

La Chimenea Solar

Parámetros de diseño de un sistema pasivo generador de movimiento de aire

Tesis Doctoral

Doctorado en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente
Universidad Politécnica de Cataluña
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona

Juan Carlos León Vázquez

Tutores:
Dra. Helena Coch Roura
Dr. Antonio Isalgué Buxeda

Barcelona
2017

Agradecimientos:

A mis padres, Carole y Carlos por su paciencia y dedicación constantes,
A mi hermano Sergio, por ser parte de muchos proyectos juntos,
A Violeta, por las múltiples sesiones de discusión, simplificación y contraste de ideas,

A mis tutores, Helena y Tony por su guía y comentarios precisos,
A Ana Pagés por aportar su criterio, tiempo e interés para consolidar este trabajo,

A Ana y Patsy por la amistad y hospitalidad al recibirnos en casa,
A Víctor, Itzia y Gilkauris por brindar siempre su apoyo incondicional,
a Elena, Nur, Jordi, Eduard por intentar reunirnos cada vez que es posible y
a todos los amigos que hemos hecho a lo largo de este proceso de aprendizaje.

Agradecimiento especial al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT (México)
por fomentar la formación de recursos humanos en instituciones de alta calidad
académica, permitiendo de esta manera financiar este proyecto de investigación.
Agradezco también a la Secretaría de Educación Pública SEP (México) por el apoyo
complementario al financiamiento del proyecto de investigación.

Concluyo expresando la satisfacción de pertenecer a la Universidad Politécnica de
Cataluña UPC (España), siendo ésta una institución donde se comparten ideas, proyectos
y experiencias.

Resumen

La chimenea solar es un sistema pasivo de acondicionamiento climático. Al tener la capacidad de generar movimiento de aire al interior de una habitación mediante la captación de radiación solar, este flujo de aire amplifica la zona de confort incrementando las condiciones de habitabilidad para el ser humano en situaciones de temperatura de aire y humedad elevados, principales características del clima tropical cálido húmedo.

A pesar de que este dispositivo presenta una difusión extensiva en bibliografía relacionada a la eficiencia energética y medio ambiente, su aplicación real en la arquitectura es limitada. Esta investigación plantea identificar los parámetros de diseño que inciden en el desempeño de la chimenea solar, mediante el estudio de la morfología del dispositivo y la posición de las aberturas que intervienen en la trayectoria del flujo de aire.

La evaluación de dichos parámetros se realiza con la construcción de un modelo virtual en el programa informático DesignBuilder, donde se evalúan las variables de diseño estableciendo puntos de cálculo de velocidad de aire. Principalmente el punto denominado HAB (Centro de la Habitación), que emula la posición del usuario.

Posteriormente, mediante la construcción de un modelo experimental, que recoge los resultados de la etapa de simulación, se evalúa el comportamiento de la chimenea solar en la generación de movimientos de aire al centro de la habitación y en el hueco de entrada de la chimenea solar durante un ciclo anual completo, lo cual permite evaluar su desempeño en diferentes escenarios climáticos.

Por último, la comparación de los registros de velocidad para los puntos de cálculo del modelo experimental con los calculados por DesignBuilder para determinar el grado de aproximación de la herramienta informática.

Palabras clave: Chimenea solar, ventilación natural, confort térmico, clima cálido húmedo, DesignBuilder, ventilación cruzada.

Abstract

The solar chimney is a climatic conditioning passive system. This can generate air movements in a room by means of solar radiation. These air movements can amplify the comfort zone increasing human habitability conditions at high air temperature and humidity rates, main characteristics of warm tropical humid climate.

Although this device has extensive diffusion in literature related to energy efficiency and environment, its real application in architecture is limited. This research aims to identifying the design parameters affecting the performance of the solar chimney, by studying the device morphology as well as the position of the openings involved in the air flow path.

The evaluation process begins with the implementation of a basic model within the DesignBuilder software, establishing some calculation points, mainly the point called HAB that emulates the user's position within the room. Subsequently, the construction of an experimental model, which collects the results of the simulation stage, evaluates the behavior of the solar chimney in the generation of air movements to the center of the room and in the entrance opening of the chimney for a complete annual cycle. It is possible to evaluate its performance in different climatic scenarios.

Finally, comparison of the velocity records for the points of calculation of the experimental model with those calculated by Design Builder to determine the degree of approximation of the computer tool.

Keywords: Solar chimney, natural ventilation, thermal comfort, warm humid climate, DesignBuilder, cross ventilation.

Contenido

Resumen.....	5
Introducción	9
Justificación.....	10
Objetivos.....	11
Objetivo General	11
Objetivos Específicos	11
1. Antecedentes	13
1.1 Clima tropical húmedo	13
1.2 Datos Climatológicos Villahermosa, Tabasco, México.	14
1.3 Confort Ambiental.....	18
1.3.1 Estrategias para el confort en el clima cálido húmedo	20
1.3.2 Ventilación natural.....	21
1.3.3 Ventilación de Confort.....	27
1.3.4 La Chimenea Solar como estrategia de confort.....	29
1.4 La chimenea solar.....	31
1.4.1 Principios Físicos.....	31
1.4.2 Descripción de la Chimenea Solar.....	32
1.5 Estado del arte.....	35
2 Metodología.....	39
2.1 Simulación Energética.....	40
2.1.1 Criterio de diseño de Modelo Base para Simulación	40
2.1.2 Modelo Experimental.....	42
2.1.3 Validación de Datos Medidos con Simulación.	48
3 Simulación y Experimentación	51
3.1 Simulación.....	51
3.1.1 Descripción del Modelo Base de Simulación.....	51
3.2 Modelo Experimental.....	55
3.2.1 Descripción del Modelo Experimental	56
3.2.2 Dimensiones	56
3.2.3 Materiales.....	57
3.2.4 Instrumentos de Medición	58
3.2.5 Construcción del Modelo Experimental.....	59
4 Resultados.....	65
4.1 Resultados de la Simulación Energética.....	65
4.1.1 Ancho de Cámara (ACHS)	65
4.1.2 Cámara (CA).....	66

4.1.3	Hueco de Entrada (HE).....	67
4.1.4	Hueco de Salida (HS).....	69
4.1.5	Posición Hueco de Entrada (PHE).....	70
4.1.6	Torre (T)	72
4.1.7	Posición de Torre (PT)	73
4.1.8	Posición Hueco de Entrada + Posición Torre (PHE+PT).....	74
4.1.9	Selección de Variables de Impacto.....	75
4.1.10	Evaluación de Variables.....	77
4.1.11	Matriz de combinación de las variables T y PHE.....	78
4.1.12	Consideraciones finales previas a Modelo Experimental (ME).....	79
4.1.13	Modelo Final	80
4.2	Resultados del Modelo Experimental.....	81
4.2.1	Análisis de datos meteorológicos.....	81
4.2.2	Análisis de variables.....	86
4.2.3	Punto de medición HAB	86
4.2.4	Punto de medición HM	87
4.2.5	Análisis de Correlaciones entre variables.....	87
4.2.6	Análisis de variables en el ciclo anual.....	88
4.3	Validación de simulaciones con EPW de datos medidos	89
5	Conclusiones	95
5.1	Simulación energética	95
5.2	Modelo Experimental.....	96
5.3	Validación de simulaciones con archivo EPW de datos medidos.....	97
5.4	Perspectivas de investigación	98
	Lista de Ilustraciones	99
	Lista de figuras.....	99
	Lista de tablas.....	101
	Lista de gráficas.....	102
	Bibliografía	103
	Anexos.....	105
	Anexo 1: Simulación Energética	107
	Anexo 2: Modelo experimental	113
	Instrumentación	113
	Instalación de Instrumentos de Medición	113
	Pruebas y Descarga de datos	115
	Anexo 3: Simulaciones EPW.....	131
	Anexo 4: Reporte Fotográfico del experimento.....	137
	Anexo 5: Fichas técnicas equipos de medición.....	143

Introducción

En la primera mitad del siglo veinte, la disponibilidad y relativo bajo costo de recursos energéticos como el petróleo incentivó un desarrollo acelerado y exponencial en diversos sectores; que consecuentemente demandaba aún más energía, la fuente parecía inagotable, por lo que no había razones para pensar en reducir su consumo. La primera crisis del petróleo registrada en 1973, que básicamente se originó a raíz del embargo económico de la OPEP hacia los países industrializados occidentales, dejó en evidencia el excesivo consumo y la dependencia energética en que estaba fundada su sociedad y economía; razón por la cual se tomaron medidas correctivas y de ajuste para minimizar el impacto de este consumo y dependencia; como por ejemplo la creación de las primeras instituciones gubernamentales de ahorro, racionalización y eficiencia energética; en una primera etapa en los sectores de transporte e industria, y de forma gradual en el campo de la edificación.

Como consecuencia de este fenómeno de excesivo consumo y racionalización de la energía se retomaron estudios e investigaciones relacionados a efectos medio ambientales de las emisiones derivadas del uso de estas fuentes de energía, concluyendo su posible responsabilidad en el fenómeno del Calentamiento Global de la Atmósfera; es decir, el desarrollo exponencial de la sociedad en base al consumo excesivo de los recursos energéticos supera los sistemas y procesos naturales de asimilación.

La construcción es responsable del 45% del gasto energético total promedio de las sociedades medianamente desarrolladas, entre costos directos e indirectos. (González Díaz, 2004). Entendiendo como costos indirectos los realizados previamente o incluidos en otros sistemas que abastecen a la construcción; y costos directos los referentes a la construcción, operación y mantenimiento. El concepto de eficiencia energética puede intervenir en todos los aspectos, el objetivo de esta investigación incide en el área de operación: el consumo cotidiano.

La alta disponibilidad de energía y el desarrollo de tecnología de climatización e iluminación artificial permitieron que se diseñaran envolventes de edificios totalmente independientes de su entorno, ignorando toda característica constructiva que considerara la influencia del clima local (Yarke, 2005). Estos factores tecnológicos gradualmente gestaron un movimiento de formato internacional; una globalización arquitectónica, donde la escala de valores sufrió modificaciones y el sentido de adaptación del edificio a su entorno dejó de ser un tema fundamental.

Ahora bien, la vivienda es el principal instrumento que permite satisfacer las exigencias de confort adecuadas; modificando el entorno natural para aproximarnos a condiciones óptimas de habitabilidad; filtrando, absorbiendo o repeliendo los elementos medioambientales para conseguir este objetivo (Olgyay, 1963). La habitabilidad en función del ser humano es el objetivo de la edificación, por lo tanto debe ser una premisa de diseño, y el edificio en sí debe fluctuar entre las diferentes fuerzas con las que interactúa en la búsqueda del equilibrio energético, y este concepto podríamos denominarlo Arquitectura Homeostática.

La zona de confort puede ser descrita como el punto en el cual el ser humano invierte el mínimo de energía para adaptarse a su entorno (Olgyay, 1963). Entendiendo que la zona de confort no es un concepto agregado, sino un principio de equilibrio energético, donde el organismo activa sus sistemas de autorregulación térmica para alcanzar ese objetivo,

se concluye que el edificio debería conceptualizarse de esa forma; es posible aplicar el término homeostático como una metáfora de este sistema natural, donde el edificio desde su concepción así como su operatividad tenga la capacidad de autorregularse mediante mecanismos de adaptación para alcanzar el equilibrio térmico, es decir, que utilice el mínimo de energía para suministrar las condiciones de confort para el ser humano.

Una herramienta de diseño son los sistemas de climatización natural, es decir, conjuntos de componentes de un edificio que tienen como función principal mejorar su comportamiento climático, sin el uso de ninguna fuente de energía artificial para su funcionamiento (Serra Florensa & Coch Roura, 2001). Estos sistemas funcionan a través de la captación, inercia térmica, ventilación y protección solar. En esta investigación se profundiza en un solo dispositivo llamado Chimenea Solar, catalogado dentro de los sistemas de ventilación natural, asumiéndolo como un componente de aporte al fenómeno de la disipación de calor, renovaciones de aire y refrigeración natural.

El concepto de eficiencia energética puede definirse como el uso eficiente de la energía, es decir, optimizar los procesos productivos y el empleo de la energía utilizando lo mismo o menos para producir más bienes o servicios ("Eficiencia energética," n.d.). En este caso, la chimenea solar se propone como una aplicación tecnológica de bajo costo, que mediante su operación contribuya al fenómeno homeostático de la edificación al suministrar aire al interior de la habitación, produciendo un flujo de aire que incremente la sensación de confort para el usuario.

Justificación

El principal objetivo al proyectar un edificio, desde el punto de vista térmico, consiste en lograr un ambiente interior cuyas condiciones se encuentren muy próximas a las de confort; utilizando al máximo las posibilidades naturales sin recurrir a sistemas mecánicos (Olgay, 1963). Las herramientas que tenemos para diseñar un edificio existen en proporción a la información que poseamos, de tal manera que nuestro mayor recurso es precisamente: la información.

El 90% del costo del consumo de un edificio se define en las fases de diseño: ideas preliminares, diseño básico y diseño ejecutivo (Yarke, 2005). Es decir, los conceptos de construcción y mantenimiento del edificio tienen una incidencia muy baja en los gastos operativos del edificio durante el período de vida útil. Por lo que el suministro de información sustantiva que nutra el proceso de diseño es fundamental.

La chimenea solar ha sido estudiada y analizada por diversos investigadores, desde varios puntos de vista: cálculo energético, modelo informático y modelos experimentales; revisando su comportamiento y documentando el fenómeno físico. Ahora bien; por una parte, estos estudios se concentran en el desempeño de este dispositivo de una forma aislada, no en función de un espacio habitable; y por otra parte, los resultados y conclusiones se manifiestan desde y para un ámbito científico, que resulta de difícil acceso al diseñador ajeno a esta comunidad.

Por lo que uno de los temas fundamentales que justifican este trabajo es la difusión de información tangible y objetiva que permita al diseñador incluir el dispositivo "chimenea solar" en el proceso de diseño. Para tal efecto se realizará una revisión de los componentes principales que definen su comportamiento, partiendo precisamente de la información recopilada de investigaciones previas, ensamblando un modelo de estudio y

haciendo una síntesis de datos paramétricos que puedan ser replicables por el diseñador.

Objetivos

Objetivo General

Identificar los parámetros de diseño que inciden en el desempeño de la chimenea solar, mediante el estudio de la morfología del dispositivo y la posición de las aberturas que intervienen en la trayectoria del flujo de aire.

Objetivos Específicos

1. Analizar el comportamiento del flujo de aire al modificar la superficie y posición de las aberturas de la chimenea solar y la habitación.
2. Evaluar el comportamiento de la chimenea solar durante un ciclo anual completo, estando sometida a las variaciones estacionales y las condiciones climatológicas particulares del sitio.
3. Validar los datos calculados en la simulación energética al evaluar sus índices de correlación respecto a los datos obtenidos por medio de las mediciones.

Capítulo 1

1. Antecedentes

Según el ábaco psicométrico de Baruch Givoni, las condiciones climáticas donde la única posible estrategia de corrección sería la ventilación se encuentran en la zona de temperaturas altas en combinación con humedad relativa alta, y estas condiciones pertenecen al clima tropical húmedo, por lo que a continuación se describen sus características principales, y las del sitio seleccionado para el estudio: Villahermosa, Tabasco, México.

1.1 Clima tropical húmedo

Características Generales

El clima tropical húmedo es el clima habitual de los trópicos, en una banda que rodea al ecuador desde la 23° latitud norte del Trópico de Cáncer hasta la 23° latitud sur del Trópico de Capricornio; de acuerdo a la clasificación de climas de Peter Koppen (Mcknight & Hess, 1993). En estas regiones el ángulo de incidencia de la radiación solar es casi perpendicular a lo largo de todo el año, por lo que las temperaturas suelen ser altas y con alta variabilidad en el período diurno, por consiguiente el flujo de evaporación del suelo también es alto derivando en una alta humedad constante; por otra parte es una zona de convergencia de vientos de diferente presión por presentar vientos fríos en una zona del ecuador y cálidos en su opuesto, consecuencia de los períodos estacionales contrapuestos en los hemisferios, generando precipitaciones constantes e intensas durante gran parte del año.

Temperatura

La temperatura del aire, alcanza a la sombra una máxima media durante el día de 27° a 32°C, y en algunas regiones superan estos valores. La temperatura media mínima se localiza entre los 21° y 27°C. Los intervalos de variación de temperatura diaria y anual son muy estrechos.

Humedad

La humedad, es decir la Humedad Relativa (HR), se mantiene alta la mayor parte del tiempo es del 75%, con variaciones desde el 55% hasta casi el 100%. La presión de vapor es muy alta con valores desde los 25 mm Hg (3,300 Pa) hasta los 30 mm Hg (4,000 Pa).

Precipitación Pluvial

Las precipitaciones son elevadas y constantes durante todo el año, con períodos más intensos durante algunos meses consecutivos; presentando un período muy corto de ausencia de lluvias. La lluvia anual puede variar entre 1500 a 5000 mm, con registros de más de 500 mm en el mes con más humedad.

Radiación Solar

La radiación solar es reflejada y dispersada por el alto contenido de vapor en la atmósfera, por lo que la radiación se considera difusa, sin embargo la intensidad es alta. El contenido de vapor y nubosidad evita la reemisión de radiación de la tierra hacia cielo abierto en períodos nocturnos, por lo que la disipación de calor es baja.

Viento

La velocidad del viento es relativamente baja, los períodos de calma son frecuentes, presentándose vientos fuertes cuando existe la aparición de chubascos, y con aparición de ráfagas superiores a los 30 m/s.

1.2 Datos Climatológicos Villahermosa, Tabasco, México.

Tabasco es un estado situado en la región sureste de México; este estudio se sitúa en su capital Villahermosa, situada en 18° latitud norte y 92° longitud oeste, con una altitud de 9 msnm. Presenta un típico clima tropical húmedo con influencia marítima del Golfo de México.



Ilustración 1 Localización de Villahermosa, Tabasco, México. Fuente: Google INEGI. 2012

Temperatura

La temperatura media anual es de 27°C, con una máxima media de 32°C y una mínima media de 22°C. Destacando que el mes con temperaturas máximas promedio más altas es Mayo con 35°C.

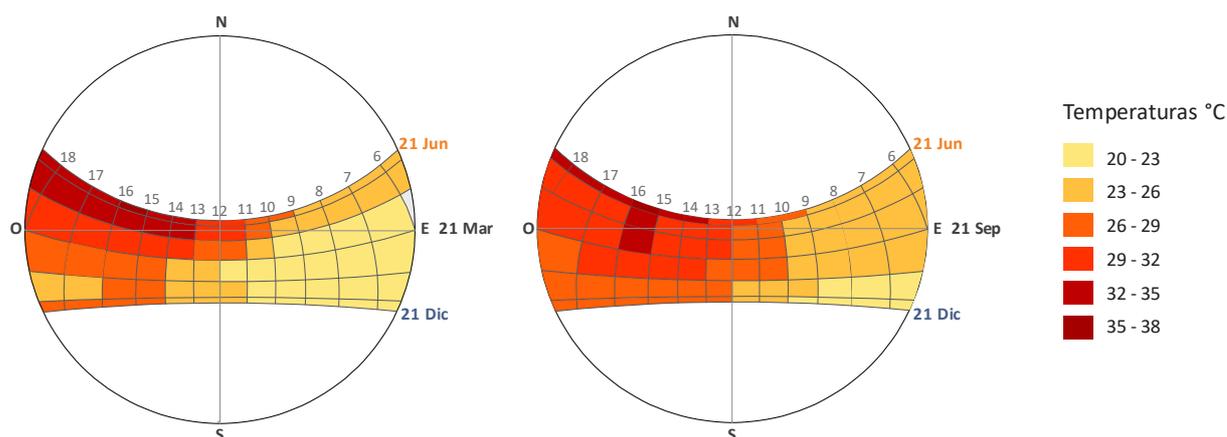


Ilustración 2 Diagrama estereográfico para Villahermosa, Tabasco, México incluyendo las temperaturas medias durante el recorrido solar. Fuente: Weatherbase (2007).

En las gráficas anteriores se observa que las temperaturas medias son altas para casi todo el ciclo anual, donde los registros más altos ocurren en los meses de abril, mayo y parte de junio, destacando que es precisamente en este período donde el recorrido solar ocurre por el lado norte, por ejemplo en el mes de junio la fachada sur no recibe radiación solar directa.

Humedad

La humedad relativa promedio tiene muy poca variación a lo largo del año, presentándose un rango del 82% en Abril y Mayo hasta un 90% en los meses de Diciembre y Enero.

Precipitación Pluvial

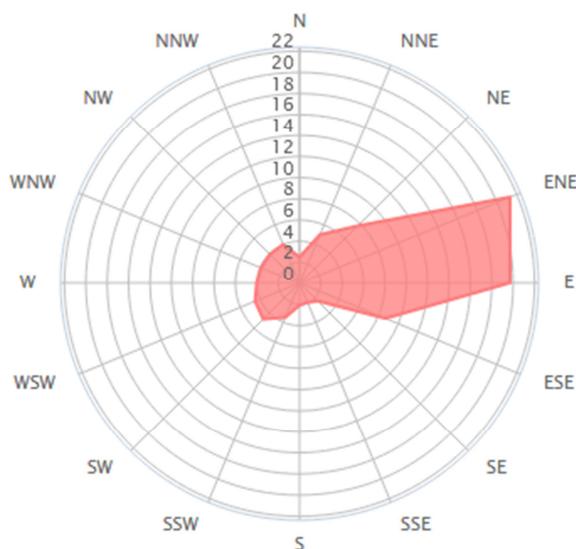
La media de precipitaciones anuales se sitúa sobre los 1900 mm. El período con mayores precipitaciones es Septiembre y Octubre registrándose valores superiores a los 300 mm mensuales y lo más bajos en Marzo y Abril con valores inferiores a los 50 mm mensuales.

Radiación Solar

La radiación solar media registra su cota más alta en el mes de Abril con una media de 5,20 kWh/m², y las condiciones más bajas de radiación se observan en Diciembre con un valor medio de 2,66 kWh/m². Estos valores son promedios diarios de potencia recibida en plano horizontal.

