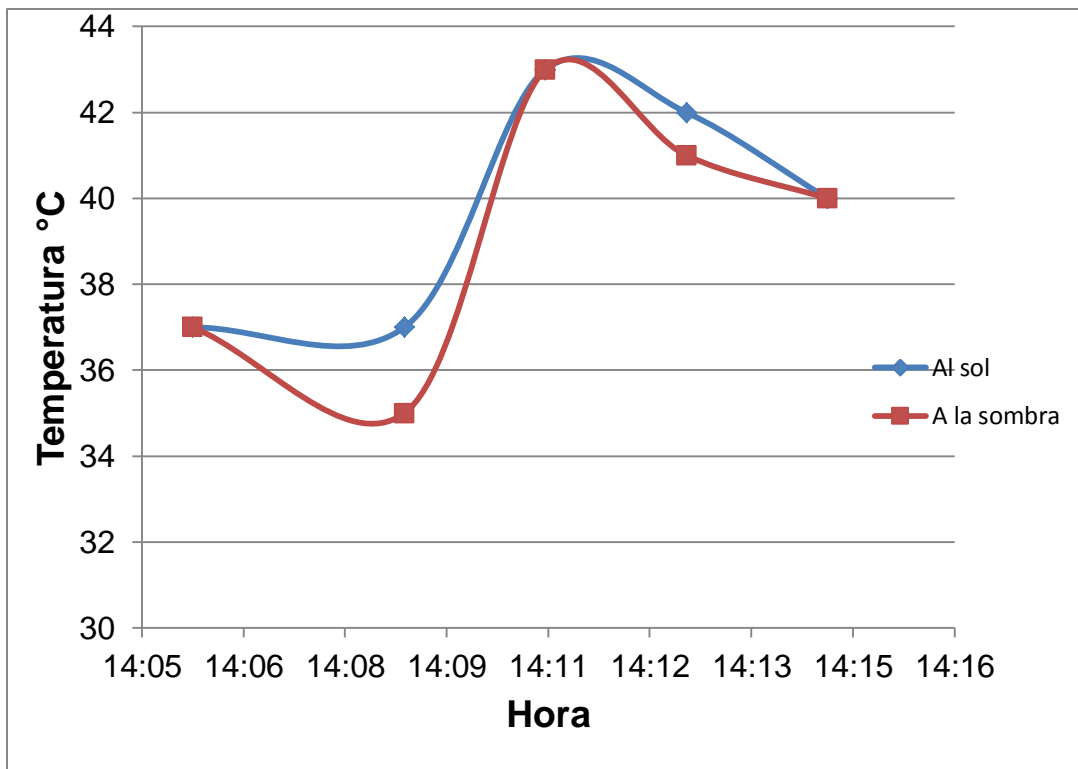
- Para los puntos verticales de la izquierda (1, 4, 7, 10 y 13)



- Para los puntos verticales centrales (2, 5, 8, 11 y 14)



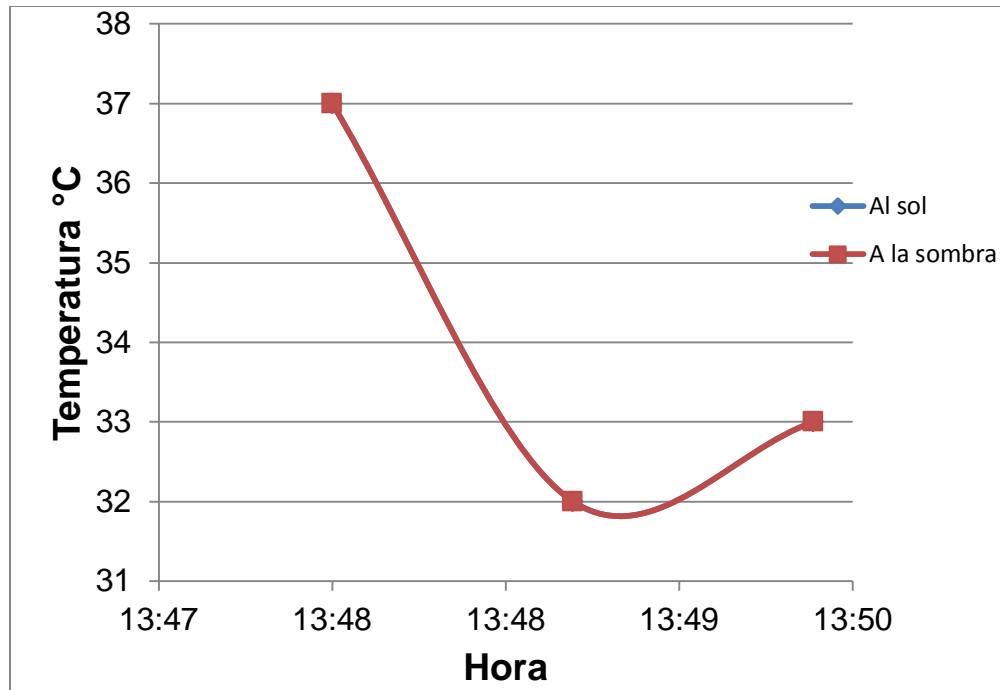
- Para los puntos verticales de la derecha (3, 6, 9, 12 y 15)



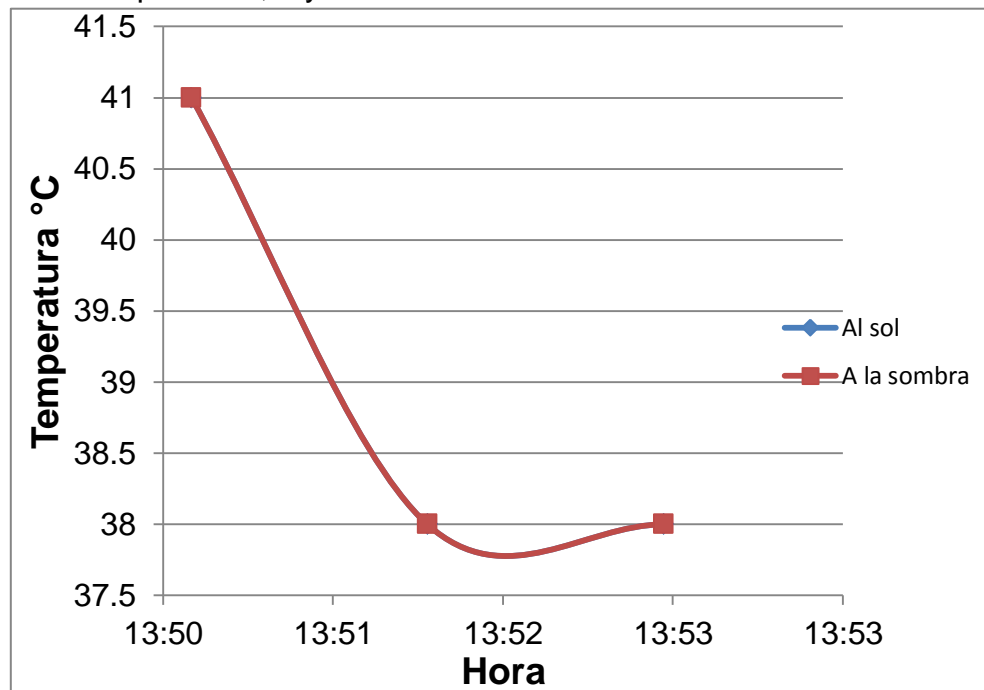
Gráficas para la lámina inferior en chimenea solar