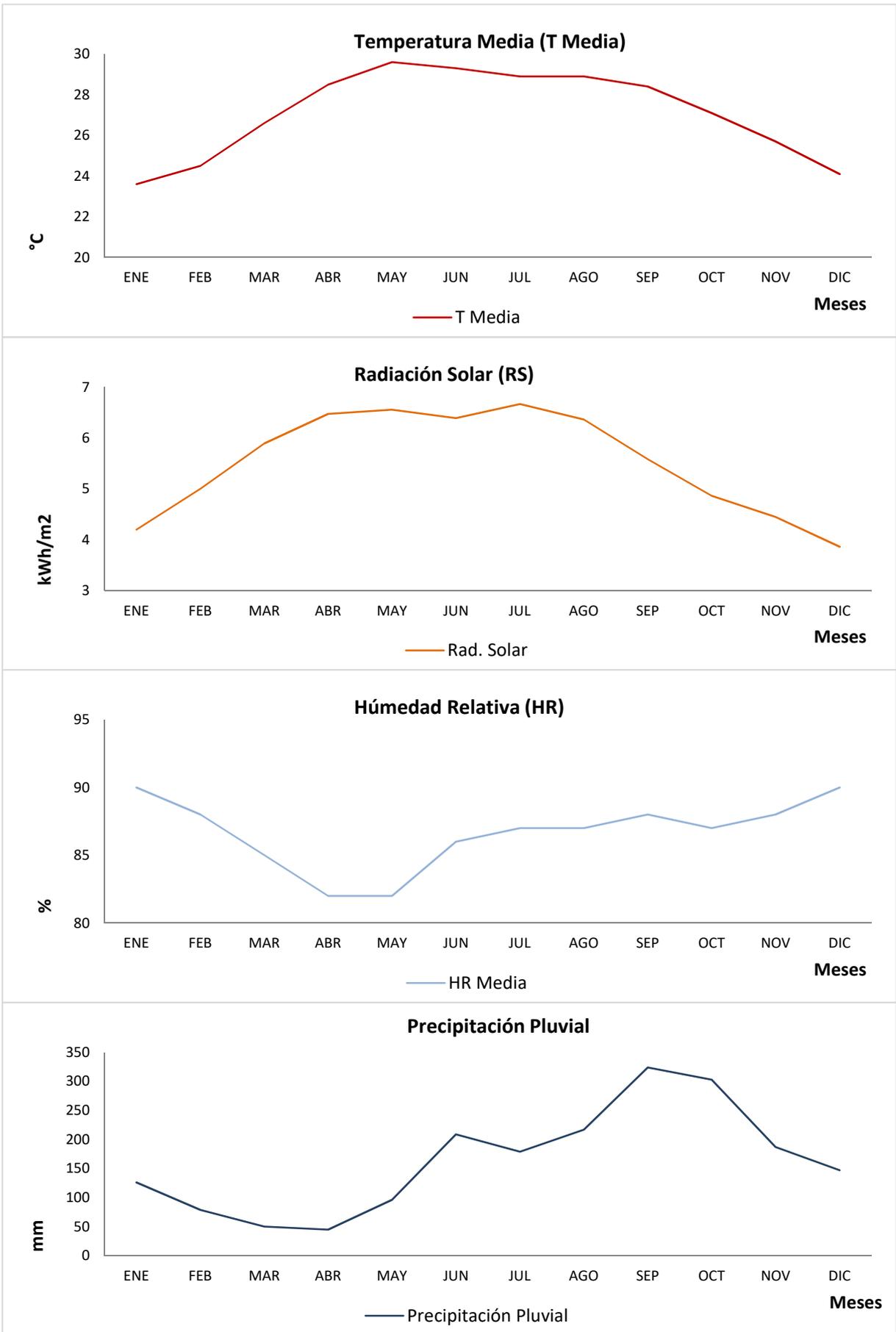
Viento

Los vientos dominantes provienen del Este, con velocidades promedio de 5 a 8 km/h, que significaría un nivel 2 (Brisa muy débil) en la escala de Beaufort, ahora bien, la mayor frecuencia de estos vientos dominantes se presentan en el mes de Noviembre con un 42% y la menor frecuencia en el mes de Febrero con un 17%; y con períodos de calma con una frecuencia del 30% en el período completo de un año.



Gráfica 1 Rosa de los vientos con información del aeropuerto Carlos Rovirosa (Villahermosa, México). Fuente: Windfinder.

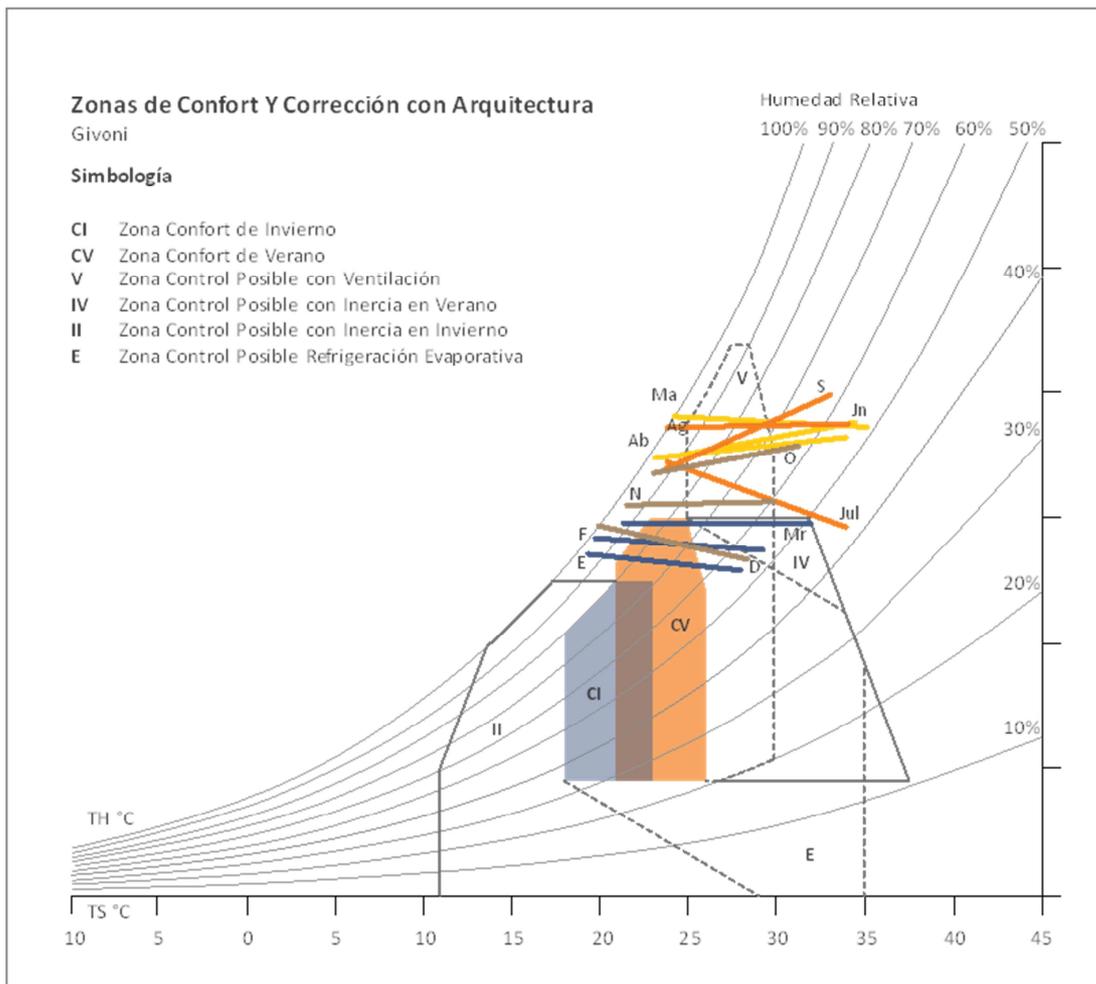
En las gráficas siguientes podemos observar el comportamiento anual promedio:



Gráfica 2 Datos climáticos para Villahermosa, Tabasco, México. Fuente: temperatura, humedad relativa y precipitación pluvial (Weatherbase), uente: radiación solar (UJAT).

El fenómeno climático está intrínsecamente relacionado, de tal manera que observamos los períodos de temperaturas más altas coincidiendo con los períodos de máxima radiación solar, así como se registran los valores más bajos de precipitación, humedad relativa y vientos predominantes; siendo este período los meses de Abril y Mayo.

En el siguiente gráfico se implantan los valores medios de temperatura y humedad relativa en el ábaco psicométrico de Baruch Givoni, para determinar las posibles estrategias de corrección en función de la zona de confort.



Gráfica 3: Datos climáticos de Villahermosa, Tabasco implantados en el Ábaco Psicométrico de Baruch Givoni

El análisis del ábaco psicométrico demuestra que los períodos anuales en que el clima tropical húmedo de Villahermosa se encuentra en la zona de confort son muy breves; y que la mayor parte del año la estrategia a utilizar es la ventilación. *Ver Gráfica 3*

Considerando que los períodos de mayor temperatura presentan una baja frecuencia de vientos predominantes, con períodos de calma del orden de un 30%, es razón para investigar posibilidades de sistemas pasivos generadores de movimiento de aire, siendo uno de ellos la chimenea solar.

Las estrategias de corrección se establecen en función de una zona de confort, para asimilar este concepto a continuación se expone una síntesis de sus principios generales:

1.3 Confort Ambiental

El medio ambiente físico está formado por numerosos elementos relacionados, luz, sonido, clima, espacio; todos ellos inciden directamente en el cuerpo humano, el cual puede absorberlos o intentar contrarrestar sus efectos. En la dinámica por conseguir el equilibrio biológico se producen diversas reacciones físicas y psicológicas. El ser humano se esfuerza por llegar al punto en el que adaptarse a su entorno requiera un mínimo de energía. Las condiciones bajo las cuales consigue este objetivo se definen como zona de confort, donde la mayor parte de la energía humana se libera para dedicarse a la productividad (Olgay, 1963). Partiendo de esta idea podemos conceptualizar el confort ambiental en términos generales como el punto de equilibrio entre el ser humano y su entorno, de tal manera que sus condiciones de operación provean la máxima eficiencia.

Ahora bien, para el análisis del confort existen dos tipos de agentes que intervienen en la ecuación completa: parámetros ambientales del confort y factores de confort del usuario.

Parámetros Ambientales de Confort

Los parámetros ambientales o de confort, son aquellas características objetivables de un espacio determinado, que pueden valorarse en términos energéticos y que resumen las acciones que, en dicho espacio reciben las personas que lo ocupan (Serra, 1999). Estos parámetros son medibles, de tal forma que se han instituido unidades físicas como herramientas para poder determinar las condiciones energéticas de un espacio determinado y de esta forma traducirlas en una respuesta arquitectónica.

Factores de Confort del Usuario

Los factores de confort son aquellas características que corresponden a los usuarios del espacio. Son condiciones exteriores al ambiente, pero que influyen en la apreciación de dicho ambiente por parte del usuario (Serra, 1999).

Es posible hablar de un trinomio, el ambiente como envolvente, el usuario como receptor y el espacio habitable como el interlocutor de este diálogo; y es aquí donde va implícita la importancia del diseño arquitectónico como emulador de los fenómenos de doble flujo que se gestionan entre estas dos entidades.

Es posible desglosar tres grandes campos y tipos de confort:

- Confort Visual: Facilidad de nuestra visión de percibir aquello que nos interesa.
- Confort Acústico: Eliminación de todo sonido no deseado.
- Confort Climático: Temperatura y calidad del aire.

Y adicionalmente incluir otros tipos de confort como el Confort Olfativo y el Confort Psicológico.

Para efectos de esta investigación se profundiza en el campo del confort climático y específicamente en el área del confort térmico; ya que es ahí donde la chimenea solar puede aportar en el resultado final de la ecuación de balance térmico.

Confort Térmico

La zona de confort puede ser descrita como el punto en el cual el hombre puede adaptarse al ambiente con el gasto mínimo de energía (Olgay, 1963). Una síntesis de este fenómeno puede ser concebida como la sensación de bienestar con respecto a la temperatura, la cual depende de la relación constante que existe entre el calor producido

por el ser humano y las pérdidas de calor de las superficies envolventes. Para fluctuar entre las variables que intervienen el cuerpo humano utiliza un mecanismo de autorregulación llamado homeostasis.

Homeostasis

Palabra compuesta de origen griego: homo que significa similar y estasis que significa estabilidad; es la característica de un organismo vivo, por la cual mediante la absorción de alimentos y el proceso metabólico puede regular las funciones que existen dentro de él, para mantener una condición estable y constante (Cannon & Bernard, 1932).

Pérdidas de Calor del Ser Humano

En las actividades del ser humano un 20% se convierte en trabajo mecánico y el resto se transforma en calor, esta producción de calor es la que compensa las pérdidas que generamos hacia el exterior, cuando el balance térmico se encuentra en equilibrio con el ambiente se produce la sensación de confort.

Existen dos formas de disipación de calor: por una parte la que se produce por la piel por fenómenos de conducción, convección y radiación (calor sensible); y por otra parte el calor que se elimina por evaporación mediante la transpiración y la respiración (calor latente) (Serra Florensa & Coch Roura, 2001). Por medio de la homeostasis estos controles de operación del ser humano se incrementan o disminuyen dependiendo de los parámetros térmicos del ambiente:

Los parámetros térmicos del ambiente son los elementos principales que afectan el confort humano son: temperatura del aire, radiación solar, movimiento del aire y humedad (Olgay, 1963). La combinación de todos estos factores podemos ponderarlos en una ecuación que su resultado se conoce como temperatura operativa.

La temperatura del aire influye en la sensación de calor del cuerpo a través de la piel y del aire que respiramos (Serra, 1999). Afecta directamente las pérdidas de calor del cuerpo humano mediante los fenómenos de convección y evaporación.

La humedad relativa es la relación de humedad en el aire expresada como un porcentaje de la máxima humedad que puede contener a determinada temperatura y presión. Por decirlo de alguna manera, la saturación de humedad en el aire, que afecta la pérdida de calor por evaporación, al reducirla o aumentarla.

La temperatura de radiación es la temperatura media superficial de los elementos envolventes en un espacio. Influye directamente en las pérdidas y dirección del flujo de calor del ser humano y de su entorno.

La velocidad del aire no incide directamente en la temperatura del aire, sino en la sensación de confort del ser humano, al incrementar las pérdidas de calor por convección y el aumento de la velocidad de evaporación en el proceso de transpiración.

Los efectos del movimiento del aire en la sensación de confort del ser humano al acelerar los procesos naturales de disipación de calor es la vertiente que seguiremos analizando para converger en el tema central de esta investigación.

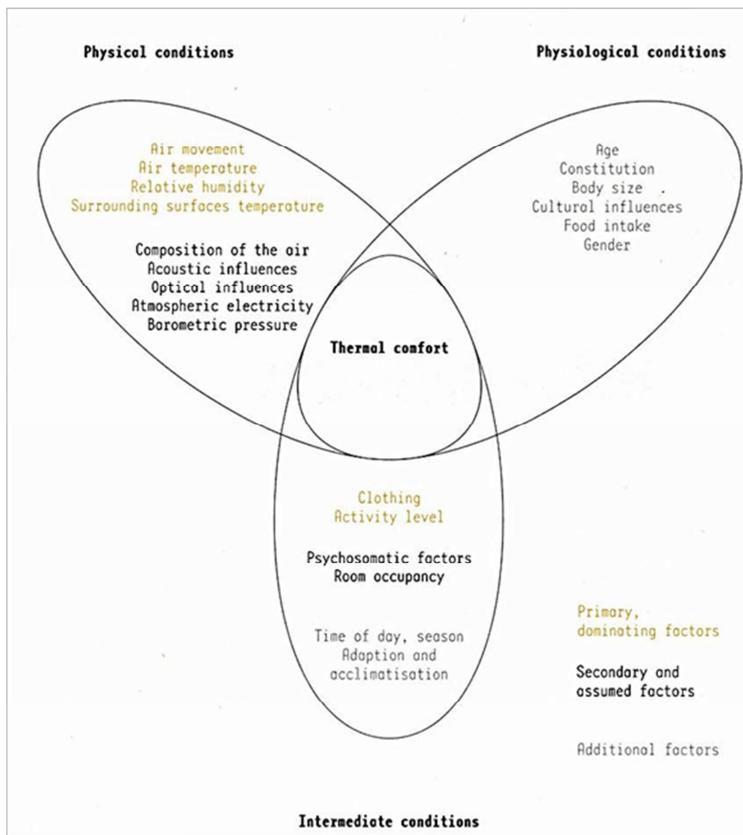


Ilustración 3: Parámetros de confort y factores del usuario. Fuente: Room Conditioning. Klein, Oliver

1.3.1 Estrategias para el confort en el clima cálido húmedo

La temperatura del aire en el clima cálido húmedo habitado es en general cercana a la temperatura superficial de la piel, por lo que se reduce sustancialmente la disipación térmica del cuerpo humano por convección; por otra parte los altos niveles de humedad en el ambiente inhiben la posible evaporación por transpiración del cuerpo humano, anulando los recursos naturales del cuerpo para disipar calor. En estos climas, la temperatura del aire no desciende sustancialmente durante el período nocturno, por lo que los cerramientos estabilizarán su temperatura en valores similares a los del aire, por lo que la disipación de calor del ser humano por radiación también se atenúa, y el flujo de calor puede ser inverso si hay demasiada exposición a la radiación solar y los cerramientos incrementan su temperatura, haciendo aún más desfavorables las condiciones para alcanzar el confort.

La atmósfera de aire saturado puede removerse por aireación, el acercamiento al confort se consigue haciendo que las brisas exteriores atraviesen no solamente el edificio, sino también las superficies corporales de los ocupantes, siendo este el único medio de mejorar las condiciones térmicas (Koenigsberger, Ingersoll, Mayhew, & Szokolay, 1977).

Forma

La geometría con mejor funcionamiento para el clima cálido húmedo es de forma alargada, favoreciendo la captación de vientos por sus superficies más grandes y evitando la captación de radiación solar en las superficies más cortas.

Protección Solar

La Radiación Solar es el principal factor del incremento de las temperaturas superficiales del edificio y de la temperatura interior por captación directa o conducción

de los cerramientos. Siendo de esta manera una prioridad la protección solar y sombras en todas las superficies y aberturas del edificio.

Espacios Exteriores

Las dos condiciones básicas son sombra y paso libre del movimiento de aire, principios aplicados de igual forma en las edificaciones. Estas condiciones podemos obtenerlas por medio de la vegetación y celosías exteriores (Koenigsberger et al., 1977).

Cubiertas y Cerramientos

La temperatura del aire presenta un rango de variabilidad estrecho durante el período diurno y nocturno, manteniéndose en temperaturas elevadas durante todo el día, y el efecto de enfriamiento nocturno es bajo, reduciendo la capacidad de los cerramientos de disipar calor, por lo que la materialidad de estos tendería a ser de baja capacidad térmica. La cubierta puede funcionar como protección solar a los cerramientos verticales y esta a su vez posee propiedades reflectoras superficiales, o una sobrecubierta para evitar la captación solar directa y de esta manera reducir las ganancias térmicas de la envolvente.

Movimiento del Aire y Aberturas

Las aberturas deberán orientarse de acuerdo a la dirección de los vientos predominantes, permitiendo el flujo natural del aire a través del edificio y de sus ocupantes; induciendo así la disipación de calor por convección. La altura y posición de las aberturas incidirán en el comportamiento del flujo de aire y sus aportes energéticos: ventilación cruzada para incrementar flujo y velocidad interior, y aberturas superiores para liberar el aire más caliente acumulado por estratificación.

Ventilación

La renovación de aire es indispensable, ya que de no existir, la temperatura y humedad se elevarían a niveles mayores que los exteriores, producto de las aportaciones internas de calor y humedad del factor usuario; incrementando sustancialmente la sensación de discomfort: Por lo que la ventilación es prioridad del diseño del espacio para generar estas renovaciones y movimiento sensible de aire a través de los usuarios.

Superficies Selectivas Frías

Estas superficies tienen diferentes coeficientes de absorción según la longitud de onda a las que estén expuestas; tienen una alta reflectividad a la luz visible y el infrarrojo cercano; y absorben, y por lo tanto emiten mucho las longitudes de onda del infrarrojo lejano (Serra Florensa & Coch Roura, 2001). La pintura de color blanco aplicada a una determinada superficie puede cumplir esta función; reflejando la luz visible y la radiación solar de onda corta y a su vez emitiendo de manera eficiente la radiación solar de onda larga. Evitando la acumulación de energía térmica.

Conclusión de Estrategias en Clima Cálido Húmedo

De esta manera se concluye que una de las principales estrategias para alcanzar el nivel de confort o reducir el discomfort en el clima cálido húmedo es la **ventilación**, permitiendo un mejor desempeño de los mecanismos de termorregulación naturales del cuerpo humano.

1.3.2 Ventilación natural

Principios generales del Viento

Las características del movimiento de la tierra, así como la discontinuidad de su superficie, hacen que las diversas zonas expuestas a la radiación solar sean calentadas

en forma diferente y este desequilibrio de energía calórica genera un movimiento de aire sobre la superficie de la tierra, fenómeno que denominamos viento (Gonzalo, 1998).

La dirección e intensidad del flujo de aire está afectada por diversos factores, morfologías y condiciones, aunque existen tres parámetros fundamentales para su generación:

- a. Gradiente de presión
- b. Fuerza de Coriolis
- c. Fricción superficial

a. Gradiente de presión

El calentamiento desigual de la superficie terrestre origina una diferencia de presión atmosférica entre dos zonas, y esto introduce un vector de movimiento en las masas de aire que tienden a dirigirse de una zona de alta presión a otra de baja presión para anular las diferencias. Cuanto mayor sea este gradiente de presión, mayores serán las fuerzas de impulso y por lo tanto más fuerte el viento (Gonzalo, 1998).

b. Efecto de Coriolis

El efecto de Coriolis es una fuerza ficticia o inercial que aparece cuando se describe el movimiento de un cuerpo desde un sistema en rotación (Coriolis & Coriolis, 1836). La relación de velocidad de las masas de aire varían de manera proporcional a su posición con respecto al eje de rotación, incrementándose a medida que se acercan a los polos por su proximidad al eje de rotación y desacelerando en el ecuador por su lejanía al eje de rotación; por consecuencia de esta misma rotación el viento acumula una fuerza inercial hacia la derecha en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Hemisferio Sur afectando la dirección de los vientos.

c. Fricción superficial

La fricción superficial debido a la rugosidad del suelo actúa directamente sobre las masas de aire, dicha fricción causa dos efectos en el viento: reduce su magnitud y desvía su dirección original; creando una divergencia hacia las altas presiones y una convergencia hacia las regiones de baja presión.