Primera toma de datos

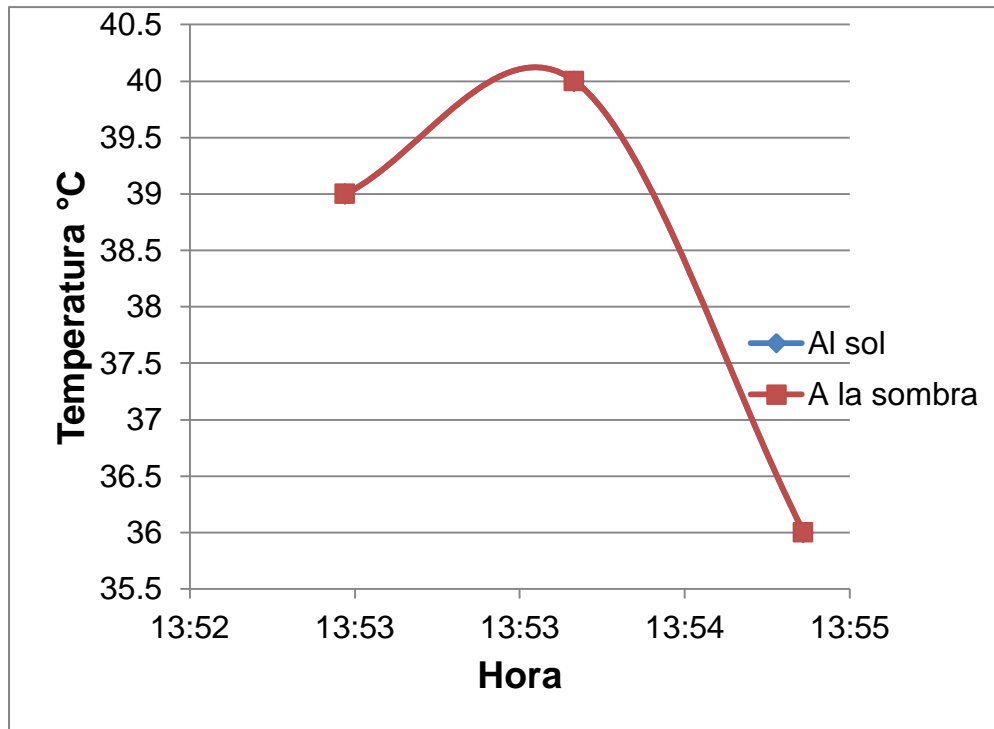
- Para los puntos 1, 2 y 3



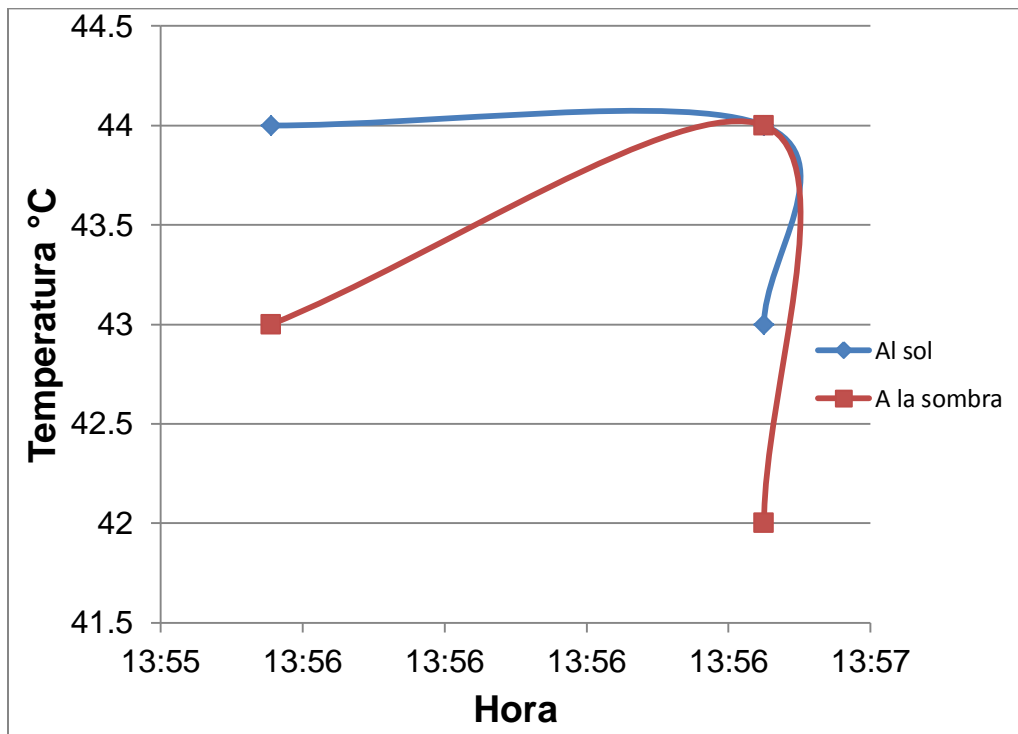
- Para los puntos 4, 5 y 6



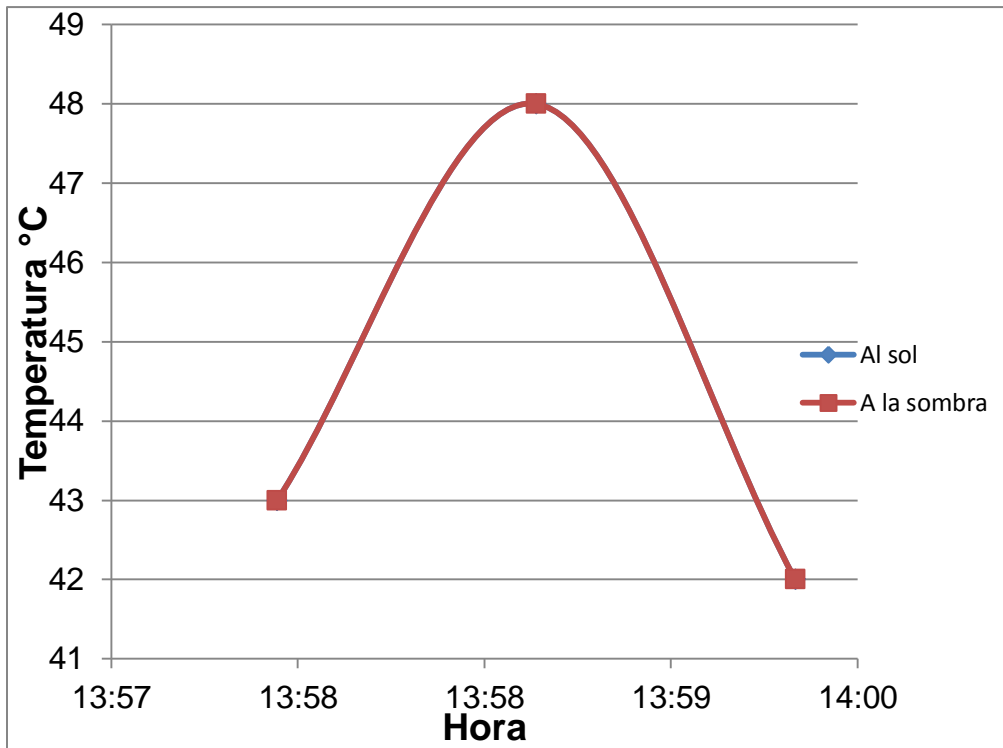
- Para los puntos 7, 8 y 9



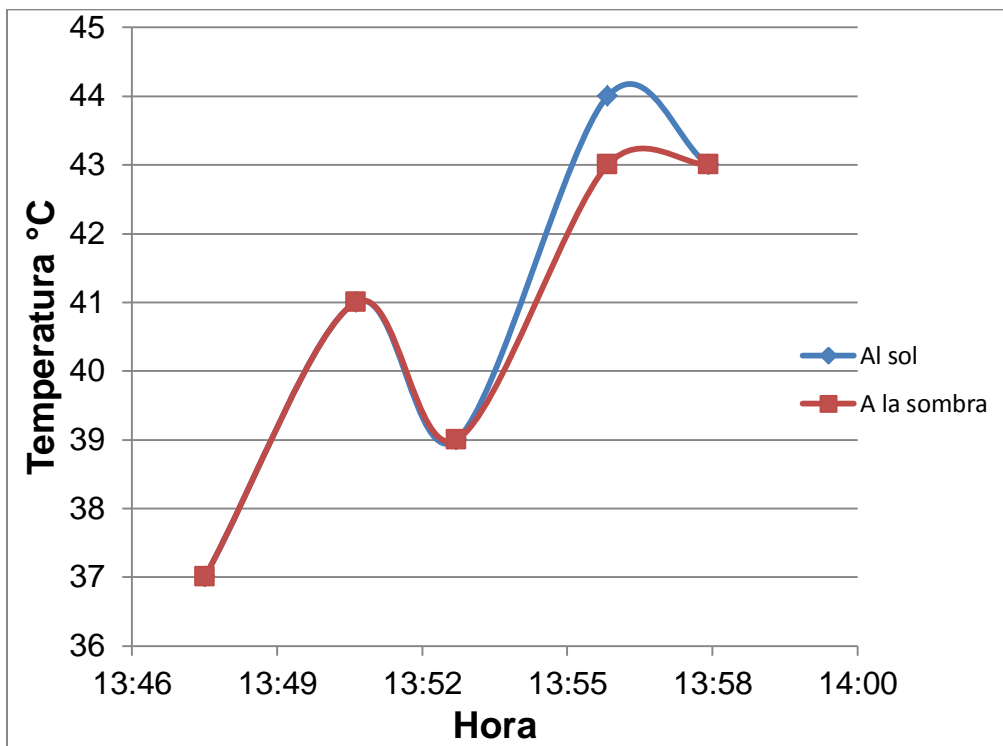
- Para los puntos 10, 11 y 12



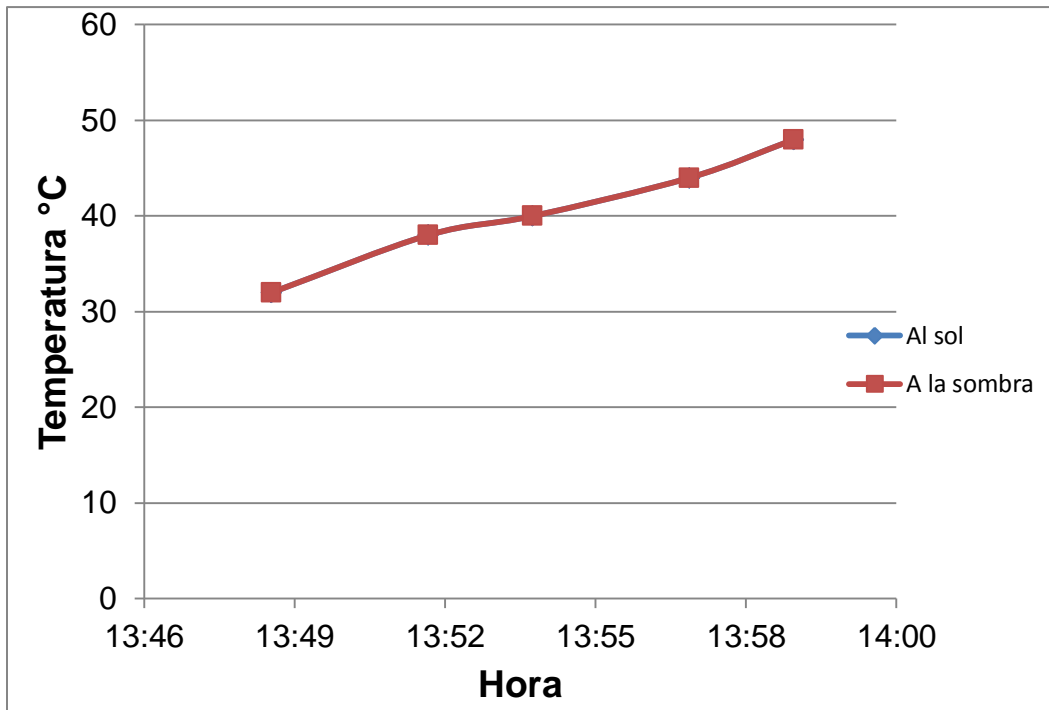
- Para los puntos 13, 14 y 15



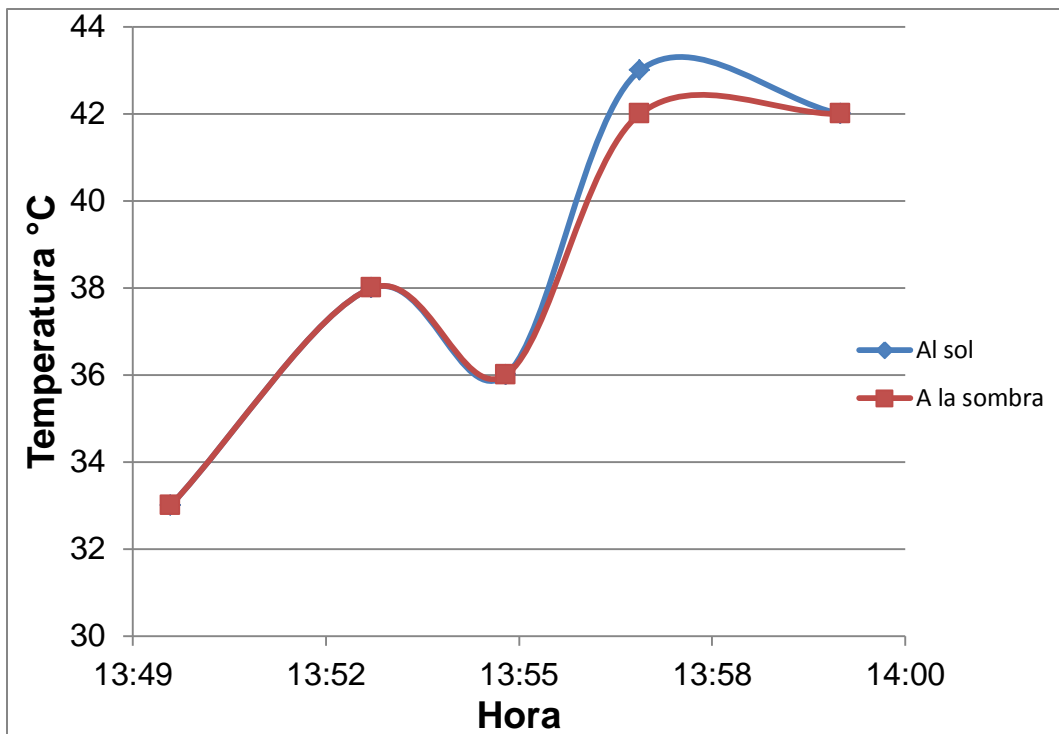