Acción del viento sobre edificios

Presión Positiva y Negativa

Cuando el viento incide directamente sobre un edificio, el movimiento de aire es perturbado y desviado por encima y alrededor del edificio. La presión del aire en la fachada que da al viento, es mayor que la presión atmosférica (zona de presión positiva) y en la fachada opuesta la presión es negativa (zona de succión) (Yarke, 2005). De esta manera existen dos zonas de presión diferente, por medio de la cual se puede gestionar la circulación del flujo de aire a través del edificio.

Flujo de Aire

La diferencia de presión sobre la envolvente del edificio determinará las posibles fuerzas impulsoras de la ventilación natural a través del edificio. Esto es, la colocación de aberturas en zonas de presiones opuestas producirá un flujo de aire interior de las zonas de alta presión a las zonas de succión. Concluyendo en un fenómeno de ventilación interior.

Funciones de la Ventilación

La ventilación natural y movimiento de aire es considerada un sistema pasivo de acondicionamiento climático, con repercusiones directas en el confort del ser humano en función de tres aspectos fundamentales:

- a.** suministro de aire puro
- b.** enfriamiento por convección
- c.** enfriamiento fisiológico

a. Suministro de aire puro

La ventilación natural como estrategia para alcanzar niveles óptimos de calidad de aire interior está fundamentada en la cantidad de aire fresco suministrado al espacio interior y la dilución de la concentración de contaminantes. La calidad de aire óptima puede ser definida como el aire libre de contaminantes que causen irritación, disconfort o enfermedades al usuario (Yarke, 2005).

Enfriamiento por Convección

La ventilación puede causar un efecto refrigerante sustituyendo el aire interior caliente por aire exterior más frío; por efectos convectivos utilizando el flujo de aire en movimiento como sistema de transporte de calor, absorbiéndolo de las superficies interiores.

Enfriamiento Fisiológico

El aire en movimiento, al pasar por la superficie de la piel, acelera la disipación de calor de dos maneras: aumentando la pérdida de calor por convección y acelerando la evaporación (Koenigsberger et al., 1977). La transferencia de calor por convección se realiza directamente desde la persona al flujo de aire en movimiento que la envuelve, mayores velocidades de del aire aumentan la tasa de transpiración de la piel, minimizando el disconfort al permitir una evaporación más eficiente.

Velocidad de Viento y Sensación Térmica

Existen diferentes parámetros de estudio del fenómeno de disipación de calor y aumento de tasa de transferencia de evaporación humana, que en conjunto son las causas de la ampliación de la zona de confort; relacionado directamente con la velocidad del aire en contacto con el ser humano.

El movimiento de aire afecta nuestro cuerpo. No disminuye la temperatura pero provoca una sensación de frescor debida a la pérdida de calor por convección y al aumento de la evaporación del cuerpo (Olgay, 1963). A medida que el movimiento del aire aumenta, el límite superior de la zona de confort se eleva.

La presión de vapor se mide por la cantidad de agua que está contenida en la atmósfera; si la presión supera los 15 mm Hg (2,000 Pa) el ser humano experimenta una sensación de opresión. Este fenómeno se contrarresta aplicando una velocidad de aire de 1 km/h por cada milímetro adicional (Olgay, 1963).

La *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE) establece en sus estándares condiciones de confort entre los 4 y 12 g/kg de contenido de vapor en el aire, con velocidades de vientos semi-estáticas de 0.25 m/s y temperaturas máximas de 26.5 °C; definiendo el efecto de la velocidad del viento en la sensación térmica como la elevación de esta zona de confort en 1°C por cada 0,275 m/s de incremento de velocidad de aire, limitándolo hasta una velocidad de aire de 0,80 m/s

debido al efecto incómodo de altas velocidades de viento en espacios cerrados (Givoni, 1994).

Efecto de Descenso de Temperatura

El fenómeno de la velocidad del aire sobre la temperatura de sensación se documenta como la ampliación de la zona de confort o tolerancia a altas temperaturas; aunque puede valorarse en un sistema inverso, cada 0,3 m/s de velocidad de aire equivalen el descenso de 1°C en la sensación térmica de la persona que está inmersa en este flujo de aire (Serra, 1999).

Escala de Beaufort

Es un conjunto de valores cualitativos enumerados del 0 al 12 para determinar la intensidad del viento de acuerdo a sus efectos físicos en el entorno, inicialmente no consideraba la velocidad del viento. Los rangos que podrían considerarse adecuados para la ventilación natural, si tomamos en cuenta la gráfica de Víctor Olgay serían los siguientes:

- 0 Calma 0,5 m/s Humo asciende verticalmente
- 1 Aire ligero 1,5 m/s Humo indica dirección viento
- 2 Brisa ligera 3,0 m/s Caen hojas de árboles
- 3 Brisa suave 6,0 m/s Ondulan las banderas

Efecto del Aire sobre el Cuerpo

De acuerdo a los fenómenos revisados previamente asumimos el cambio en la sensación térmica del ser humano en relación directa con la velocidad del viento que lo envuelve. Es necesario tomar las siguientes consideraciones: para personas con baja actividad en espacios interiores con velocidades de aire entre 0,5 a 1,0 m/s percibirán una sensación de frescor aumentando su sensación de confort; y para personas con actividad moderada es necesario incrementar la velocidad de 1,0 a 2,5 m/s, estableciendo esta última como un límite porque al sobrepasarla empieza a producir sensación de molestia por la misma velocidad del viento.

Efecto de la Velocidad del Aire

En un ámbito aún más particular existen parámetros de tolerabilidad a la velocidad del viento registradas en habitaciones interiores, de la cual se desprende los siguientes datos: velocidades inferiores a 0,08 m/s serán desfavorables por estancamiento del aire, velocidades de 0,12 a 0,25 m/s serán ideales para cualquier actividad, y de 0,40 m/s será la velocidad máxima para personas en reposo; velocidades mayores a 0,40 y hasta 2,5 m/s se asumen como de acondicionamiento en espacios interiores con actividad moderada.

Ventilación Mecánica

Por último, tenemos la ventilación mecánica, que se define como un sistema activo que pone el aire, o un gas en movimiento; transmitiendo energía para generar la presión necesaria para mantener un flujo continuo de aire. Utilizaremos los valores de un ventilador de techo para establecer rangos comparativos con la operación de la chimenea solar, su radio de operación podemos establecerlo en 1,5 m/s sobre su eje y decreciendo hasta valores de 0,25 m/s. Coincidiendo con los valores de velocidad de aire presentados anteriormente.

Modelos de Flujo de Aire: Relación de Aberturas

Las fuerzas que proporcionan la ventilación natural en los edificios se agrupan en dos categorías: movimientos del aire por diferencias de presión; e intercambio del aire por diferencia de temperatura (Olgyay, 1963).

Las aberturas en un espacio hipotético modificarán la dirección, flujo y velocidad del viento, de acuerdo a su posición, superficie y relación a otras aberturas.

Abertura Única

En este caso se produce muy poco movimiento de aire interior, ya que en algún punto la sobrepresión del viento exterior se equilibrará con la presión interior y al no existir diferencias se anula la circulación de aire. Esta configuración es la menos eficiente para la ventilación natural.

Aberturas Opuestas Similares

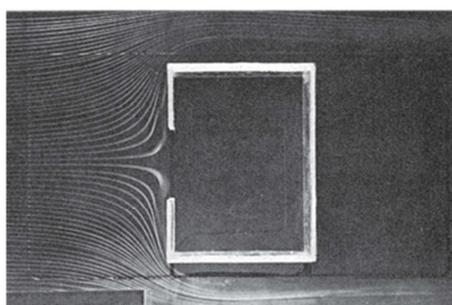
En esta configuración existe una sobrepresión en la superficie de entrada y una depresión en la superficie de salida, por lo cual se genera una circulación de aire interior, siendo en este caso la que produce un mayor flujo de aire, siendo recomendable para aumentar la tasa de renovaciones horarias de aire.

Aberturas Opuestas Relación 1:2

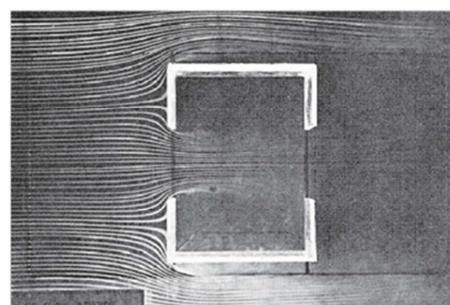
En esta configuración existen dos aberturas contrapuestas, siendo la de menor superficie la expuesta a la sobrepresión y la de mayor superficie en la zona de depresión; provocando una fuerza de succión relacionada al efecto Venturi; y de esta forma generar un fenómeno de aumento de velocidad en la abertura de entrada de aire. Por consiguiente esta configuración provee la mayor velocidad de aire interior.

Aberturas Opuestas Relación 2:1

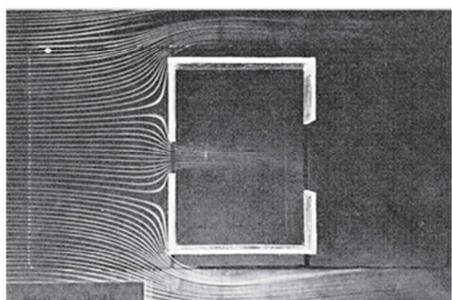
Este esquema es invertido al ascendente, ubicando la mayor superficie en la zona de sobrepresión y la de menor superficie en la depresión, en este caso los valores de presión se invierten, diluyendo el flujo de aire en el interior de la habitación, es decir se desaprovecha la presión negativa o de succión en la abertura de salida al reducir su superficie. Esta configuración no es recomendable para efectos de ventilación natural.



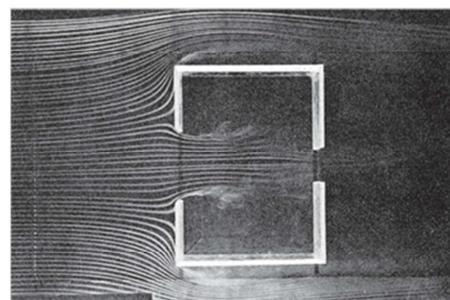
Abertura única



Aberturas opuestas



Aberturas 1 : 2



Aberturas 2 : 1

Modelos de Flujo de Aire: Posición de Aberturas

En relación con el modelo de flujo de penetración de aire, el emplazamiento de las salidas es irrelevante y la velocidad disminuirá solamente si los cambios de dirección originan un consumo de energía (Olgay, 1963). En estudios del comportamiento del viento realizados por Víctor Olgay encontramos conclusiones puntuales respecto a la posición de las aberturas de entrada y salida.

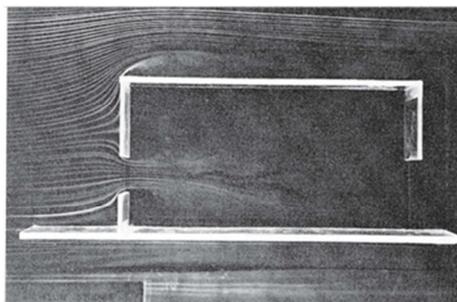
Entrada Fija y Salida Variable

Este análisis se configuró modificando la entrada de aire en una cota baja y variando la abertura de salida en tres posiciones: superior, media y baja. En los tres casos el modelo de flujo de aire interior fue muy similar, con una ligera tendencia hacia abajo sin influir la posición de la abertura de salida.

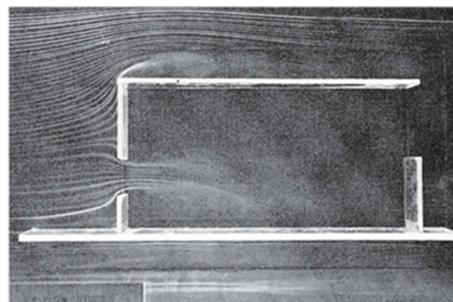
Entrada Variable y Salida Fija

En esta configuración se observó el comportamiento fijando la abertura de salida en una posición media y variando la ubicación de la abertura de entrada en tres posiciones: alta, media y baja. En la posición alta la tendencia del flujo de aire es hacia arriba, por la presión que ejercen las corrientes exteriores en ese sentido; en la posición media obtenemos un flujo intermedio con una ligera tendencia hacia abajo; y en la posición inferior el efecto es de un barrido laminar a la altura del suelo.

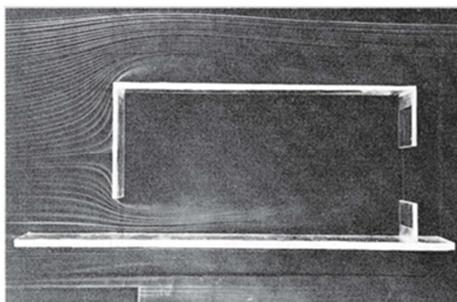
Resultado de estas observaciones se puede inferir que la posición de las aberturas de salida no influye en el comportamiento interior del flujo de aire, y existe una alta variabilidad del flujo de aire de acuerdo a la posición de la abertura de entrada. Para efecto de la Ventilación de Confort es prioritario generar este flujo en regiones que



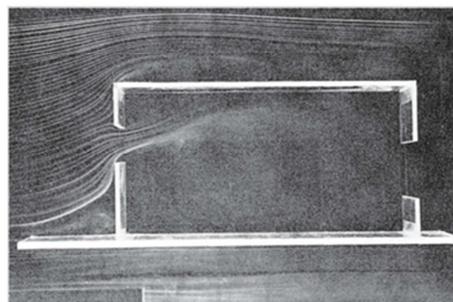
Entrada Media : Salida Baja



Entrada Media : Salida Alta



Entrada Baja : Salida Media



Entrada Alta : Salida Media

Ilustración 5 :Modelos de flujo de aire en túnel de viento. Análisis de posición de aberturas. Fuente: Arquitectura y Clima. Olgay, Víctor.

incidan directamente en los usuarios.

Influencia del Diseño de Aberturas en la Velocidad del Aire

Los principales factores que afectan la velocidad del aire interior son el tamaño de las aberturas de entrada y salida y la ubicación de las mismas con relación a los vientos dominantes (Gonzalo, 1998). En este apartado se analizan el porcentaje de velocidad interior respecto a la velocidad del viento exterior en función de la relación y posición de sus aberturas. Estudios realizados por Baruch Givoni en pruebas de laboratorio en túneles de viento. En este caso analizaremos dos clasificaciones:

- a. Situaciones de ventanas en un sólo cerramiento.
- b. Situaciones de ventanas en cerramientos opuestos.

a. Situaciones de ventanas en un solo cerramiento

Previamente se revisa el modelo de flujo de aire en una *abertura única* concluyendo que las presiones se equilibran y se genera muy poco movimiento de aire interior, ahora bien en este caso se analizan tres diferentes relaciones de abertura y tres diferentes incidencias de viento. En el caso de la relación de aberturas encontramos que no inciden en la velocidad interior, las diferencias de porcentaje son mínimas, manteniéndose en el rango del 13 al 15% en todos los casos; cuando la dirección del viento exterior varía en ángulo de incidencia apreciamos un incremento hasta de un 23%.

b. Situaciones de ventanas en cerramientos opuestos

En habitaciones donde existen dos ventanas opuestas se produce ventilación cruzada; una primera conclusión es que al aumentar la superficie de las ventanas se incrementa la velocidad del aire interior; posteriormente observamos que la configuración menos eficiente es la abertura de entrada más grande en relación a la salida con valores del 34%; la relación de superficies más eficiente es tener mayor superficie de salida respecto a la superficie de entrada presentando valores del 44%; y en el caso de ventanas de superficies similares los rangos de velocidad son intermedios.

Nota: los valores de velocidad corresponden al porcentaje registrado en el interior de la habitación respecto a la velocidad del viento exterior.

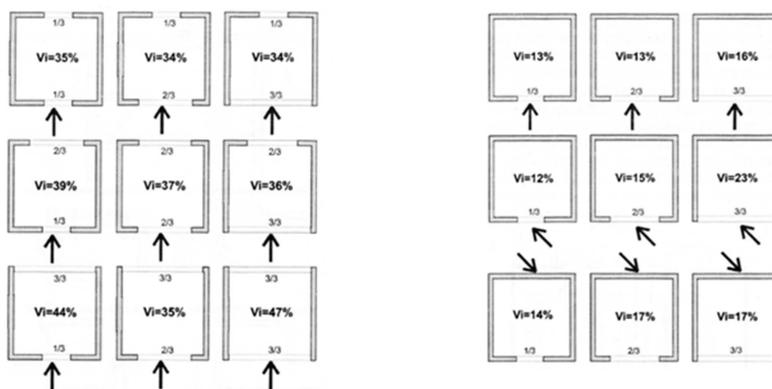


Ilustración 6: Esquemas de porcentaje de entrada de aire al interior dependiendo de aberturas y sus relaciones. Fuente: Arquitectura Bioclimática. Gonzalo, Guillermo

1.3.3 Ventilación de Confort

Este concepto forma parte de los sistemas pasivos de enfriamiento, los cuales no requieren aplicación externa de energía para su funcionamiento, salvo la que provee de manera natural las condiciones ambientales del entorno.

La estrategia más simple para mejorar las condiciones de confort cuando las temperaturas interiores de un espacio son altas es la ventilación de confort, incluso

cuando las temperaturas externas puedan ser más altas que las internas, esto en función del aumento de la tasa de evaporación del ser humano. Esta acción repercute directamente en la ampliación de la zona de confort, como establece Víctor Olgyay en su gráfica de confort higrotérmico; dónde en situaciones que presenten temperaturas elevadas con un alto porcentaje de humedad relativa, este límite se amplía con los efectos de la velocidad del viento.

Velocidad del Viento

La velocidad del viento incide directamente en la ampliación de la zona de confort del ser humano; datos referidos en la guía ASHRAE establecen un incremento en el límite superior de la zona de confort en 1°C por cada 0.275 m/s de aumento en la velocidad del aire, aunque limita su velocidad interior máxima a 0.80 m/s (Givoni, 1994). Lo anterior en condiciones cerradas de operación. Siendo que la ventilación cruzada registra velocidades de aire promedio de 1 a 2 m/s. Un abanico de techo suministra una

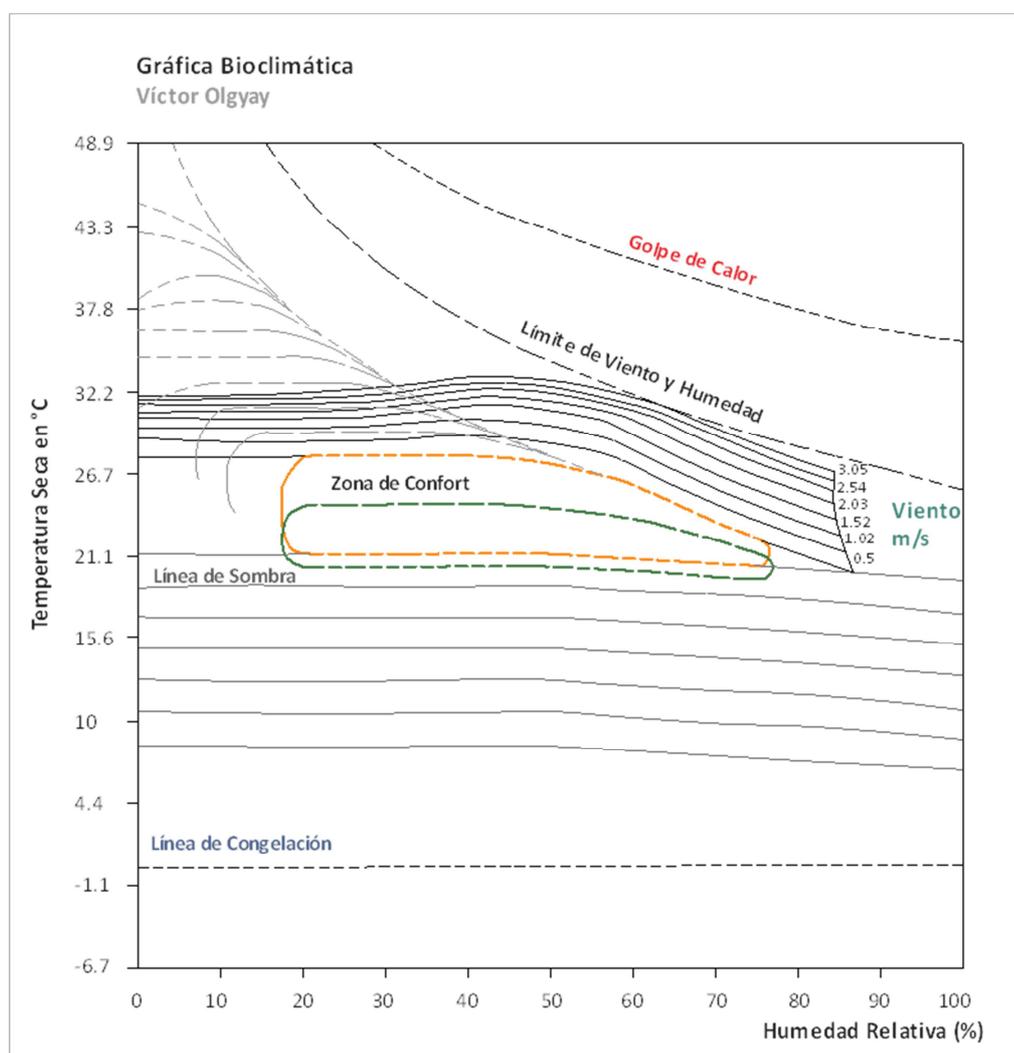


Ilustración 7: Gráfica bioclimática condensada por Víctor Olgyay

velocidad de aire sobre 1 m/s.

La gráfica anterior describe la zona de confort para verano e invierno, así como las estrategias para equilibrar los efectos del entorno. Puede observarse como las líneas que indican la velocidad de viento amplían la zona de confort de verano a medida que se incrementa su velocidad. Ver Ilustración 6.