- Para los puntos verticales de la izquierda (1, 4, 7, 10 y 13)



- Puntos verticales centrales (2, 5, 8, 11 y 14)

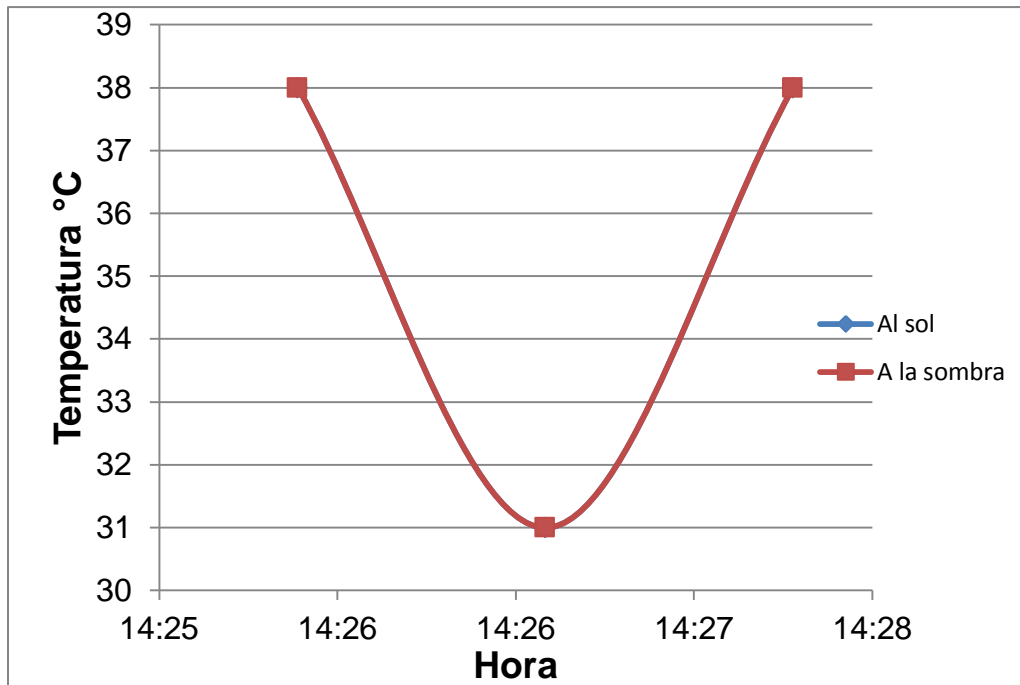


- Puntos verticales de la derecha (3, 6, 9, 12 y 15)

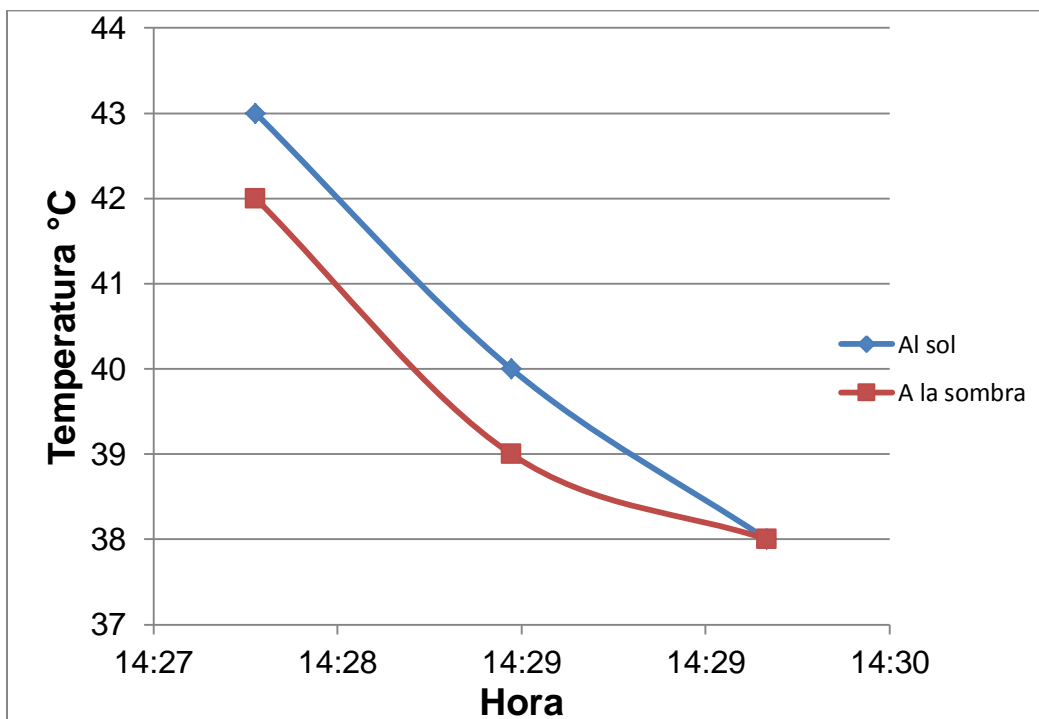


Para la segunda toma de datos

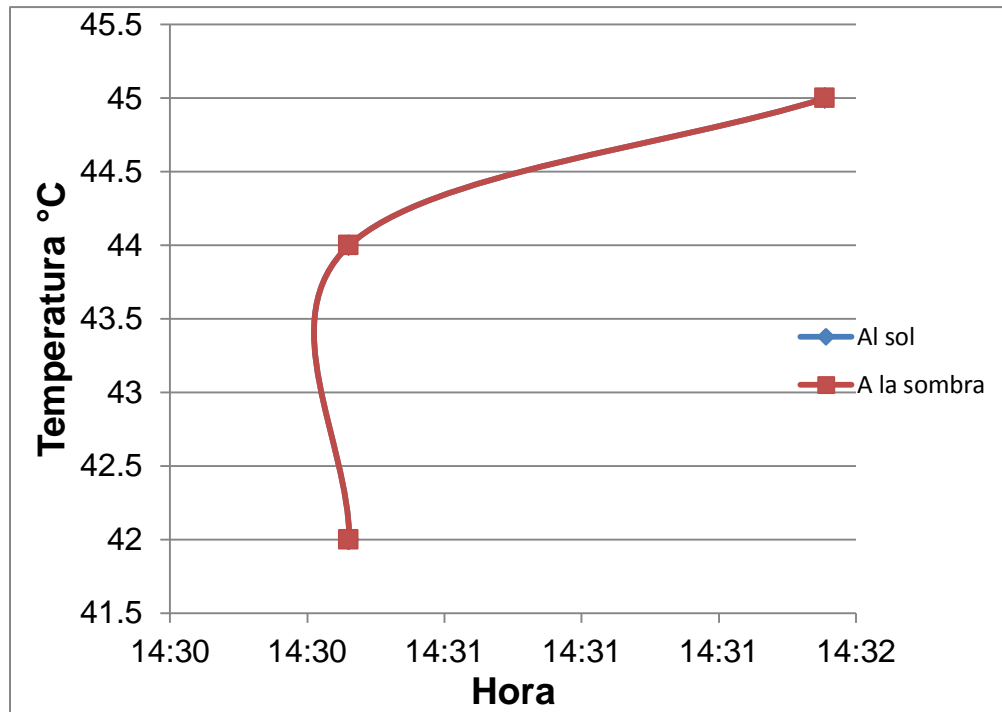
- Para los puntos 1, 2 y 3



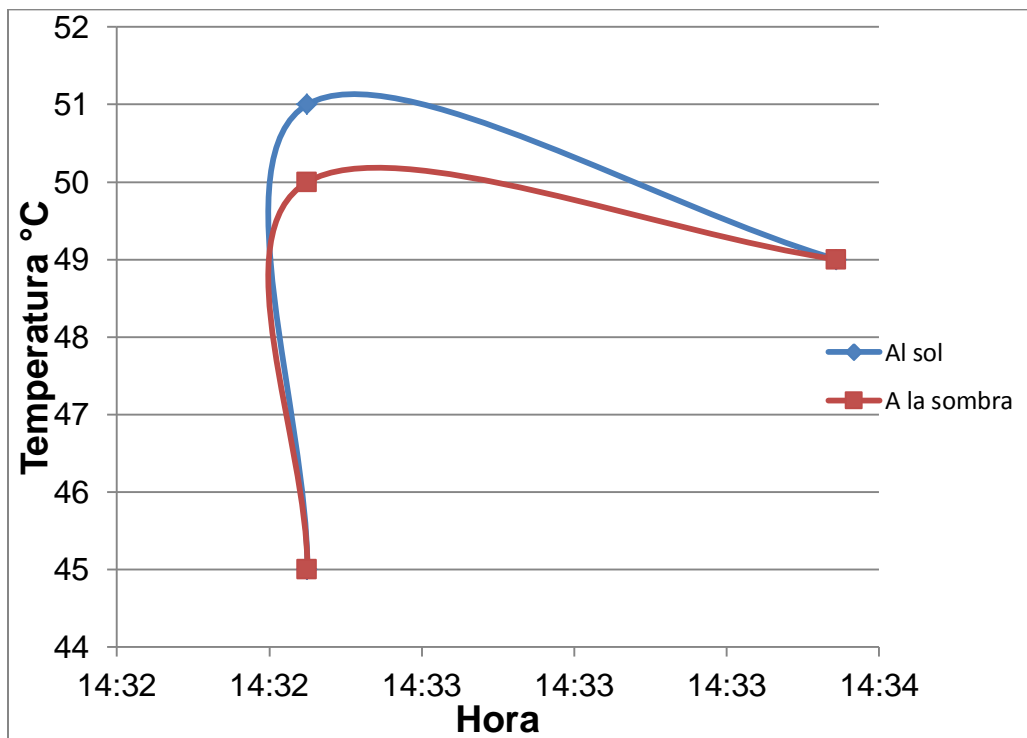
- Para los puntos 4, 5 y 6