1.3.4 La Chimenea Solar como estrategia de confort

La chimenea solar puede incrementar la ventilación durante los meses de verano bajo condiciones de calor extremo; y como soporte de otros sistemas pasivos como la ventilación cruzada (Santamouris, 2007). La velocidad del flujo de aire interior es la que nos ampliaría la zona de confort o la tolerabilidad a temperaturas elevadas, por consiguiente el objetivo de la chimenea no es sólo suministrar aire fresco sino incrementar la velocidad del flujo de aire interior utilizando la radiación.

La chimenea solar es un dispositivo que su objetivo principal es generar movimiento de aire y de esta manera ampliar los índices de la zona de confort en climas con temperaturas y humedad relativa elevadas. Presenta características que hacen viable su implantación:

- a. Heliomotricidad
- b. Operación Autónoma
- c. Operación de Soporte

a. Heliomotricidad

Por sus características de funcionamiento la chimenea solar incrementa su rendimiento aumentando la velocidad de aire interior a medida que se intensifica la radiación solar exterior; de tal manera que aportará mayores flujos de aire en situaciones de altas temperaturas exteriores donde las condiciones higrotérmicas se alejan de la zona de confort.

b. Operación autónoma

El dispositivo es autónomo, no dependiendo de otros factores más que los básicos para su propia operación, por lo que puede adaptarse a habitaciones que no tengan la posibilidad de integrar un sistema de ventilación cruzada por condiciones especiales de espacio o proyecto.

c. Operación de soporte

El dispositivo tiene la capacidad de integrarse como sistema alternativo o de soporte a gestores principales como la ventilación cruzada; en climas cálidos húmedos la frecuencia de vientos en calma puede rebasar el 35%, por lo que desciende la eficiencia de la ventilación cruzada y la chimenea solar podría solventar esas deficiencias al no

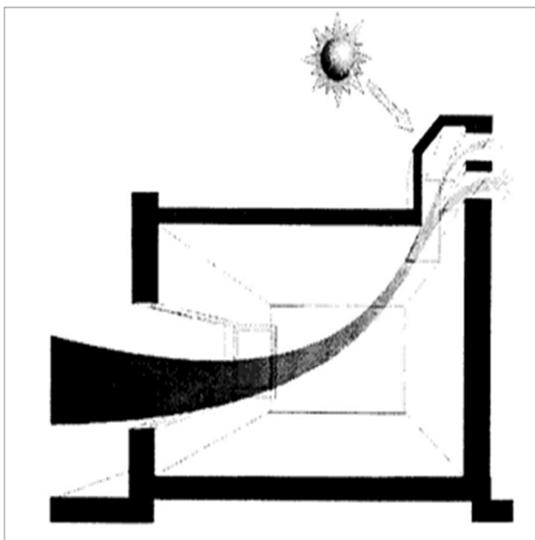


Ilustración 8: Esquema de ventilación a través de una habitación inducida por un tipo de chimenea solar.

depender de la frecuencia y velocidad de viento.

La información anterior documenta la importancia de la ventilación de confort para reducir la sensación de discomfort para el usuario, en este mismo sentido, se explica de qué manera la chimenea solar puede aportar soporte a esta función. A continuación se explican las características principales que intervienen en la operación y función del dispositivo.

1.4 La chimenea solar

Es un sistema pasivo generador de movimiento de aire, siendo su motor principal la radiación solar; fundamentalmente es una torre vertical hueca con una columna de aire fluyendo hacia el exterior por su extremo superior; al estar adosada a una habitación por medio de un hueco inferior el aire interior de la habitación reemplaza al de la chimenea generando este movimiento de aire; y de manera sucesiva por medio de un hueco en el extremo opuesto de la habitación el aire exterior penetra dentro de la habitación, generando un flujo de aire a través de estos volúmenes. Este sistema de ventilación se origina en el esquema de ventilación cruzada.

1.4.1 Principios Físicos

El flujo de aire a través de un edificio es inducido por los gradientes de presión a través del mismo. Estas diferencias de presión se producen mediante dos fuentes, la fuerza que ejerce el viento sobre el edificio conocida como fuerza de viento y los gradientes de temperatura entre el aire interior y el exterior, conocido como fuerza térmica (Givoni, 1969). En este caso de estudio aplica el concepto de fuerza térmica, que es el principio de funcionamiento en la chimenea solar. Cuando la temperatura interior y exterior es distinta se presenta una diferencia entre sus densidades y los gradientes de presión vertical varían de acuerdo a su situación interior o exterior.

En el caso de que en una habitación exista una sola abertura las presiones de aire se equilibran, por lo tanto no existe un flujo de aire hacia el interior a pesar de la diferencia de temperaturas. La presión del aire por encima y debajo de una sola abertura varía con la altura y esta variación es proporcional a la densidad del aire, tanto en interior como exterior. Por lo que existirá una sobrepresión en la zona superior a la abertura y una depresión por debajo de ella, con un incremento directamente proporcional a la altura, de tal manera que esta ventana se convierte en el *Nivel Neutral de Presión*, y como el mayor diferencial de presiones se registran en los extremos de este vector vertical no es posible el flujo de aire hacia el exterior porque la zona de mayor sobrepresión no presenta ninguna posible salida.

En el caso que existan dos aberturas, superior e inferior el Nivel Neutral de Presión se localizaría en el centro de la habitación en sentido vertical, por lo que los máximos diferenciales de presión se localizarían en los extremos, es decir, la sobrepresión superior provocaría la salida del aire caliente y la depresión inferior permitiría el acceso del aire más fresco gestionando de esta manera un flujo de aire vertical ascendente.

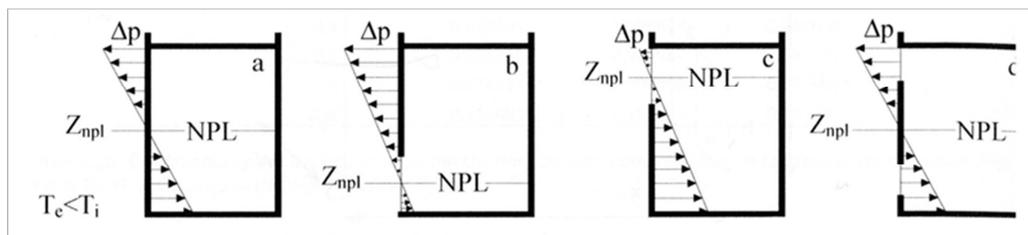


Ilustración 9: Esquemas de Neutral Pressure Level en diferentes configuraciones de aberturas en una habitación. Fuente: Ventilación natural de edificios. Yarke, Eduardo.

La principal función de las torres de ventilación es amplificar las fuerzas de impulsión naturales de viento y extender la profundidad del espacio donde operan los sistemas de ventilación cruzada (Santamouris, 2007). Los límites de la ventilación cruzada los define la geometría del propio espacio donde proveen el abastecimientos de aire, al

implementar una torre multiplicamos la distancia de operación por medio de la columna de aire que nos permite la morfología del dispositivo.

Estas torres de ventilación producen en su interior un fenómeno llamado **efecto chimenea**, el cual ocurre cuando las diferencias de temperatura causan diferencias de densidad en el aire y provocan diferencias de presión entre el interior y el exterior (Yarke, 2005). Al modificar su densidad el aire más caliente tiende a elevarse y el más frío a reemplazar el vacío provocado por este desplazamiento.

La estratificación térmica parte del principio del cambio de densidad del aire, normalmente generada por dos causas principales: las diferencias de los gradientes de presión y temperatura en un espacio determinado, provocando el movimiento interno de las masas de aire, por lo que se origina un flujo en sentido vertical, el cual se verá incrementado si se suman los dos fenómenos (Mitjá, 1991). Esta es la razón por la cual dentro de un espacio cerrado el aire caliente se posiciona en la parte superior al presentar una menor densidad y el aire más fresco se estaciona en las partes inferiores al presentar mayor densidad, resultado del fenómeno gravitacional.

Desde otra perspectiva, el sentido de la chimenea es liberar aire caliente desde el interior, a esto se le denomina **chimenea termal**, como principio utilizan las fuerzas de flotabilidad térmica generadas por las diferencias de temperatura y densidad en un espacio en función de impulsar una circulación vertical de aire a través de su envolvente. Las diferencias de temperatura son causadas por las ganancias térmicas generadas por diversos factores: ocupación, radiación y conducción. El propósito de las chimeneas termales es remover el aire caliente viciado del interior de los edificios (Santamouris, 2007). En este caso la chimenea termal es un repositorio de aire caliente, que de forma natural se ubica en las zonas superiores de los edificios, permitiendo así la extracción de aire caliente por medio de sus aberturas, para completar el ciclo es necesario el ingreso de aire fresco por algunas aberturas inferiores.

1.4.2 Descripción de la Chimenea Solar

La chimenea solar amplifica el diferencial de temperatura, densidad y presión, permitiendo que el flujo y la velocidad de la columna de aire se incrementen proporcionalmente a los gradientes, dependiendo de la geometría del sistema.

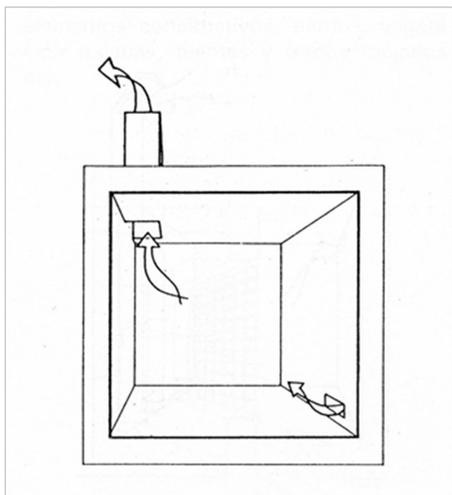


Ilustración 11: Efecto Chimenea. Fuente: Clima, Lugar y Arquitectura. Serra, Rafael.

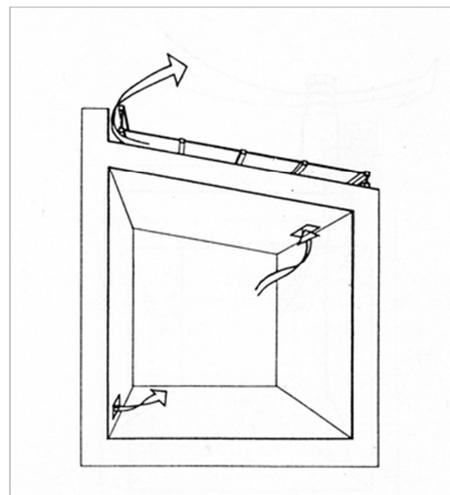


Ilustración 11: Efecto de cámara solar Fuente: Clima, Lugar y Arquitectura. Serra, Rafael.

Para incrementar la temperatura del aire al interior de la chimenea se aplica el fenómeno del efecto invernadero, captar la máxima radiación solar posible a través de un acristalamiento en función de absorber esta energía en una superficie absorbente y posteriormente transformarla en calor, este calor será transmitido al aire interior por efectos convectivos, al aumentar gradualmente su temperatura en el recorrido del tiro de la chimenea irá disminuyendo su densidad y progresivamente aumentando su desplazamiento a capas superiores. El siguiente factor que afecta el flujo de aire es la distancia entre la abertura de salida superior y la de entrada inferior, a mayor distancia de su Nivel Neutral de Presión los gradientes de temperatura y presión serán mayores provocando caudales de salida y entrada más altos.

Componentes Básicos

El dispositivo chimenea solar geométricamente es un cuerpo de sección rectangular con un coeficiente de esbeltez alto, este dispositivo está configurado por varios componentes que inciden en su desempeño, enunciándolos por sus características físicas se dividen en elementos de transmisión, captación, conducción y aislamiento, más los controles de entrada y salida.

Acristalamiento

El primer componente es el acristalamiento, superficie de vidrio con un coeficiente de transmisión de 0,7 aproximadamente, permitiendo el ingreso de la radiación solar al interior de la cámara de la chimenea; por sus características de transmisión selectiva este cerramiento es transparente a la radiación visible y el infrarrojo próximo pero es opaco a la radiación electromagnética de onda larga por lo que el calor reemitido por las superficies interiores permanecerá en el interior de la chimenea.

Receptor

El siguiente componente es la superficie interna de la chimenea, que funciona como un receptor de la radiación solar, su función es absorber la mayor cantidad de radiación por lo que su característica principal es el color oscuro negro mate, con un coeficiente de absorción de 0,9, es decir absorbe el 90% de la radiación solar transformándola en calor, y por efectos de la dirección del flujo de calor, de más caliente a más frío, se transmitirá hacia el interior del cerramiento por conducción. Por lo que este cerramiento se convertirá en un acumulador de energía térmica. La inercia de los cerramientos de la chimenea dependerán de las características de sus materiales y su composición, en este caso aplicará una masa muy pesada para obtener valores altos de retardo en la pérdida de energía; para incrementar el período de operación de la chimenea en horario nocturno cuando no existe la presencia de radiación solar.

Aislamiento

La aplicación del aislamiento conforma una envolvente térmica, es decir, se utiliza en la parte externa de los cerramientos de la chimenea, cumpliendo dos funciones: por una parte es una barrera ofreciendo mayor resistencia al flujo de calor hacia el exterior, y de esta forma conservar la mayor cantidad de la energía en el interior de la chimenea, incrementando de esta forma su temperatura; y por otra parte esta misma resistencia evita que el flujo de calor se transmita hacia el edificio adyacente, al que proporcionará el servicio de ventilación.

Tiro de la Chimenea

El cuerpo principal de la chimenea se conoce como tiro o fuste, que está compuesto de las superficies receptoras y una superficie transparente que permite la transmisión de

radiación al interior, sus características principales son: esbeltez, estanqueidad y geometría rectangular.

La esbeltez es la relación entre la altura total y el ratio de la superficie equivalente de su planta (Serra Florensa & Coch Roura, 2001). Es decir, a mayor esbeltez mayor será la diferencia de altura entre sus aberturas (a igual sección de paso) y más alta la diferencia de presiones.

La máxima estanqueidad en la chimenea es necesaria para evitar infiltraciones y exfiltraciones que afecten su rendimiento de movimiento de aire.

La geometría rectangular aumentará la superficie de transmisión y captación de radiación solar, al orientar los cerramientos más largos perpendiculares a la dirección de los rayos solares. El interior de la cámara de la chimenea no debe presentar obstrucciones que incidan en el flujo de la columna de aire.

Salida de Aire

Para permitir la salida de aire del interior de la chimenea deberá existir una salida de aire superior por donde exhalará el aire precalentado en el cuerpo de la misma.

Entrada de Aire

La función de la entrada de aire es reemplazar el aire que expulsará la chimenea por su abertura superior, tomando en cuenta que el objetivo de este dispositivo es generar el movimiento de aire esta abertura de entrada estará conectada directamente al espacio adyacente que se propone ventilar, y este espacio intermedio se alimentará de aire exterior por una siguiente abertura situada en la fachada opuesta de la chimenea.

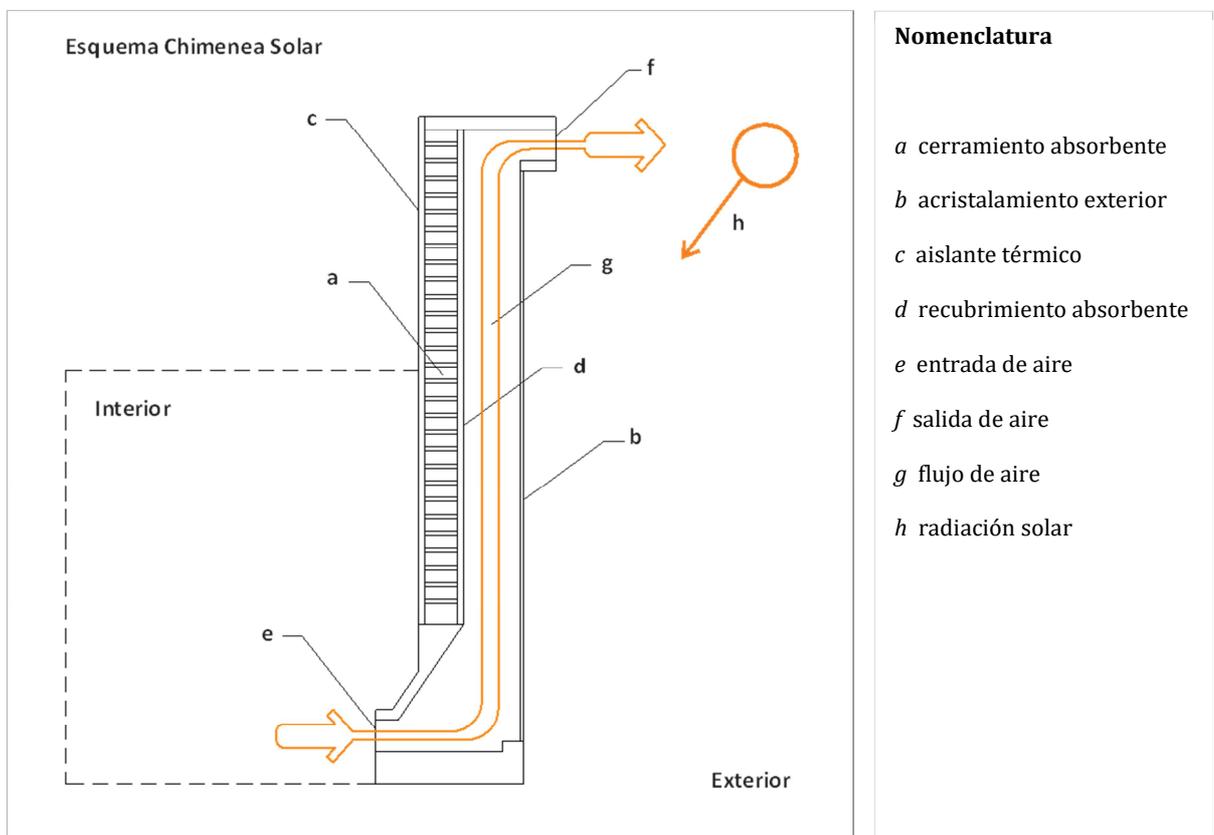


Ilustración 12 Esquema de componentes de la chimenea solar. Fuente: Varias

1.5 Estado del arte

Debido al impacto significativo que tendría en el consumo energético del hábitat del ser humano, diferentes autores han desarrollado investigaciones del tema de la chimenea solar, desde diferentes acercamientos:

- Cálculo físico matemático
- Modelos experimentales
- Modelado en programas informáticos

Cálculo físico matemático

Existen diversos modelos matemáticos propuestos por Bansal et al. (Bansal, Mathur, & Bhandari, 1993) pionero de estos estudios, donde analiza el comportamiento del flujo de aire dentro del dispositivo, así como otras propuestas de cálculo de chimeneas solares de formato pequeño; por otra parte Harris-Helwig (Harris & Helwig, 2007) realizan estudios basados en modelos matemáticos que se ingresan a un CFD para estudiar el índice más alto de flujo de aire de acuerdo a la inclinación del captador solar con respecto a la fricción provocada por esta desviación.

En estudios realizados por Shi-Chew (Shi & Chew, 2012) define la importancia del uso de aislamiento externo para acumular energía dentro del ducto de la chimenea y así prolongar su período de utilización documentando el decremento en la eficiencia del sistema cuando no cuenta con este factor.

Dentro de esta misma gama de modelos de cálculo matemáticos Mathur et al. (Mathur & Mathur, 2006) establecen una relación directa del incremento del flujo de aire con el aporte de la radiación solar.

Modelos experimentales

En el campo de los estudios experimentales encontramos una investigación realizada por Arce-Jiménez-Guzmán (Arce et al., 2009) dónde registran diferentes valores tales como temperatura interior exterior, humedad, velocidad de viento y coeficiente de salida, de un prototipo creado por ellos en formato aislado.

En esta misma línea encontramos los resultados proporcionados por Alfonso-Oliveira (Afonso & Oliveira, 2000) donde evalúan el comportamiento de una chimenea convencional respecto a una chimenea solar, es decir con captación de radiación solar, destacando el incremento de flujo de aire en la chimenea solar, modelado en software y comprobado en prototipos construidos.

Otro campo de investigación ha sido el dimensionamiento del cuerpo principal de la chimenea, encontrando parámetros límite dentro del funcionamiento, como por ejemplo nos demuestra Ong-Chow (Ong & Chow, 2003) al documentar los valores óptimos del espesor de la chimenea, teniendo contraflujos cuando se rebasan ciertos límites.

Modelado en programas informáticos

Dentro de las investigaciones de modelado por software tenemos varias líneas de investigación, las que son comprobatorias de los modelos matemáticos, como el análisis que presenta Saifi et al. (Saifi, Settou, Dokkar, Negrou, & Chennouf, 2012) donde generan un prototipo aislado de chimenea solar, documentando el comportamiento del flujo de aire analizado y comprobado desde las predicciones de software CFD respecto a las mediciones tomadas dentro del dispositivo, siguiendo esta misma línea de investigación otros autores han explorado el comportamiento del sistema insertado en un espacio habitable teórico, siendo el caso de Khedari-Boonsri-Hirunlabh (Khedari, Boonsri, &

Hirunlabh, 2000) modelando un espacio prototípico en software CFD aplicando el dispositivo de estudio, obteniendo resultados enfocados a temperatura, renovaciones de aire y confort térmico; en este proceso de análisis encontramos estudios que integran variables fuera de laboratorio, independientemente que continúan siendo modelados en entornos controlados, siendo el caso de la investigación realizada por Lee-Strand (Lee & Strand, 2009) donde desarrollan e implementan un módulo en el programa EnergyPlus para la simulación y determinación del impacto energético de las chimeneas solares, utilizando para esta modelización datos reales de sitios específicos y evaluando la aportación a la eficiencia energética entre ellos.

Existen otros estudios de análisis por medio de modelado en software del rendimiento de la chimenea solar con sistemas complementarios, como lo plantea Chungloo-Limneeckochai (Chungloo & Limneeckochai, 2009) comprobando el rendimiento de una sistema combinado de chimenea solar con una cubierta enfriada por agua por medio de un programa CFD, obteniendo valores de reducción de la temperatura interior.

En esta línea de sistemas combinados la investigación experimental de Ding-Hasemi-Yamada (Ding, Hasemi, & Yamada, 2005) propone el estudio del sistema de chimenea solar y una fachada ventilada, analizando su comportamiento en un software CFD y un modelo a escala simulando un edificio habitacional de varios niveles, concluyendo en la variabilidad de eficiencia del sistema de acuerdo a la posición y altura de la entrada de aire.