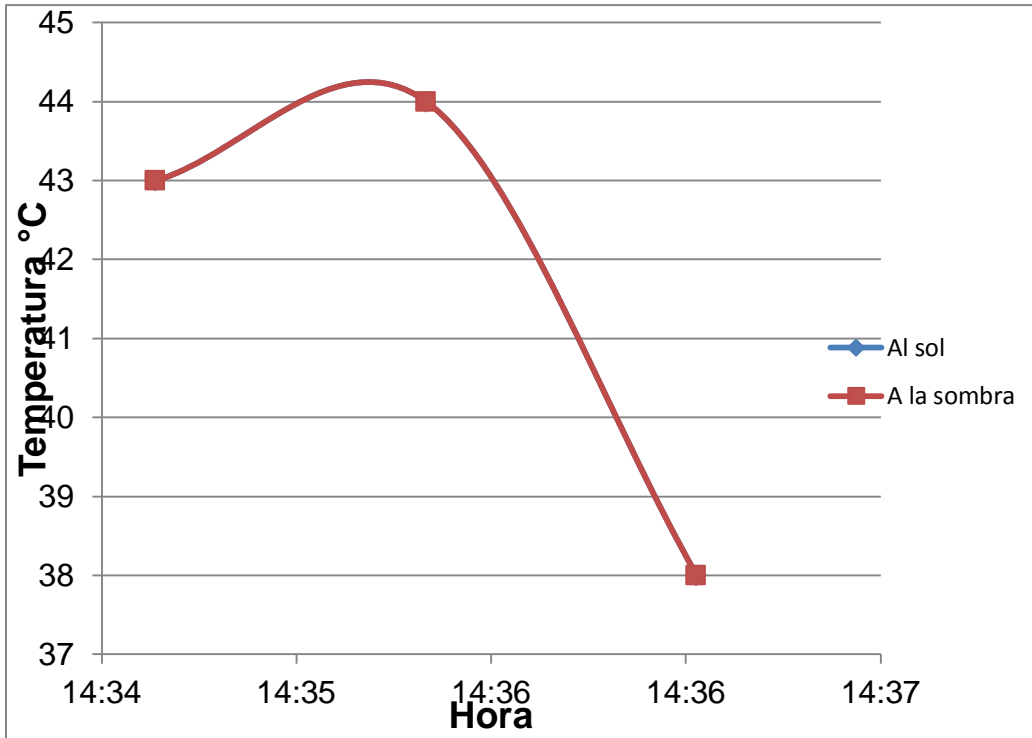
- Para los puntos 7, 8 y 9



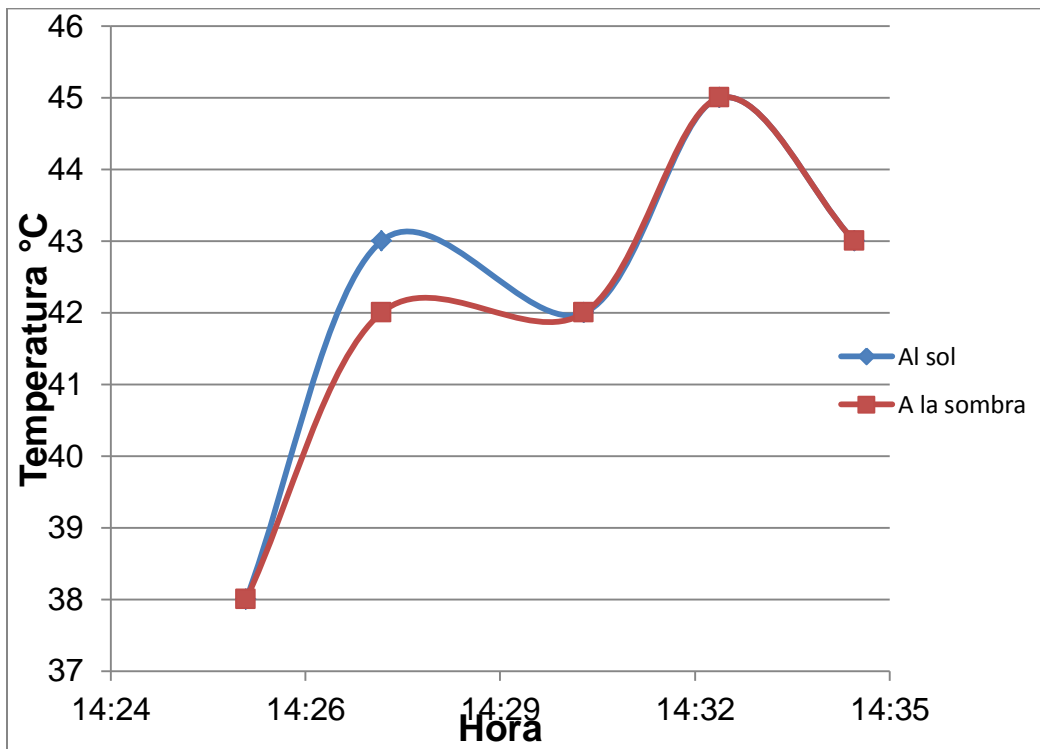
- Para los puntos 10, 11 y 12



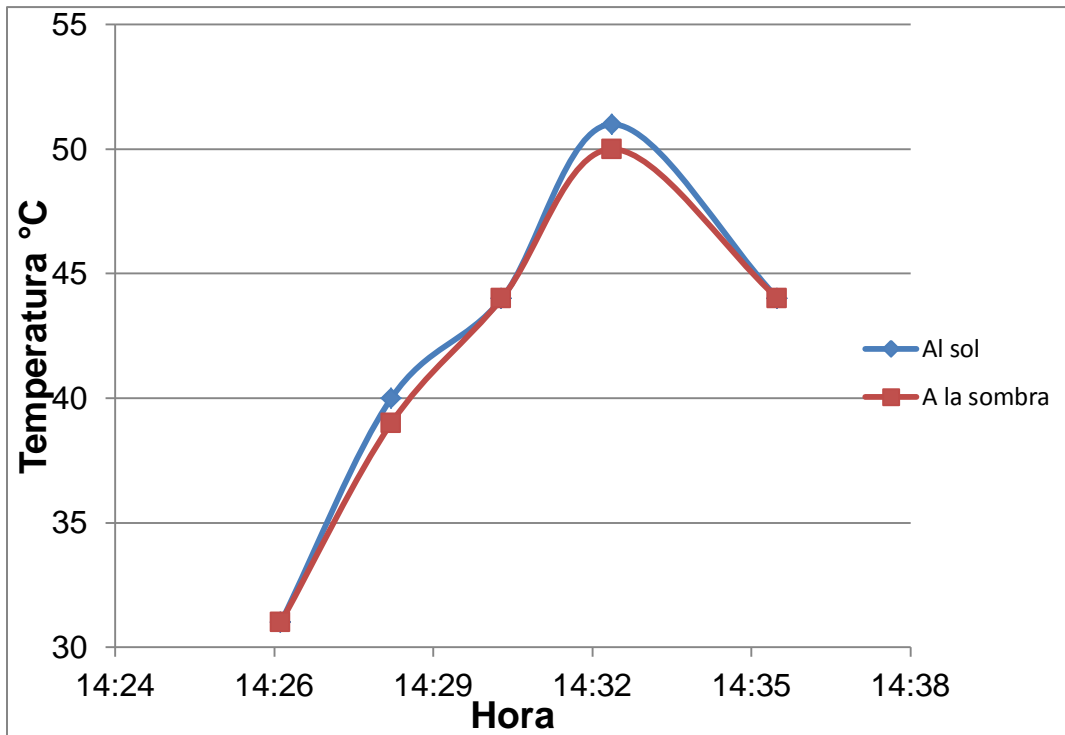
- Para los puntos 13, 14 y 15



- Para los puntos verticales de la izquierda (1, 4, 7, 10 y 13)



- Para los puntos verticales del centro (2, 5, 8, 11 y 14)



- Para los puntos verticales de la derecha (3, 6, 9, 12 y 15)