Por último, se enuncian los experimentos y modelizaciones CFD del rendimiento de la chimenea solar como aportación complementaria a sistemas activos de acondicionamiento climático, siendo el caso del estudio realizado por Khedari-Rachapradit-Hirunlabh (Khedari, Rachapradit, & Hirunlabh, 2003) concluyendo el incremento en confort térmico y ahorro energético en un prototipo de habitación que opera con aire acondicionado y el rendimiento alcanzado con la aportación de disipación de calor de la chimenea solar.

Cronología de Estado del Arte

Año	Autor	Sitio	Método	Área de Estudio	Conclusiones
1993	Bansal, Mathur, Bhandari	India	Num	Superficie del Colector de Aberturas	2.25 m ² de colector solar inducen 330 m ³ /hr con RS de 1000 W/m ²
2000	Alfonso, Oliveira	Portugal	Exp	Comparativo entre chimenea convencional y chimenea solar	Asistencia solar incrementa de 10 a 22% el flujo de aire
2000	Khedari, Boonsri, Hirunlabh	Tailandia	Exp	Temperatura interior y renovaciones de aire	Colector solar de 9 m ² genera 15 RH y reduce 50% de calentamiento interior
2003	Dai, Sumathy, Wang, Li	China	Num	CHS inclinada + Cavidad de enfriamiento por absorción	2.5 m ² de colector solar puede generar 150 kg/hr de flujo de aire
2003	Khedari, Rachapradit, Hirunlabh	Tailandia	Exp	Colector solar + CHS vertical + aire acondicionado	CHS puede reducir 10 a 20% menos de consumo eléctrico de aire acondicionado
2003	Ong, Chow	Malasia	Num Exp	Sección cámara de aire + RS + superficie colector solar	Sección óptima: 0.30 m
2005	Heras, Jiménez, San Isidro, Zarzalejo, Pérez	España	Exp	CHS inclinada	Reducción en demanda de refrigeración para obtener confort térmico
2005	Bansal, Mathur, Mathur, Jain	India	Exp Num	Temp. de absorbente, canal de aire y acristalamiento	Superficie de 1 m ² generó velocidades hasta de 0.24 m/s
2005	Ding, Hasemi, Yamada	Japón	Exp Sim	Chimenea solar Fachada Ventilada	Diferencia de presión óptima 2 niveles de altura mínimo
2006	Mathur, Bansal, Mathur, Jain, Anupma	India	Exp	Altura del absorbente Sección cámara de aire	Relación óptima: 2.83 entre altura del absorbente y sección de cámara de aire
2006	Chantawong et al.	Tailandia	Exp Num	Ventana Tipo Chimenea Doble acristalamiento	Promedio de flujo de aire inducido de 0.13 a 0.28 m ³ /s

2006	Harris, Helwig	Reino Unido	Sim	Ángulo de inclinación Doble acristalamiento Superficie bajo emisiva	Inclinación óptima: 67.5° a Lat. 52° 10% más eficiencia usando superficie bajo emisiva
2006	Mathur, Mathur, Anupma	India	Num Exp	Ángulo de inclinación	Inclinación óptima: 40° a 60°
2006	Miyazaki, Akisawa, Kashiwagi	Japón	Sim Num	Efecto en la carga térmica de refrigeración y calefacción	Reducción en ventilación: 50% Reducción en Calefacción: 20%
2007	Chungloo, Limmeechokchai	Tailandia	Exp	Chimenea solar inclinada + Refrigeración por aspersión	Reducción de temperatura interior de 1.4 a 3.0° C
2007	Martí-Herrero, Heras-Celemin	España	Num	Ventilación nocturna Inercia térmica	Absorbente de concreto: temperatura máx. 2 horas de retraso por inercia térmica
2008	Bassiouny, Koura	Egipto	Sim Num	Abertura de entrada de aire Sección de la cámara de aire	Incremento de apertura: 11% más flujo Incremento de sección de cámara de aire: 25% más renovaciones de aire
2008	Sakonidou, Karapantsios, Balouktsis, Chassapis	Grecia	Exp Sim	Ángulo de inclinación Herramientas simulación CFD	CFD Fluent mantuvo alta concordancia con resultados numéricos y experimentales
2009	Ho Lee, Strand	E.U.	Sim Num	Altura de chimenea Absortancia solar Transmitancia solar Sección de cámara de aire	Parámetro más incidente: altura de la chimenea y el menos incidente: la sección de la cámara de aire
2009	Arce, Jiménez, Guzmán, Heras, Alvarez, Xamán	México	Exp Sim	Temperatura de aire CHS Flujo de aire	Incremento de 7°C al interior CHS; Flujo de aire promedio: 177 m3/hr con 604 W/m2 de RS.
2009	Chungloo, Limmeechokchai	Tailandia	Exp Sim	Inclinación CHS Cubierta metálica refrigerada	Reducción: 0.5 a 0.7°C de temperatura interior e incremento flujo de aire: 12%
2010	Yusoff, Salleh, Adam, Sapiain, Sulaiman	Malasia	Exp Num	Combinación de CHS de cubierta con CHS vertical	Diferencia de temperatura de 9.9°C, impacto del factor viento significativo
2010	Maerefat, Haghighi	Irán	Num Exp	CHS inclinada en combinación con Intercambiador de calor	Mayor altura de CHS incrementa eficiencia de Tubos de Enfriamiento
2011	Zhai, Song, Wang	China	EA	Sistemas solares activos y pasivos	Estado del Arte
2011	Khanal, Lei	Australia	EA	Geometría CHS Ángulo inclinación CHS	Proceso de transferencia de calor Mecánica de fluidos Condiciones térmicas habitación
2012	Saifi, Settou, Dokkar, Negrou, Chennouf	Algeria	Exp Sim	Ángulo inclinación CHS Sección de cámara de aire	Ángulo inclinación óptimo: 45° Cámara de aire óptima: 30 cms
2012	Tan, Wong	Singapur	Exp Sim	Velocidad de aire interior Posición de la CHS Temperatura interior	Velocidad máx: 0.49 m/s Enfriamiento interior 1 a 2 hrs más rápido
2013	DeBlois, Bilec, Schaefer	E.U.	Sim Num	CHS integrada a cubierta Paneles fotovoltaicos Ventilación nocturna	Validación CFD a cálculo numérico Ventilación nocturna producida por flotabilidad térmica
2013	DeBlois, Bilec, Schaefer	E.U.	Sim	CHS inclinada en cubierta Comparativo: ventilación cruzada y estándar	Reducción de hasta un 70% de demanda de refrigeración con sistema combinado
2013	Koronaki	Grecia	Sim	Ventilación nocturna Inercia térmica Configuración CHS	Máxima eficiencia: altura: 6 m, ancho: 3 m, cámara aire: 0.20 m, espesor hormigón: 0.10 m, orientación: oeste

Nota: CHS: (Chimenea Solar), Num: (Numérico), Exp: (Experimental), Sim: (Simulación), RS: (Radiación Solar)

Tabla 1 Lista cronológica de artículos publicados que estudian la chimenea solar. Fuente: Science Direct (Elsevier)

Capítulo 2

2 Metodología

El objetivo principal de esta investigación es identificar los parámetros de diseño que influyen en la velocidad del aire que produce una chimenea solar al interior de un espacio habitable; utilizando inicialmente una herramienta informática de simulación energética y posteriormente la validación de datos en un modelo experimental a escala real.

Para lograr este objetivo se implementó una metodología que se divide en tres etapas:

- a. Simulación Energética.
- b. Modelo Experimental.
- c. Validación de Datos Medidos con Simulación.

De manera previa se revisaron las publicaciones de estudios que hacen referencia a la chimenea solar, con el objetivo de obtener datos cuantitativos que permitan establecer los principales parámetros de diseño que intervienen en su desempeño.

La estrategia de análisis consistió en ordenar cronológicamente la información recopilada de estudios realizados por investigadores de sistemas pasivos de ventilación, específicamente de chimeneas solares; para resumir las diferentes líneas de investigación y los métodos de análisis; posteriormente simplificar los resultados publicados en una matriz, que expresa los parámetros de estudio y las conclusiones obtenidas; se revisan las coincidencias y diferencias para filtrar los parámetros principales y secundarios con sus posibles variables.

Como resultado de la revisión del estado del arte seleccionado se acotan los parámetros geométricos fundamentales de diseño de la chimenea solar:

- a. Altura de la chimenea
- b. Espesor de la cámara de aire

En la mayoría de los casos no se toma en cuenta la habitación adjunta y en muchos de ellos sólo se estudia el dispositivo aislado, por lo que se considera imprescindible incluir en el estudio los parámetros de diseño que impactan directamente en la habitación:

- a. Sección de la superficie de entrada de aire de la habitación.
- b. Relación de aberturas de entrada y salida de aire.
- c. Posición de las aberturas en la habitación y chimenea solar.

Con las variables de estudio que se mencionan en este apartado, se procede a la construcción del Modelo Base para Simulación (MBS), su desarrollo se describe a continuación:

2.1 Simulación Energética

La razón fundamental del uso de un programa informático de simulación energética es utilizar una herramienta de cálculo que permita realizar modificaciones a los parámetros de diseño, proceder al análisis de resultados, y visualizar los modelos CFD, para evaluar el comportamiento de la velocidad del aire al centro de la habitación en las diferentes configuraciones y geometrías de la habitación y la chimenea solar. Para este análisis seleccionamos el programa informático DesignBuilder que utiliza el motor de cálculo EnergyPlus.

DesignBuilder es un programa de simulación energética, desarrollado en Reino Unido, y que utiliza el motor de cálculo de EnergyPlus y su propio módulo CFD (*Dinámica Computacional de Fluidos*). Su función es ser una interfaz de gestión de EnergyPlus y obtener resultados energéticos de edificios, emisiones de CO₂, iluminación e índices de confort.

EnergyPlus es un programa informático de análisis de energía y cargas térmicas desarrollado por el Departamento de Energía de Estados Unidos; teniendo como funciones principales: calcular las cargas de calefacción, refrigeración, ventilación e iluminación; flujo de calor, temperaturas superficiales y operativas.

Computational Fluid Dynamics (CFD) es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas que implican flujos de fluidos. En el módulo DesignBuilder se fundamenta en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes; es decir, resuelve las ecuaciones de conservación de masa, energía y momento; subdividiendo el espacio en una malla tridimensional de análisis y obteniendo como resultados campos de distribución de dirección y velocidad de aire, temperatura y presión.

2.1.1 Criterio de diseño de Modelo Base para Simulación

La geometría de la habitación obedece a un criterio de espacio habitable mínimo construible, que permita el acceso a este habitáculo y la descarga periódica de los instrumentos de medición. Como premisa de dimensionamiento se establecen medidas absolutas y de carácter unitario, es decir, que puedan traducirse en potencias o velocidades de rápida interpretación para sintetizar la información en resultados que puedan ser adaptables y replicables en diversos escenarios. En este mismo sentido es fundamental considerar que su destino final es la construcción de un Modelo Experimental, por lo que utilizamos los siguientes criterios:

- a. Económico Constructivo
- b. Habitabilidad

Económico Constructivo

La selección de materiales responde a las siguientes premisas: bajo costo para fácil adquisición, prefabricados para una rápida construcción y que sean de uso común en diferentes entornos.

Habitabilidad

Este concepto consiste en definir las dimensiones de la habitación, es decir, diseñar un Modelo Base que cumpla los requerimientos mínimos para poder ingresar dentro de la habitación para acceder a los instrumentos de medición para mantenimiento y descarga de datos.

A continuación se observa en la siguiente figura la sección del Modelo Base para Simulación y las variables de estudio que se utilizan en esta etapa:

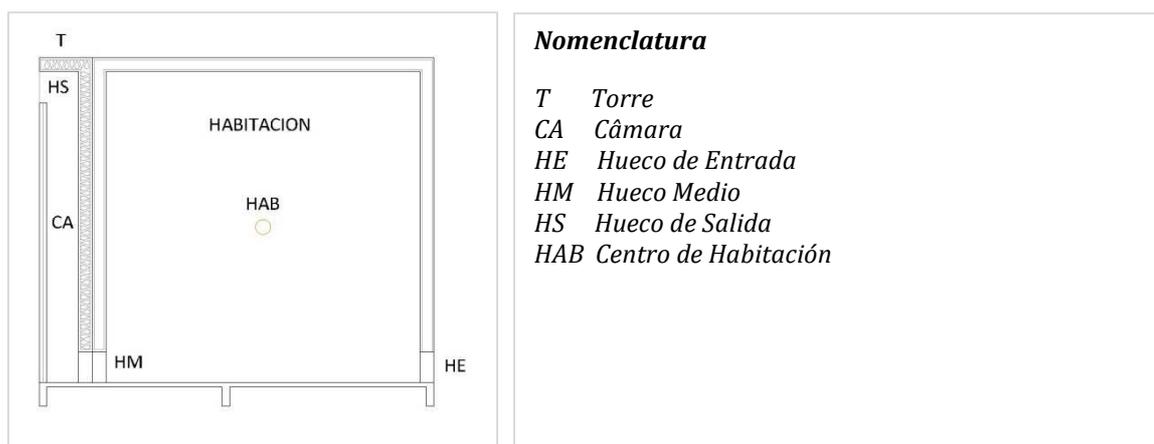


Ilustración 13: Variables del Modelo Base. Sección longitudinal. Fuente: Propia del autor.

Criterio de evaluación

Para evaluar la ventilación desde el punto de vista del confort humano, el enfoque no deberá ser solamente en el flujo de aire sino en la distribución de velocidades en el espacio ventilado; por lo cual necesitamos datos cuantitativos que involucren: (Givoni, 1994)

- velocidad del aire en la abertura de entrada
- velocidad promedio a la altura de los usuarios: 1 metro del suelo

Por otra parte, la observación de los modelos de flujo de la investigación de Víctor Olgyay, deja documentado la incidencia que tienen la posición y relación de proporción entre las aberturas, dependiendo de ello la velocidad y dirección del flujo de aire interior.

Esta investigación se acota en función de un resultado: la velocidad interior en el centro de la habitación a 1 metro de altura del suelo; y el objetivo de referencia de velocidad será 1 m/s para evaluar por medio de porcentajes respecto a esta velocidad.

Las variables que se modifican en las series de simulaciones son las siguientes:

- Altura y posición de la torre de la chimenea solar
- Espesor y ancho de la cámara solar
- Superficies de aberturas
- Relación de proporción de aberturas
- Posición de aberturas

El criterio utilizado para evaluar el impacto en la velocidad del aire al centro de la habitación (HAB), consiste en modificar gradualmente y por separado cada una de las variables definidas para este estudio, de tal forma que se obtienen una serie de resultados por variable que permite identificar las que producen mayor incidencia, posteriormente, condensar los resultados de máxima velocidad por variable en una sola tabla para evaluar el porcentaje de incremento respecto al Modelo Base. Finalmente se seleccionan las variables que causen un mayor impacto para diseñar el Modelo de Simulación; el cual se validará su desempeño al generar una nueva serie de simulaciones que se contrastarán con el Modelo Base.

En la Ilustración 14 es posible visualizar en forma de imagen renderizada las variables

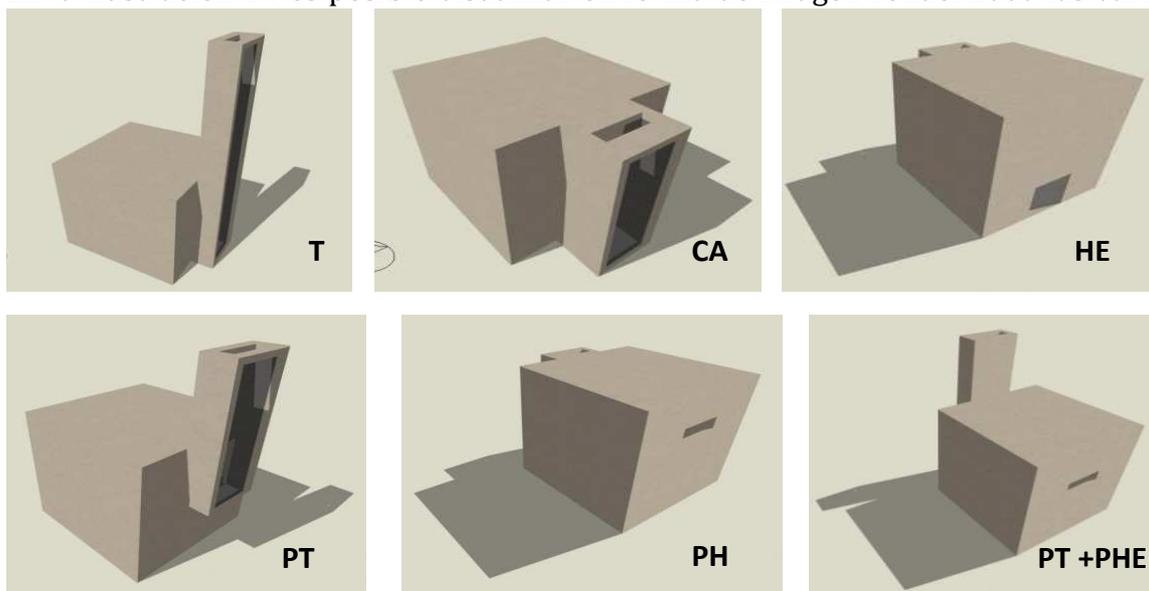


Ilustración 14: Variables y configuraciones del Modelo Base.

de estudio, su respectiva nomenclatura, así como un ejemplo de una de sus configuraciones.

2.1.2 Modelo Experimental

La construcción del Modelo Experimental tiene como objetivo validar los resultados obtenidos por medio de la simulación energética al medir la velocidad del aire en puntos específicos de la habitación y la chimenea solar; observar y evaluar las variaciones de estos datos durante un ciclo anual completo en condiciones meteorológicas reales. Para llevar a cabo este objetivo se procede a la construcción física del modelo, la instalación de instrumentos de medición y adquisición de datos atmosféricos y climáticos.

Criterio de Construcción

Para la construcción del Modelo Experimental se utilizan dos criterios principalmente:

- a. Selección de sitio
- b. Selección de materiales

Selección de sitio

El sitio para la construcción del Modelo Experimental debe estar exento de construcciones que puedan producir sombras de viento (en relación a su altura), de igual forma, se evitan las sombras proyectadas.

Selección de materiales

En este apartado se considera fundamental su perfil prefabricado, y que posean características para soportar las condiciones de intemperie durante el ciclo anual de medición, es decir, que soporten el efecto de la radiación solar, precipitación pluvial y ráfagas de viento.

Criterio de Instrumentación

Los datos para generar las fichas técnicas de evaluación del experimento son aquellos que intervienen en el flujo de aire al interior de la habitación, por lo que es necesario medir la velocidad y temperatura del aire interior y exterior, la dirección del aire exterior, la temperatura radiante al interior de la habitación y la radiación solar.

Para llevar a cabo las mediciones correspondientes se instrumentarán los siguientes equipos de medición:

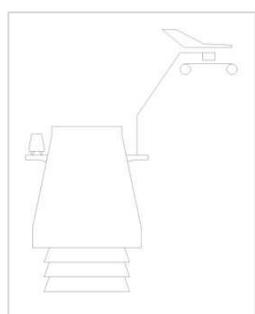


Ilustración 15: Estación Meteorológica (EM)



Ilustración 16: Anemómetro de Hilo Térmico (An)

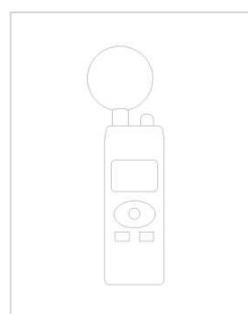


Ilustración 17: Monitor de Estrés Térmico (WBGT)

La función de la Estación Meteorológica (EM) es recopilar datos de temperatura exterior, velocidad y dirección de viento y radiación solar. *Ver Ilustración 15.* El Monitor de Estrés Térmico (WBGT) nos permite medir la temperatura interior de la habitación, así como la temperatura radiante de las superficies interiores de la habitación. *Ver Ilustración 17.* Para medir la velocidad de aire interior utilizamos dos Anemómetros de Hilo Térmico (An), la razón por la que se selecciona este tipo de anemómetros es su capacidad de registrar velocidades de aire muy bajas, a partir de 0,01 m/s. *Ver Ilustración 16.*

La Estación Meteorológica se instala en el exterior, separada del Modelo Base para evitar las sombras de viento del Modelo hacia la estación y en sentido inverso, que el mástil de sensores no genere sombras sobre el Modelo. Al centro de la habitación (HAB), a 1 mt de altura se instalan dos equipos: un Anemómetro de Hilo Térmico y el Monitor de Estrés Térmico, el otro Anemómetro se instala al centro del Huevo de Entrada (HE), como se ilustra en la Ilustración 18.

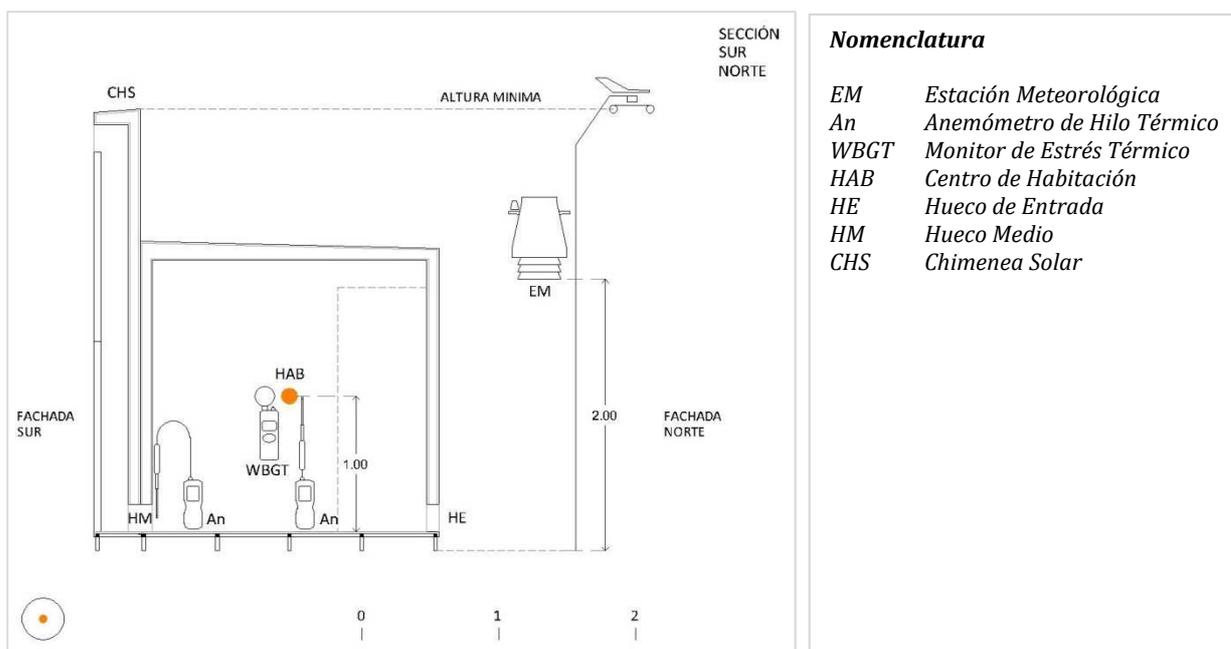


Ilustración 18: Posición de instrumentos en Modelo Experimental

Criterio de Evaluación

La descarga de datos se efectúa de forma periódica semanalmente, separando los archivos por equipo, etiquetando la información con la misma nomenclatura, y ajustando los relojes internos para el próximo ciclo de medición.

En este apartado se describe brevemente el proceso de manejo de datos de los diferentes instrumentos de medición. El primer paso es determinar los *Días Tipo* de cada mes, es decir, el o los días más representativos de cada mes cercanos a los valores históricos, por lo que la base de datos a utilizar será la Estación Meteorológica; una vez determinados los *Días Tipo* se procederá a elaborar las fichas técnicas de los Anemómetros y del Monitor de Estrés Térmico para cada día seleccionado, posteriormente se integrarán todas las fichas técnicas en una sola base de datos mensual, con sus respectivas tablas y gráficas; con esta información procederemos a crear los archivos EPW para insertarlos a la base de datos del programa DesignBuilder y ejecutar las simulaciones energéticas para su posterior análisis. La serie anual de fichas se analiza mes a mes, de igual forma se analizará comparativamente los resultados de los instrumentos de medición en contraste con los resultados obtenidos de las simulaciones energéticas.

Selección de Día Tipo por mes

La tabla utilizada para discriminar los *Días Tipo* Mensuales consta de varias fuentes integradas, por una parte tenemos los valores medios históricos obtenidos de la base de datos del sitio Weatherbase (“Weatherbase,” 2016), conteniendo Temperatura Máxima, Temperatura Media, Temperatura Mínima, Humedad Relativa y Radiación Solar; estos datos se agruparon en una tabla para utilizarlos como referencia en la selección, la tabla es la siguiente:

Weatherbase Villahermosa, Tabasco, México.					
Mes	T Max	T Media	T Min	HR Media	Radiación Solar
Unidad	°C	°C	°C	%	Wh/m2/día
Enero	27.9	23.6	19.3	90	4194
Febrero	29.2	24.5	19.7	88	5000
Marzo	31.9	26.6	21.3	85	5889
Abril	33.9	28.5	23.1	82	6472
Mayo	35.1	29.6	24.2	82	6556
Junio	34.4	29.3	24.2	86	6389
Julio	33.9	28.9	23.8	87	6667
Agosto	34.0	28.9	23.8	87	6361
Septiembre	33.0	28.4	23.7	88	5583
Octubre	31.2	27.1	23.0	87	4861
Noviembre	29.8	25.7	21.5	88	4444
Diciembre	28.3	24.1	19.9	90	3861

Tabla 2 Valores climáticos medios. Fuente: Weatherbase

El procedimiento consiste en elaborar fichas mensuales con las mismas variables mostradas en la tabla anterior, con la diferencia que éstas incluyen los valores diarios de cada mes; para determinar los valores cercanos a los valores medios se utilizó el siguiente criterio:

1. Temperatura (T): valores dentro de +/- 1°C respecto al valor medio.
2. Humedad Relativa (HR): valores dentro de +/- 5% respecto al valor medio.
3. Radiación Solar (RS): el valor más cercano.

La siguiente tabla contiene en su cuerpo principal los valores meteorológicos día a día, en la parte superior los valores medios históricos y en la inferior los rangos de selección, los datos resaltados con sombreado indican que se encuentran dentro de los rangos establecidos.

Selección Día Tipo		Marzo 2016				
Villahermosa, Tabasco, México.						
Estación Meteorológica Davis Pro II						
Día	Valores Históricos	T Máx °C	T Media °C	T Min °C	HR Media %	Radiación Wh/m2/día
		31.9	26.6	21.3	85	5889
1		30.8	25.8	22.1	80	4904
2		30.3	25.9	22.7	81	3212
3		27.5	24.9	22.8	88	1913
4		27.5	24.7	23.3	90	1876
5		28.8	24.5	22.0	88	2723
6		29.0	24.8	22.8	87	2939
7		32.0	26.5	21.8	82	5551
8		35.7	29.4	23.6	72	6361
9		35.9	30.4	24.5	70	6229
10		35.4	28.5	24.6	72	4218
11		34.5	29.0	24.0	78	6210
12		32.1	27.6	25.3	80	3124
13		34.3	28.8	24.1	76	6057
14		35.4	29.9	25.8	76	5566
15		34.9	29.9	25.2	72	6350
16		34.9	29.8	24.6	72	6185
17		34.2	29.7	25.5	76	5095
18		36.5	30.7	26.3	70	5992
19						
20						
21		25.4	22.4	20.4	83	2457
22		27.6	23.6	20.1	76	4699
23		31.9	26.6	20.9	74	6483
24		34.9	29.7	23.3	72	5920
25		30.1	27.1	25.0	81	2525
26		33.7	28.7	24.4	81	5583
27						
28						
29						
30						
31		37.6	32.0	26.4	68	6143
Rangos de Selección						
Límite Alto		32.9	27.6	22.3	89	6183
Límite Bajo		30.9	25.6	20.3	81	5594

Tabla 3 Selección de Día Tipo para marzo 2016. Fuente: Propia del autor.

Nota: En algunos casos se presentan ciertos días con pérdida de datos, debido a condiciones externas fuera del control de la investigación, solo aparecen como celdas vacías y la selección se realiza con la información existente.

Ahora bien, por cada mes se definen los *Días Tipo* siguiendo el criterio de seleccionar los días que más valores se encuentren dentro de los rangos seleccionados, jerarquizando los valores de temperatura, especialmente en la Temperatura Media (T Media), posteriormente la Radiación Solar (RS) y finalmente la Humedad Relativa (HR).

La Tabla 4 es un ejemplo de la selección de días tipo utilizando los datos del mes de marzo 2016, en este caso los seleccionados son los días 7 y 23.

Día Tipo Seleccionado		Marzo 2016				
Villahermosa, Tabasco, México.						
Estación Meteorológica Davis Pro II						
Día	Valores Históricos	T Máx °C	T Media °C	T Min °C	HR Media %	Radiación Wh/m2/día
		31.9	26.6	21.3	85	5889
7		32.0	26.5	21.8	82	5551
23		31.9	26.6	20.9	74	6483
Rangos de Selección						
Límite Alto		32.9	27.6	22.3	89	6183
Límite Bajo		30.9	25.6	20.3	81	5594

Tabla 4 Día tipo seleccionado para marzo 2016. Fuente: Propia del autor.

Nota: Aunque la variable de Radiación Solar es el más incidente en el funcionamiento de la CHS, podemos encontrar valores similares en todo el ciclo anual, pero los valores de Temperatura son más indicativos para la selección de Días Tipo.

Día Tipo Integrado							
07 Marzo 2016							
Estación Meteorológica Davis II						Anemómetro	WBGT
Hora	TA Ext. °C	Viento m/s	Dir. Viento Card.	Rad. Solar Wh/m2	HAB	HM	TA Int. °C
					Vel. Aire m/s	Vel. Aire m/s	
1	22.5	0.63	ENE	0	0.08	0.07	22.4
2	22.3	1.10	ENE	0	0.04	0.08	22.2
3	21.8	1.00	ENE	0	0.05	0.08	21.9
4	22.0	0.78	E	0	0.04	0.00	22.1
5	22.5	0.43	ESE	0	0.05	0.15	22.4
6	22.6	0.65	E	0	0.04	0.12	22.5
7	22.6	0.00	---	7	0.03	0.05	22.5
8	23.1	0.53	ESE	77	0.03	0.27	23.0
9	23.9	1.10	E	153	0.03	0.03	24.0
10	25.0	1.43	E	299	0.00	0.11	25.5
11	26.5	1.68	E	674	0.03	0.32	27.6
12	27.9	1.90	E	899	0.02	0.41	29.6
13	28.8	1.88	E	877	0.01	0.38	30.5
14	30.2	2.33	E	846	0.13	0.31	32.1
15	31.3	2.10	E	731	0.00	0.14	32.9
16	32.0	2.68	E	555	0.08	0.68	33.3
17	32.0	2.58	E	337	0.00	0.37	33.0
18	31.1	2.20	E	93	0.00	0.36	31.7
19	29.8	1.30	E	4	0.00	0.13	30.1
20	28.7	1.55	E	0	0.00	0.29	28.7
21	27.9	1.68	E	0	0.11	0.45	27.7
22	27.5	2.00	E	0	0.03	0.33	27.2
23	27.0	1.43	ESE	0	0.01	0.42	26.7
24	26.4	1.55	ESE	0	0.01	0.28	26.0
Sumatoria Vel. Aire:		34.45			0.39	2.89	
Dirección Viento Predominante:				E			

Tabla 5 Día Tipo Integrado para marzo 2016. Fuente: Propia del autor.

Día Tipo Integrado

Una vez seleccionados los dos días tipo por mes, el siguiente paso es integrar los datos de los instrumentos de medición internos, para ello, se utilizan las tablas de resultados del Monitor de Estrés Térmico, del Anemómetro HAB y del Anemómetro HM. En este caso se consolidan los datos meteorológicos con los valores de velocidad de aire y temperatura interior como se observa en la Tabla 5.

El contenido de la Tabla 4 nos permite analizar las posibles correlaciones entre la Radiación Solar (RS), velocidad del viento exterior, la velocidad del aire en el punto HAB y en el punto HM

Coeficiente de Correlación (Pearson): Velocidades de aire y Radiación Solar.			
07 Marzo 2016			
	Radiación Solar	Vel. Aire HAB	Vel. Aire HM
Viento Exterior	0.59	-0.02	0.73
Radiación Solar		0.07	0.41
Vel. Aire HAB			0.12

Tabla 6 Correlaciones de variables meteorológicas para marzo 2016. Fuente: Propia del autor.

La herramienta estadística utilizada para documentar el índice de correspondencia entre dos variables de estudio es el **Coeficiente de Correlación de Pearson**, de esta forma es posible obtener un valor que nos indica el grado de relación entre las variables analizadas, esta herramienta se utilizará para cada serie de datos obtenidos y de esta forma obtener conclusiones respecto a la incidencia de una variable sobre otra. A continuación una breve descripción:

Coeficiente de correlación de Pearson

El Coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas, independientes de su escala de medida, es decir, funciona como un índice para medir el grado de relación de dos variables, midiendo el grado de covarianza de distintas variables relacionadas linealmente.

Los valores del índice de correlación oscilan entre -1 y +1, donde la magnitud de la correlación viene indicada por el valor numérico del coeficiente, reflejando el signo la dirección de tal valor; en este sentido, tan fuerte es una relación -1 como una +1, donde -1 indica una relación perfecta negativa o inversa, y el +1 indica una relación perfecta positiva o directa.

El coeficiente de correlación de Pearson viene definido por la siguiente expresión:

$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{(\sum x^2)(\sum y^2)}}$$

Para esta ecuación estadística:

r= coeficiente de correlación lineal

$$x = X - \bar{X}$$

$$y = Y - \bar{Y}$$

(Johnson, Kuby, & Campos Olguín, 2016)

En palabras simples, el índice de correlación expone el grado de asociación entre dos variables, es decir, punto a punto, la desviación de cada variable respecto a su media, independientemente de sus unidades de medición e incluso de intensidad.

Las líneas de tendencia en las gráficas de dispersión de las variables de estudio permiten observar la intensidad y dirección de la correspondencia entre las variables, en las gráficas ejemplo inferiores se exponen los tres principales casos:

- +1: Correlación grande, positiva y perfecta, donde las dos variables presentan una tendencia de comportamiento similar y directa, al aumentar o disminuir sus valores en la misma dirección y de forma simultánea.
- 0: Correlación nula: existe una gran dispersión en la gráfica, no tiene correspondencia en intensidad ni sentido.
- -1: Correlación negativa grande y perfecta, las dos variables presentan un comportamiento similar, pero de relación indirecta; es decir, si la variable x aumenta la variable y decrece.

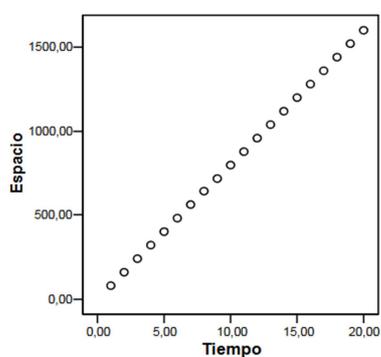


Ilustración 19 Ejemplo de correlación perfecta positiva (+1).

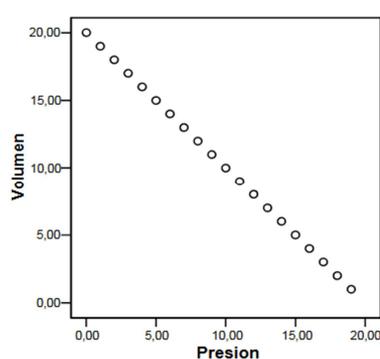


Ilustración 20 Ejemplo de correlación perfecta negativa (-1).

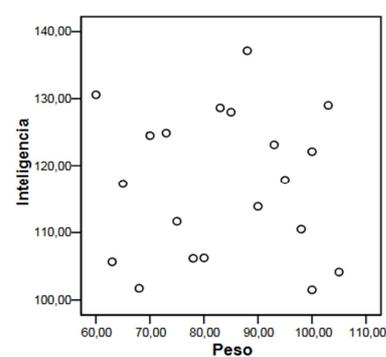


Ilustración 21 Ejemplo de correlación nula (0).

Fuente: (Botella, Suero Suñe, & Ximénez, 2012)

2.1.3 Validación de Datos Medidos con Simulación.

Esta etapa consiste en contrastar los resultados medidos en función de la simulación, para determinar el grado de confiabilidad del proceso de simulación para efectos del diseño experimental.

Simulación con archivo EPW con datos del Día Tipo seleccionado

En este apartado se analizan comparativamente los datos obtenidos por medio de los instrumentos de medición, en contraste con los resultados de las series de simulaciones energéticas creadas con archivos Energy Plus Weather (EPW), suministrados con datos climáticos de la Estación Meteorológica Davis (EM).

El objetivo de esta etapa es validar los datos de simulación energética alimentando al programa con la mayor información real posible y determinar los coeficientes de correlación entre las diferentes series de datos; se utiliza la nomenclatura *Simulación EPW* para identificar esta nueva serie de simulaciones.

En la Tabla 7 se incluyen los datos registrados por los anemómetros HAB y HM, con sus respectivos datos de Simulación EPW, y en la parte inferior se encuentra el Coeficiente de Correlación (Pearson) para cada serie de datos:

Correspondencia Mediciones a Datos Simulados						
07 Marzo 2016						
Hora	Habitación (HAB)			Hueco Medio (HM)		
	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s		Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s	
1	0.08	0.09		0.07	0.22	
2	0.04	0.01		0.08	0.20	
3	0.05	0.02		0.08	0.17	
4	0.04	0.02		0.00	0.12	
5	0.05	0.02		0.15	0.01	
6	0.04	0.02		0.12	0.03	
7	0.03	0.02		0.05	0.04	
8	0.03	0.02		0.27	0.04	
9	0.03	0.02		0.03	0.09	
10	0.00	0.10		0.11	0.20	
11	0.03	0.17		0.32	0.32	
12	0.02	0.15		0.41	0.39	
13	0.01	0.08		0.38	0.42	
14	0.13	0.05		0.31	0.43	
15	0.00	0.04		0.14	0.43	
16	0.08	0.04		0.68	0.43	
17	0.00	0.04		0.37	0.39	
18	0.00	0.04		0.36	0.34	
19	0.00	0.03		0.13	0.28	
20	0.00	0.03		0.29	0.25	
21	0.11	0.02		0.45	0.23	
22	0.03	0.02		0.33	0.22	
23	0.01	0.02		0.42	0.16	
24	0.01	0.02		0.28	0.10	
Coeficiente de Correlación (Pearson)	-0.07			0.56		

Tabla 7: Correspondencia de datos simulados a medidos para marzo 2016. Fuente: Propia del autor.

Para visualizar el comportamiento de las series de datos se utilizan gráficas que expresan de forma visual los contenidos de las tablas, y de esta manera obtener observaciones que complementen la información adquirida.

Conclusiones

El sentido de las conclusiones a partir del análisis de los resultados deberá orientarse hacia los siguientes objetivos:

- a. Identificar los parámetros morfológicos que inciden en la velocidad del aire al centro de una habitación mediante el uso de la simulación energética.
- b. Validar los resultados obtenidos por medio de la simulación energética, mediante la construcción de un modelo experimental y observar su comportamiento en tiempo real.
- c. Establecer los niveles de correspondencia entre la predicción de los datos simulados y los datos obtenidos por instrumentos de medición.

Capítulo 3

3 Simulación y Experimentación

3.1 Simulación

El Modelo de Simulación se construye a partir de los criterios expuestos en la metodología, los datos climáticos utilizados en el programa informático corresponden a la ciudad de Veracruz, México; siendo éste el único archivo disponible en el programa DesignBuilder con condiciones similares de clima y latitud al sitio destino del Modelo Experimental. El paquete completo de series de simulaciones se realiza el día **09 de Enero a las 14:00 horas**, ya que presentan las condiciones de máxima radiación en el período de invierno donde la posición del sol se encuentra más inclinada en la orientación Sur.

3.1.1 Descripción del Modelo Base de Simulación

El Modelo Base de Simulación se conforma de dos volúmenes: la Habitación y la Chimenea Solar (CHS), para la configuración en el programa informático DesignBuilder se utiliza la información que se describe a continuación:

- Configuración de Habitación.
- Configuración de Chimenea Solar (CHS).
- Configuración del programa DesignBuilder.

Configuración de Habitación

La habitación se define como un espacio cerrado con sólo dos aberturas, una que está conectada con la chimenea solar en su fachada sur y otra que conecta hacia el exterior en su fachada norte. Las dimensiones utilizadas son: 2 x 2 metros de superficie y 2 metros de altura. Las aberturas se dimensionaron en 1 metro de ancho por 0,20 metros de alto, para homogeneizarlas con las aberturas de la chimenea solar. Adicionalmente se configura una puerta de 0,60 mts de ancho en la fachada Este.

Configuración de Chimenea Solar (CHS)

La chimenea solar es un elemento rectangular con tres cerramientos sólidos y aislados, más una superficie completamente acristalada orientada hacia el sur; su cara opuesta está adosada a la habitación, siendo estas los lados más largos. La dimensión de su base es de 0,20 x 1,00 metros con una altura de 2,00 metros, homologada a la altura de la habitación. La conexión entre los dos bloques es por medio de un hueco de 0,20 x 1,00 metro, y de medidas similares el hueco superior de salida.

Configuración del programa DesignBuilder

El Modelo se configura como un Dormitorio sin Ocupantes, las ventanas y puertas se encuentran en operación deshabilitada, el HVAC, ACS y Calefacción se encuentran deshabilitados, el factor de viento se establece en valor completo de 1, el cálculo por radiación solar se ajusta en el campo 3: radiación completa interior y exterior, las infiltraciones por cancelería y puerta se encuentran habilitadas. Para el módulo CFD la malla de cálculo se configura en 10 cms y las condiciones límite se importan desde el módulo de simulación.

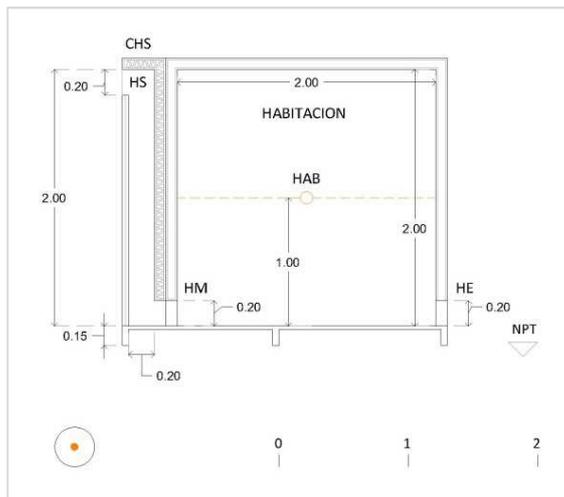


Ilustración 23: Sección para modelo de simulación

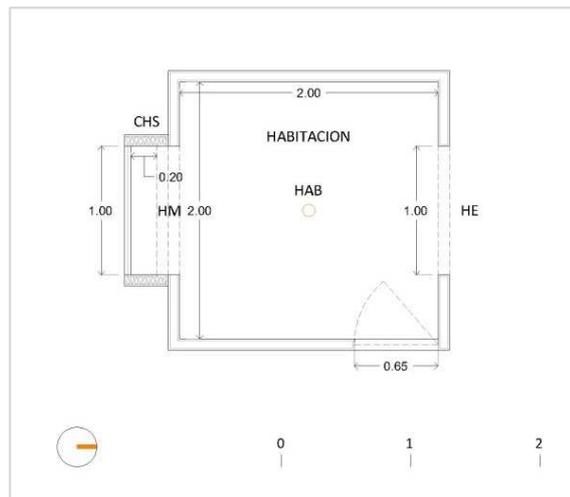


Ilustración 23: Planta para modelos de simulación

Elementos Constructivos

La configuración constructiva del Modelo Base de Simulación corresponde a la nomenclatura y especificaciones que permite utilizar el programa DesignBuilder, integrando los paquetes constructivos para cada uno de los componentes que a continuación se describen:

- cerramientos habitación
- cerramientos chimenea solar
- acristalamientos
- cubierta
- suelo
- huecos

Los **cerramientos de la habitación** están conformados por cinco capas, que constan de placas de yeso laminadas, un espacio de aire de 63,5 mm donde se aloja la estructura de lámina galvanizada, un recubrimiento exterior de mortero ligero, un acabado de compuesto para juntas en el interior, ambos en color blanco con un valor de absorptancia solar de 0,15. La cubierta de la Habitación se integra con la misma configuración de los cerramientos.

La configuración de los **cerramientos de la CHS** consta de siete capas que se integran por dos capas exteriores de placas de mortero ligero, una capa de aislante intermedio de EPS (Poliuretano Expandido) de 50 mm, entre el aislante y las placas existe una capa de aire de 6,7 mm por ambas caras y como terminación se utiliza pasta de mortero ligero Basecoat con acabado en pintura color negro con un coeficiente de absorptancia solar de 0,80 y de pintura color blanco por el exterior con un coeficiente de absorptancia solar de 0,20. La cubierta de la CHS comparte las mismas características.

La única superficie con **acristalamiento** es la fachada sur de la chimenea solar, permitiendo el paso de la radiación solar al interior de la chimenea. Su configuración es de un marco perimetral de aluminio de 50 mm y una sola capa de vidrio claro de 6 mm de espesor; con un coeficiente de transmisión solar de 0,81.

El **suelo** es similar para ambos bloques del edificio y está conformado por una placa de madera laminada en tres capas denominada Triplay, con un espesor de 15 mm, se configura con un acabado natural para la Habitación y con un acabado en pintura color negro para la CHS, ajustando el valor de absorptancia solar a 0,80.

Las aberturas o **huecos** para efectos de diseño en DesignBuilder no constituyen ningún elemento constructivo, son vacíos en el edificio. El programa los registra como elementos de intercambio energético. Para construir el modelo en DesignBuilder se utiliza la nomenclatura existente en el programa, el espesor se ajusta de forma manual, así como los valores de absorción y reflectancia. Véase Tabla 8.

Configuración de materiales del Modelo para Simulación							
Zona	Cerramiento	Material	Acabado	Espesor mm	R (m ² K/W)	U Transm. (W/m ² K)	
CHS	Muros y Techo	Basecoat	Blanco	2.0	1.79	0.55	
		Gypsum plasterboard		12.5			
		Air gap 10 mm		6.7			
		EPS Expanded polystyrene		50.0			
		Air gap 10 mm		6.7			
		Mortar		12.5			
	Suelo	Basecoat	Negro	2.0	0.37	2.703	
Acristalamiento	Triplay	Negro	15.0				
		Sgl Clr 6 mm	Transparente	6.0		6.121	0.81
Hab.	Muros y Techo	Basecoat	Blanco	2.0	0.467	2.144	
		Gypsum plasterboard		12.5			
		Air gap >= 25 mm		63.5			
		Gypsum plasterboard		12.5			
		Readymix		2.0			
	Suelo	Triplay	Natural	15.0	0.37	2.703	

Tabla 8 Configuración de paquetes constructivos para el Modelo Base de Simulación. Fuente: Propia del autor.

El Modelo Base para Simulación se sitúa en las coordenadas de origen 0,0 para efectos de simplificación de lectura de los datos calculados, pero en el eje y, es decir, sobre la vertical, el modelo se encuentra elevado en 15 cms sobre el nivel 0; esto con la intención de diseñar el modelo de simulación lo más aproximado al modelo experimental. En las siguientes figuras se muestra la imagen renderizada del Modelo Base de Simulación dentro del programa DesignBuilder.

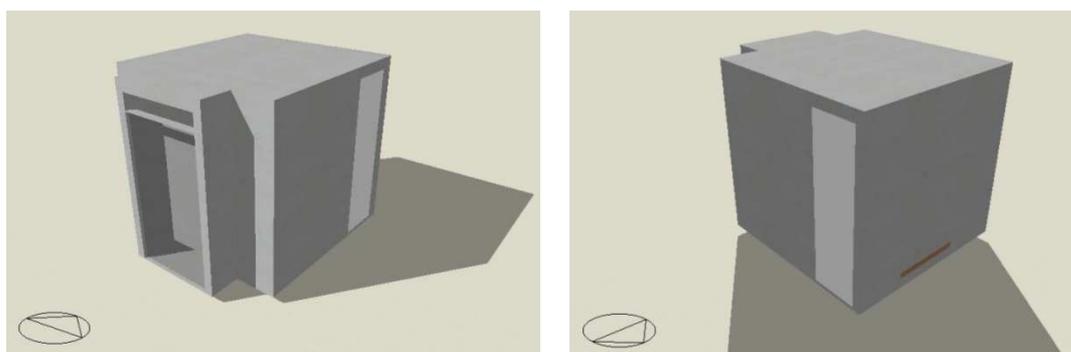


Ilustración 24: Imagen renderizada del modelo base de simulación en el programa DesignBuilder

A continuación se presenta una lista de los parámetros geométricos analizados y el proceso a seguir para evaluar las diferentes configuraciones:

Torre (T)

Evaluación de los resultados obtenidos al modificar gradualmente la altura del tiro de la chimenea, iniciando en 200 cms, incrementándose en 50 cms hasta llegar a los 600 cms como límite superior. Estos parámetros en función de la altura de la habitación a la que está adosada y estableciendo el límite como una posible altura máxima construible en una vivienda.

Cámara (CA)

Evaluación de los resultados obtenidos al modificar gradualmente el ancho de la cámara de la chimenea solar desde 10 cms de ancho hasta 60 cms de ancho, incrementándose en 10 cms para cada etapa.

Ancho de Cámara (ACHS)

Esta serie de simulaciones modifica el ancho de la chimenea solar, con una primer configuración de 20 cms hasta 200 cms de ancho, se modifica de igual forma el ancho del Hueco Medio (HM) y del Hueco de Salida (HS), quedando fijas las demás variables.

Huecos

En un siguiente paso se procede a la revisión de las aberturas, llamadas “huecos” en DesignBuilder. La referencia base es la abertura del Hueco de Salida (HS) que mide 20 cms de espesor por 100 cms de largo, derivado de la sección original de la Cámara (CA) de aire de la Chimenea Solar (CHS).

Estas dimensiones se aplicarán para las tres aberturas:

- **HE:** entrada de aire de la Habitación.
- **HM:** conexión entre la Chimenea Solar y la Habitación.
- **HS:** salida de aire de la Chimenea Solar.

Para llevar a cabo esta etapa del análisis, se realizaron series de simulaciones por cada hueco, aumentando gradualmente la altura del hueco en 10 cms hasta llegar a 60 cms, evaluando el porcentaje de incidencia en la velocidad del aire en el punto HAB en relación al Modelo Base.

Posición Torre (PT)

Esta serie de simulaciones consiste en modificar gradualmente la posición de la Torre (T) en el sentido vertical a cada 20 cms, de tal forma que en la última serie la posición del Hueco medio (HM) se encuentra en el límite superior de 200 cms.

Relación entre Aberturas

Los resultados de esta etapa se obtienen modificando la relación de secciones de los huecos, la dimensión básica será el estándar de 20 cms x 100 cms y de ahí se realizan las siguientes combinaciones:

- **3:2:1** superficie mayor en Hueco de Salida (HS)
- **1:2:3** superficie mayor en Hueco de Entrada (HE)

El procedimiento consiste en realizar una serie de simulaciones modificando la sección del Hueco de Entrada (HE) y el Hueco de Salida (HS) de forma inversamente proporcional, es decir, partiendo del Modelo Base, reducir el HE y aumentar el HS, y viceversa.

Posición de Hueco de Entrada (PHE)

Esta etapa consiste en el estudio de una serie de simulaciones que modifican gradualmente la posición del Hueco de Entrada (HE) a cada 20 cms sobre el eje vertical hasta llegar al límite superior situado a 200 cms de altura.

Posición Torre + Posición Hueco de Entrada (PT+PHE)

En esta última etapa se estudió el comportamiento de la velocidad del aire al modificar la posición de la torre y la posición del hueco de entrada de manera simultánea, de tal forma que ambos se desplazan gradualmente sobre el eje vertical cada 20 cms.

3.2 Modelo Experimental

El Modelo Experimental se construye en la planta de azotea de una vivienda (17.99°N, 92.92°W) de dos niveles en la zona centro de la ciudad de Villahermosa, México. El período de construcción inicia en el mes de agosto 2015 y finaliza con la instalación de los instrumentos de medición en el mes de septiembre 2015. El período de medición inicia en octubre 2015 y concluye en junio 2017.

El sitio seleccionado para la instalación del Modelo Experimental se encuentra sobre el nivel de la mayoría de los edificios perimetrales como se aprecia en la Fig, de tal forma que no generen sombras solares ni de viento. El modelo se instaló en una posición fuera de obstrucciones cercanas dentro de la misma planta de azotea. Ver

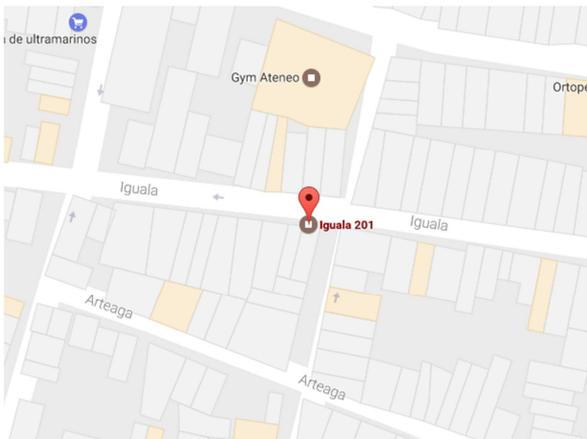


Ilustración 26 Sitio de localización del Modelo Experimental. Fuente: Google INEGI



Figura 1 Fachada exterior del sitio de instalación del Modelo Experimental. Fuente: Propia del autor.

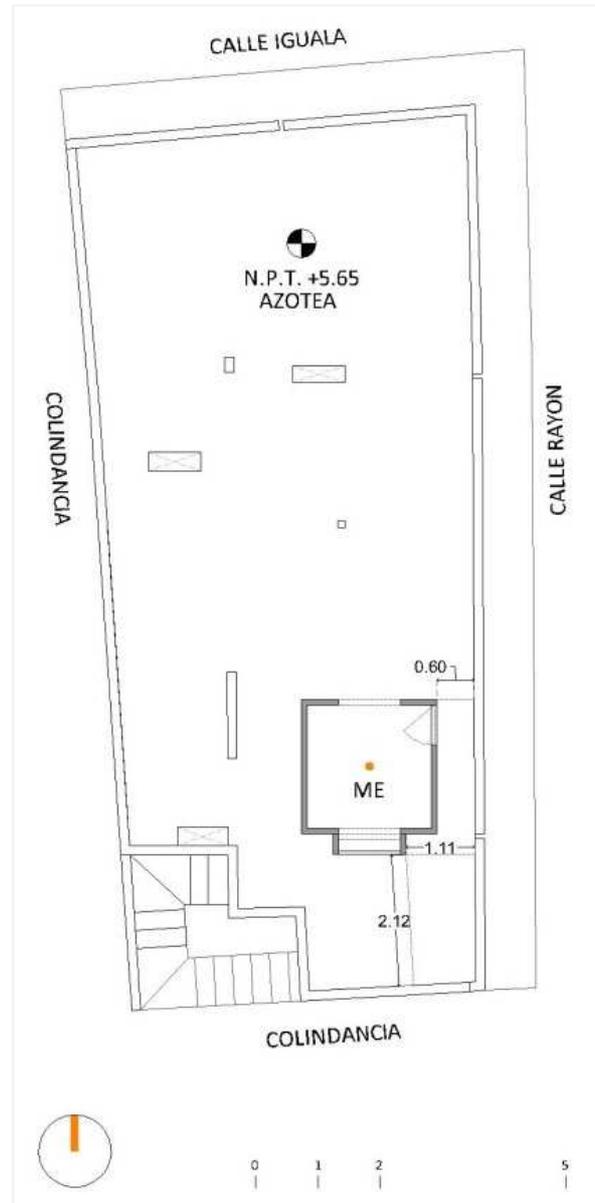


Ilustración 25 Planta arquitectónica del sitio de instalación del Modelo Experimental. Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Descripción del Modelo Experimental

La configuración geométrica del Modelo Experimental consta de dos partes:

- a. Habitación.
- b. Chimenea Solar (CHS).

a. Habitación

La habitación es completamente cerrada con una puerta de acceso con aislamiento interior y dos aberturas: el Hueco de Entrada (HE) que conecta con el exterior y el Hueco Medio (HM) que conecta con la Chimenea Solar (CHS), el piso está elevado 10 cms sobre el nivel de azotea para aislarlo térmicamente de la superficie de hormigón y además permitir el drenaje pluvial natural. La cubierta de doble cara tiene una pendiente del 5% en su cara exterior para desplazar las precipitaciones pluviales.

b. Chimenea Solar (CHS)

Es un elemento constructivamente independiente adosado al cuerpo de la habitación, cuenta con dos aberturas: una inferior llamada Hueco Medio (HM) que conecta con el EH y otra superior llamada Hueco de Salida (HS) que conecta con el exterior, uno de sus cerramientos se compone de carpintería de aluminio y vidrio, su cubierta presenta una inclinación del 5% para los escurrimientos pluviales. La Chimenea Solar se diseñó con un aislamiento interior de EPS que cumple dos funciones: evitar la pérdida de energía térmica por los cerramientos y evitar que está energía incremente la temperatura al interior de la habitación.

3.2.2 Dimensiones

Las cotas utilizadas para el proyecto del Modelo Experimental indican las dimensiones interiores, esto es, no considera el espesor de los cerramientos.

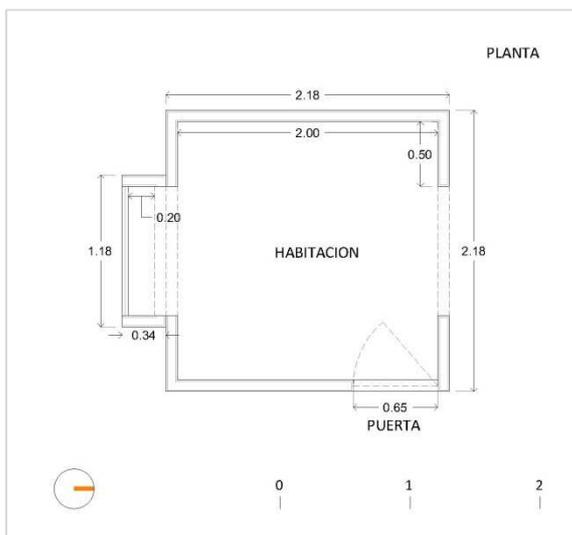


Ilustración 28: Planta arquitectónica del modelo experimental

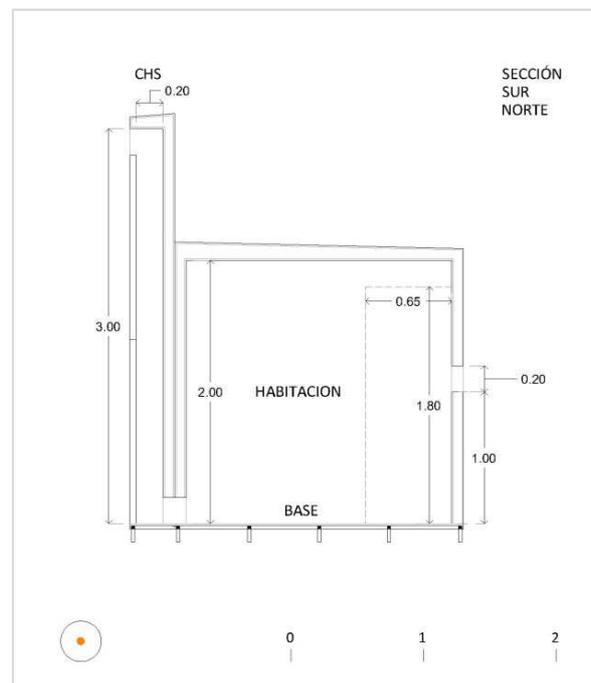


Ilustración 27: Corte longitudinal del modelo experimental

En la Ilustración 28 podemos observar la planta arquitectónica para construcción del modelo, el primer volumen es el Espacio Habitable (EH) de geometría cuadrada; las medidas interiores son de 200 cms x 200 cms, cuenta con una puerta de acceso de 60 cms de ancho orientada hacia el Este, hacia la fachada Norte encontramos una abertura de 100 cms de ancho y en la fachada Sur otra abertura similar con 100 cms de ancho. El segundo volumen es la Chimenea Solar (CHS), de dimensiones más compactas: su planta es de geometría rectangular con unas medidas interiores de 100 cms largo x 20 cms de ancho, siendo uno de los cerramientos más largos el que se encuentra adosado al EH, el cerramiento Sur está conformado por una ventana que cubre toda la superficie, en la cual sólo existe una abertura superior llamada Hueco de Salida (HS). Todos los cerramientos, tanto del EH como de la CHS tienen un espesor de 10 cms.

En la Ilustración 27 está representada la sección arquitectónica del Modelo Experimental, en el volumen del Espacio Habitable (EH) encontramos la misma altura que las dimensiones de su planta, es decir 200 cms, teniendo como resultado un cubo de iguales dimensiones, el piso de este volumen está elevado 10 cms del nivel del suelo sobre una plataforma metálica, la altura de la puerta es igual de 200 cms; existen dos aberturas, la primera es el Hueco de Entrada (HE), orientada hacia el Norte, su altura es de 20 cms y su lecho inferior se encuentra a 100 cms de la altura del piso; la segunda abertura es el Hueco Medio (HM), orientado hacia el Sur, teniendo la misma altura de 20 cms y se encuentra localizada a nivel de piso. El segundo volumen es la Chimenea Solar (CHS), donde la característica principal es su altura de 300 cms, por un ancho de 20 cms, en la parte superior aparece el Hueco de Salida (HS), con una altura de 20 cms y situándose al lecho superior de la CHS, ambos volúmenes se desplantan 10 cms sobre el nivel del suelo. En el volumen de la CHS está representada gráficamente la aplicación de material aislante al interior de los cerramientos.

3.2.3 Materiales

En este apartado se describen los materiales que se utilizan en la construcción del Modelo Experimental (EH), así como sus características generales.

En la Tabla 9 se describen los materiales utilizados en los dos componentes principales del Modelo Experimental, estos datos se encuentran subdivididos en Base, Habitación y Chimenea Solar, que a su vez se dividen en sus diferentes paramentos o cubiertas. El criterio de selección de materiales se fundamenta en la disponibilidad para ser utilizados en diferentes entornos, de tal manera que el experimento pueda ser reproducido en diferentes ámbitos, ya que la principal cualidad de estos materiales es la pre-fabricación e industrialización, permitiendo una alta disponibilidad en el mercado comercial.

Los paquetes constructivos tanto de cerramientos como de cubiertas tienen 8.89 cms de espesor, con excepción del suelo que se compone sólo de una capa de 1.3 cms, así como de la cara sur de la Chimenea Solar que se compone de perfiles de aluminio de 5.0 cms y vidrio de 0.6 cms.

Tabla 9 Configuración de Materiales Constructivos

Elemento	Partes	Materiales	Acabado	Grosor (cms)	
Base	Postes	Niveladores Ajustables	Galvanizado	1	
		PTR Metálico	Negro	2.54	
	Largueros	PTR Metálico	Gris		
		Esmalte Acrílico	Negro	2.54	
Habitación	Suelo	Triplay Pino	Natural	1.5	
		Sellador Nitrocelulosa	Brillante		
	Muros	Pintura vinílica	Blanco		
		Basecoat	Gris		
		Panel Glassrey	Azul	1.25	
		Perfil metálico Cal. 26	Galvanizado	6.35	
	Cubierta	Panel Tablaroca	Pintura vinílica	Gris claro	1.25
			Impermeabilizante acrílico	Blanco	
		Panel Glassrey	Azul	1.25	
		Perfil metálico Cal. 26	Galvanizado	6.35	
		Panel Tablaroca	Gris claro	1.25	
		Pintura vinílica	Blanco		
	Puerta	Lámina Metálica Cal.24	Galvanizado		
	Chimenea Solar	Suelo	Triplay Pino	Natural	1.5
			Pintura Vinílica	Negro	
Muros		Pintura Vinílica	Blanca		
		Basecoat	Gris		
		Panel Glassrey	Azul	1.25	
		Perfil metálico Cal. 26	Galvanizado	6.35	
		Aislante térmico EPS (Interior Perfil)	Blanco	5	
		Panel Permabase	Gris	1.25	
Muro Sur		Basecoat	Gris		
		Pintura Vinílica	Negro		
		Aluminio Natural	Gris mate	5	
		Vidrio plano	Transparente	0.6	
Cubierta		Impermeabilizante acrílico	Basecoat	Blanco	
			Gris		
		Panel Glassrey	Azul	1.25	
		Perfil metálico Cal. 26	Galvanizado	6.35	
	Aislante térmico EPS (Interior Perfil)	Blanco	5		
	Panel Permabase	Gris	1.25		
Cubierta	Basecoat	Gris			
	Pintura Vinílica	Negro	1		

3.2.4 Instrumentos de Medición

Se utilizaron diferentes instrumentos de medición, que nos permiten evaluar el comportamiento de los diferentes fenómenos físicos que intervienen en el flujo de aire al interior de la Habitación (HAB), tales como: velocidad de aire interior, temperatura interior y exterior, velocidad y dirección de aire exterior, humedad relativa, temperatura radiante al interior de la habitación y radiación solar.

Tabla 10 Instrumentos de medición y respaldo

Equipo	Marca	Modelo	Cantidad	Mediciones	Unidades
Estación Meteorológica	Davis	Vantage Pro2	01	Velocidad del viento	m/s
				Dirección del viento	cardinales
				Temperatura	°C
				Humedad Relativa	%
				Radiación solar	W/m2
Anemómetro Térmico	General	CIH-20DL	02	Velocidad del aire	m/s
				Temperatura del aire	°C
				Humedad relativa	%
Medidor Estrés Térmico	Reed	SD-2010	01	Temperatura del aire	°C
				Temperatura radiante	°C
				Humedad relativa	%
Batería de respaldo	Sola Basic	LCD 450	01		W

Estación Meteorológica

Es un sistema completo de monitoreo de las condiciones climáticas, se compone de: consola, módulo de registro de datos, software de descarga y el módulo de sensores. La suite integrada de sensores consta de: anemómetro de tres copas, veleta de dirección de viento, pluviómetro, termo-higrómetro, barómetro y piranómetro.

Anemómetro de Hilo Térmico

Es un instrumento que mide la velocidad y temperatura del aire, consta principalmente de dos elementos: la base portátil y la sonda telescópica. La base portátil incluye un Registrador de Datos con capacidad hasta 20,000 lecturas; la sonda telescópica integra dos sensores: un hilo térmico y un termo-higrómetro.

Medidor de Estrés Térmico

Este instrumento mide la temperatura del aire, humedad relativa, y temperatura radiante mediante un sensor dentro de un globo negro, e integra un Registrador de Datos que almacena la información en una tarjeta de memoria extraíble.

Batería de respaldo

Este equipo tiene dos funciones: regular el voltaje que alimenta a los instrumentos de medición y proveer de energía al sistema en caso de cualquier interrupción.

Las hojas técnicas y descripción de los equipos, así como su período de prueba e instalación es posible revisarlos en el Anexo 2.

3.2.5 Construcción del Modelo Experimental

El proceso de construcción del modelo se divide en las siguientes partes:

- Base
- Cerramiento Habitación
- Cerramiento CHS
- Acabados

Base

El primer paso para la construcción del modelo fue la fabricación de la estructura metálica, hecha con perfiles PTR de 2.54 cms de sección cuadrada, protegida con un primario anticorrosivo color gris, se fabricó en taller y posteriormente se trasladó al sitio de instalación, a esta estructura se le fijaron unas bases con nivelación roscable para absorber las diferencias de pendiente.

Esta estructura se orientó en el eje Norte-Sur con ayuda de una brújula magnética, una vez fijo el punto de ángulo de rotación de la base se ajustaron los niveladores para conseguir una superficie completamente horizontal. El siguiente paso fue la fijación de tres piezas de triplay de pino de 1.5 cms de espesor sobre la estructura metálica, con pijas auto-taladrantes de 3.8 cms de largo, para proteger las láminas se utilizó barniz natural de nitrocelulosa, finalmente se emboquillaron las uniones con sellador acrílico siliconizado.



Figura 4 Nivelación de base metálica de Modelo Experimental. Fuente: Propia del autor.



Figura 5 Colocación de madera contrachapada de pino como suelo de Modelo Experimental. Fuente: Propia del autor.

Cerramientos HAB

La construcción de cerramientos inició con la fabricación del esqueleto interior con perfiles galvanizados, fijando los canales a las placas de triplay siguiendo el perímetro externo de HAB y CHS, continuando con el armado de los marcos de cerramientos de HAB sujetos mediante apuntalamientos provisionales.

Para rigidizar estos marcos se inició con la colocación de los paneles de yeso por la cara interior, inmediatamente después se colocaron los paneles de yeso con fibra de vidrio por la cara exterior, se recortaron los excedentes superiores para fabricar el esqueleto de la cubierta que tendría una pendiente del 5% en su cara exterior para permitir escurrimiento pluvial, de igual forma se colocaron los paneles respectivos en la cubierta.

Se trazaron las aberturas correspondientes para recortar los paneles de yeso y perfilar sus boquillas, teniendo la envolvente construida se calafatearon las juntas con cinta papel aplicando un compuesto para juntas, como acabado constructivo se aplicó de manera uniforme en toda la superficie compuesto Redimix en su interior y compuesto Basecoat en su exterior.



Figura 6 Fabricación de estructura de Modelo Experimental.
Fuente: Propia del autor.



Figura 7 Recorte de paneles de Glassrey para habilitar Huevo de Entrada (HE). Fuente: Propia del autor.

Cerramientos CHS

La estructura de la Chimenea Solar se construyó utilizando como soporte, a la envolvente de la HAB, prácticamente como un elemento adosado, se habilitaron los marcos que conforman la CHS partiendo de los canales sujetos al suelo de paneles de triplay y fijando verticalmente estos marcos a la fachada sur de HAB.

Para rigidizar la estructura se colocaron los paneles de yeso con fibra de vidrio por la parte exterior, con esta envolvente parcial se pudo colocar los paneles de poliestireno expandido de 5.0 cms dentro de todos los cerramientos de CHS, cumpliendo la función de aislante térmico. A continuación se colocaron los paneles de cemento-arena en todas las caras interiores de la CHS, material que funcionará como acumulador de energía térmica, estos paneles se calafatearon con malla de fibra de vidrio y compuesto Basecoat, quedando de esta manera la envolvente terminada.



Figura 9 Colocación de paneles aislantes de EPS en el interior de la Torre (T) de la chimenea solar. Fuente: Propia del autor.



Figura 8 Detalle de colocación de paneles de cemento Permbase en el interior de la Torre (T) de la chimenea solar.

Acabados

La terminación de la etapa constructiva del modelo termina con el sellado y calafateado de todas las juntas. La etapa de acabado final inicia con la aplicación de un primario vinil-acrílico en todas las superficies del Modelo Experimental, de ahí continuamos con la aplicación de pintura vinílica blanca en todos los interiores de la HAB y pintura vinílica negra en todos los interiores de la CHS, para los exteriores se utilizó pintura

vinílica blanca en todas las superficies de ambos volúmenes, excepto en las cubiertas donde se aplicó impermeabilizante acrílico color blanco con una malla de poliéster como refuerzo.

Al término del sellado y pintado del ME se habilitaron los marcos de perfiles de aluminio de 5.0 cms para instalarse en la fachada sur de la CHS, se fijaron con pijas galvanizadas de 3.8 cms y se emboquillaron con silicón transparente, posteriormente se colocaron los vidrios de 0.6 cms de espesor sellados con vinil transparente, con este paso cerramos la envolvente de la CHS permitiendo sólo la salida del aire a través del HS de 20 cms.

Se ajustó el marco metálico de la puerta para fijarlo en la abertura correspondiente, se instaló y niveló la puerta de lámina galvanizada incluyendo la instalación de la cerradura, para evitar infiltraciones mayores se selló la puerta con un atrapa-polvo retráctil y se colocó un burlete de espuma de poliuretano en todo el perímetro de la puerta, logrando una mejor hermeticidad. Por otra parte para evitar el ingreso de precipitación pluvial por capilaridad de los cerramientos al interior de la HAB y la CHS se instalaron goteros de ángulos de aluminio natural en la parte superior de las aberturas y en el extremo inferior de la cubierta.



Figura 10 Vista exterior del Modelo Experimental (ME) con aplicación de color selectivo. Fuente: Propia del autor.



Figura 11 Instalación de vidrio transparente en fachada sur de la chimenea solar. Fuente: Propia del autor.

En este apartado se incluyeron algunas imágenes seleccionadas que ilustren el proceso de construcción del Modelo Experimental. Para mayor documentación ver Anexo 2.

Instrumentación

Se instalaron los instrumentos de medición de la siguiente manera: la estación meteorológica separada 2 mts del Módulo Experimental y los sensores a una altura de 2 mts sobre el nivel de piso terminado; se colocó un anemómetro de hilo térmico al centro de la habitación (HAB) a 1 mt de altura sobre el nivel de suelo; otro anemómetro se instaló al centro del Hueco Medio (HM), es decir a 10 cms del nivel de suelo; por último el monitor de estrés térmico se instaló en el punto HAB a 1 mt de altura del nivel de suelo. Las siguientes imágenes documentan este procedimiento:

En las siguientes imágenes se ilustran los equipos y su instalación:



Figura 13 Instalación de anemómetro en punto HAB del interior de la habitación del Modelo Experimental (ME). Fuente: Propia del autor.



Figura 12 Instrumentos instalados en el interior de la habitación del Modelo Experimental (ME). Fuente: Propia del autor.

Capítulo 4

4 Resultados

Este capítulo contiene los resultados de la investigación, por la estructura de la metodología se dividen en dos partes:

- Resultados de la Simulación Energética.
- Resultados del Modelo Experimental.

Para cada uno de ellos se inicia con un análisis comentado de un parámetro de estudio en el caso de la simulación energética y un mes de estudio para el caso del modelo experimental, posteriormente se desarrolla un análisis general de los parámetros estudiados y del ciclo anual completo, finalizando con una discusión de los resultados.

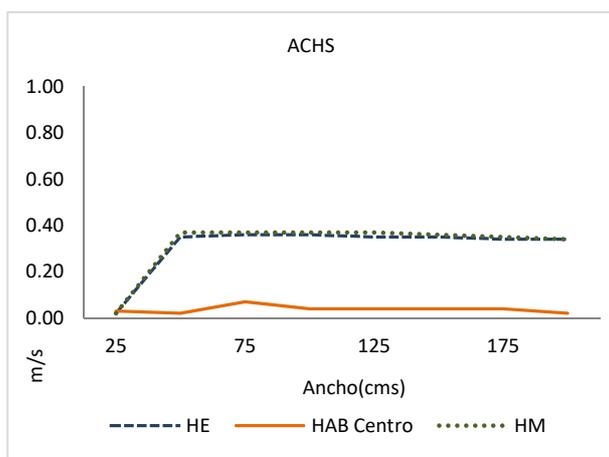
4.1 Resultados de la Simulación Energética

Para evaluar el comportamiento del flujo de aire al modificar cada parámetro, se establecieron tres puntos de cálculo: un primer punto en el hueco de entrada (HE), un segundo punto al centro de la habitación (HAB) y el tercer punto en el hueco medio (HM) que conecta la habitación con la chimenea.

4.1.1 Ancho de Cámara (ACHS)

En este análisis se analiza el comportamiento de la velocidad del aire en la habitación al incrementar progresivamente el Ancho de la Cámara (ACHS) de la Chimenea Solar (CHS), iniciando en 25 cms hasta 200 cms; conservando el espesor de la cámara en 20 cms para todas las configuraciones.

En la Gráfica 4 se observa que la tendencia de comportamiento del punto HE y HM son muy similares, manteniendo una línea horizontal sin cambios notables, con un ligero descenso en las configuraciones mayores de ACHS, con excepción de la configuración ACHS 25 que presenta una caída en la velocidad del aire muy pronunciada. La tendencia de comportamiento en el punto HAB se mantiene de igual forma horizontal uniforme, con un ligero incremento en la configuración ACHS 75, aunque coincide en registrar su velocidad de aire más baja en la configuración ACHS 25.



Gráfica 4 Resultados de la serie de simulaciones de Ancho de Chimenea Solar (ACHS). Fuente: Elaboración propia.

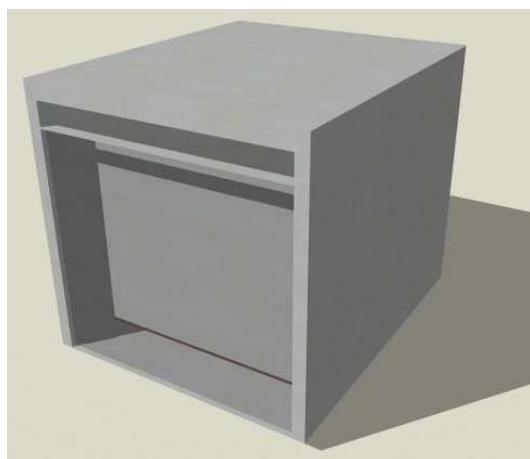


Ilustración 29 Render del modelo utilizado en la serie ACHS200. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 11 muestra que al reducir el Ancho de Cámara a 25 cms la velocidad del aire disminuye notablemente en los tres puntos de cálculo, en 94% en el punto HE, un 25% en HAB y 95% en HM, registrando valores de muy baja velocidad de aire: 0.02 m/s. A partir de la configuración ACHS 50 y hasta ACHS 200 los valores de cálculo se mantienen en el rango de 0.34 m/s a 0.36 m/s en el punto HE, lo cual representa una variación del 6%; en el punto HAB la velocidad del aire continúa registrando valores bajos, 0.02m/s a 0.07 m/s, siendo éste último valor el correspondiente a la configuración ACHS 75, equivalente a un 75% de incremento respecto al MBS. En el punto HM los valores son muy similares a los calculados en HE, aunque ligeramente más altos.

Código	Fecha	Hora				
Ancho de Cámara (ACHS)	9 Enero 2002	14:00:00				
Velocidad de aire						
Ancho	HE	Variación MBS	HAB Centro	Variación MBS	HM	Variación MBS
cms	m/s	%	m/s	%	m/s	%
25	0.02	-94	0.03	-25	0.02	-95
50	0.35	-3	0.02	-50	0.37	0
75	0.36	0	0.07	75	0.37	0
100 MBS	0.36	0	0.04	0	0.37	0
125	0.35	-3	0.04	0	0.37	0
150	0.35	-3	0.04	0	0.36	-3
175	0.34	-6	0.04	0	0.35	-5
200	0.34	-6	0.02	-50	0.34	-8

Tabla 11 Resultados de serie de simulaciones para ACHS. Fuente: Propia del autor.

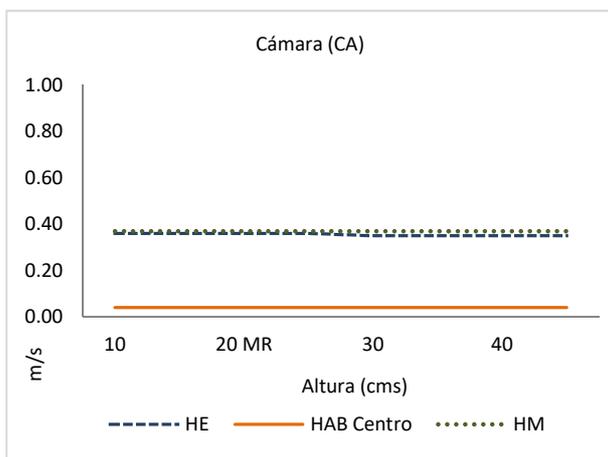
.A partir de estos datos se exponen las siguientes observaciones:

1. Aumentar el Ancho de Cámara (ACHS) no incrementa la velocidad del aire en ningún punto de cálculo: Huevo de Entrada (HE), Habitación (HAB) o Huevo Medio (HM).
2. La relación espesor de cámara por ancho de cámara que produce una mayor velocidad de aire en HE fluctúa de 1:4 a 1:5
3. Al incrementar el Ancho de Cámara (ACHS) no incrementa la velocidad de aire, pero se mantiene constante en todos los puntos en el sentido horizontal a lo largo de los huecos HE y HM.

4.1.2 Cámara (CA)

El análisis del impacto en la velocidad de aire interior al modificar los espesores de la cámara (CA) se diseñó incrementando el espesor de la cámara a partir de 10 cms hasta 45 cms en intervalos de 5 cms; manteniendo el mismo ancho de cámara de 100 cms en todos los casos.

En la Gráfica 5 se observa un comportamiento de tendencia horizontal en los tres puntos de cálculo, es decir, para todos los casos presentan una velocidad constante con ligeras variaciones en la velocidad de aire del punto HE.



Gráfica 5 Resultado de la serie de simulaciones de Cámara (CA). Fuente: Elaboración propia

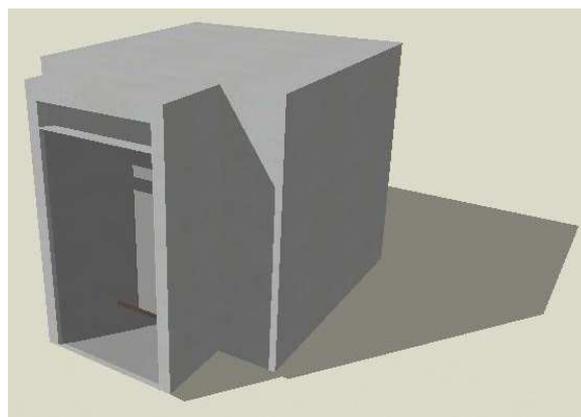


Ilustración 30 Render del modelo de simulación CA60. Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos en la Tabla 12 oscilan entre 0.35 y 0.36 m/s en el punto de cálculo HE; en el punto HAB se muestra una velocidad constante de 0.04 m/s en todos los casos, esta velocidad es considerada un viento en calma; y en el punto HM la velocidad del aire es de 0.37 m/s, constante en todos los casos. Es decir, la velocidad del aire en HE tiene una variación del 3% en algunos casos con respecto al Modelo Base para Simulación (CA20); y mientras que los puntos HM y HAB presentan una nula variación.

Código	Fecha	Hora				
Cámara (CA)	9 Enero 2002	14:00:00				
Espesor cms	Velocidad de aire					
	HE m/s	Variación MBS %	HAB Centro m/s	Variación MBS %	HM m/s	Variación MBS %
10	0.36	0	0.04	0	0.37	0
15	0.36	0	0.04	0	0.37	0
20 MBS	0.36	0	0.04	0	0.37	0
25	0.36	0	0.04	0	0.37	0
30	0.35	-3	0.04	0	0.37	0
35	0.35	-3	0.04	0	0.37	0
40	0.35	-3	0.04	0	0.37	0
45	0.35	-3	0.04	0	0.37	0

Tabla 12 Resultados de la series de simulaciones para CA. Fuente: P.A.

A partir de estos datos exponemos las siguientes observaciones:

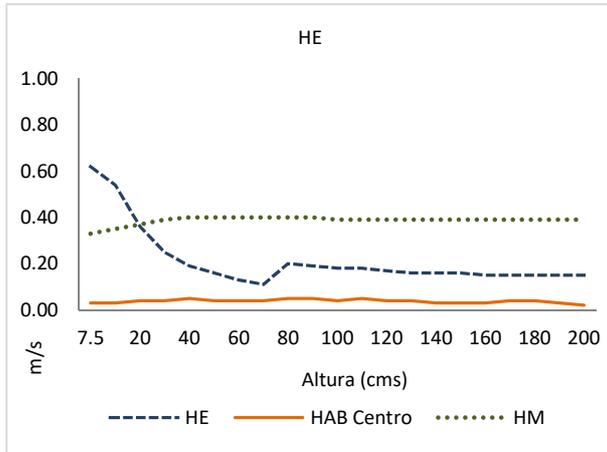
1. Incrementar o reducir el espesor de CA no produce ninguna modificación en la velocidad de aire de HAB y de HM.
2. La variación en la velocidad de aire de HE es ligeramente descendente, producido posiblemente por una circunstancia de cálculo.

4.1.3 Hueco de Entrada (HE)

Este análisis consiste en modificar la altura del Hueco de Entrada (HE), realizando una serie de simulaciones incrementando la altura de HE en 10 cms por etapa, iniciando con 10 cms hasta 200 cms; conservando el ancho de cámara de 100 cms y el espesor de la cámara en 20 cms.

La Gráfica 6 muestra como la tendencia de comportamiento del aire en HE inicia con una velocidad sustancialmente mayor al MBS y gradualmente sufre un descenso hasta estabilizarse horizontalmente a partir de la configuración HE70. El comportamiento de

HAB es estable, horizontal, presentando variaciones menores. Por otra parte, la tendencia en HM es de un perfil horizontal continuo, salvo en las configuraciones iniciales HE7,5 y HE10 donde la curva se encuentra por debajo del MBS.



Gráfica 6 Resultados de la serie de simulaciones de Huevo de Entrada (HE). Fuente: Elaboración propia.

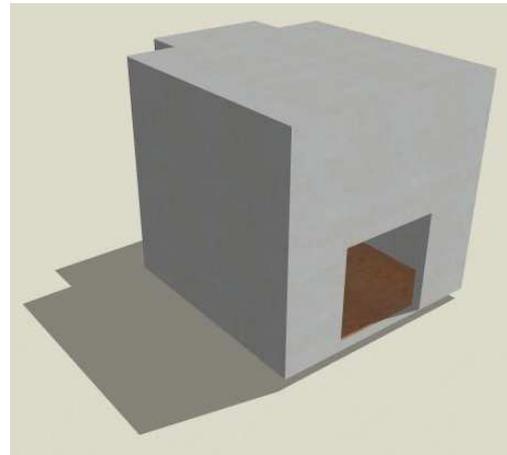


Ilustración 31 Render del Modelo Experimental (ME) en la configuración HE100. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 13 se observa que en el punto HE del Modelo Base para Simulación HE20 la velocidad del aire es 0.36 m/s, incrementándose hasta un 72% (0.62 m/s) en la configuración HE075 y decayendo hasta un 69% (0.11 m/s) en la configuración HE70; a diferencia de otros casos de análisis, los valores del punto de cálculo HM difieren de los calculados en HE, teniendo un incremento sólo del 8% (0.40 m/s) en la configuración HE40 y decayendo un 11% (0.33 m/s) en la configuración HE075. En el punto de cálculo HAB el rango de velocidad oscila entre 0.02 m/s y 0.05 m/s y en varios casos la variación respecto al MBS es nula.

Código	Fecha	Hora					
Huevo de Entrada (HE)	9 Enero 2002	14:00:00					
Altura cms	Velocidad de aire						
	HE m/s	Variación MBS %	HAB Centro m/s	Variación MBS %	HM m/s	Variación MBS %	
7.5	0.62	72	0.03	-25	0.33	-11	
10	0.54	50	0.03	-25	0.35	-5	
20	0.36	0	0.04	0	0.37	0	
30	0.25	-31	0.04	0	0.39	5	
40	0.19	-47	0.05	25	0.40	8	
50	0.16	-56	0.04	0	0.40	8	
60	0.13	-64	0.04	0	0.40	8	
70	0.11	-69	0.04	0	0.40	8	
80	0.20	-44	0.05	25	0.40	8	
90	0.19	-47	0.05	25	0.40	8	
100	0.18	-50	0.04	0	0.39	5	
110	0.18	-50	0.05	25	0.39	5	
120	0.17	-53	0.04	0	0.39	5	
130	0.16	-56	0.04	0	0.39	5	
140	0.16	-56	0.03	-25	0.39	5	
150	0.16	-56	0.03	-25	0.39	5	
160	0.15	-58	0.03	-25	0.39	5	
170	0.15	-58	0.04	0	0.39	5	
180	0.15	-58	0.04	0	0.39	5	

190	0.15	-58	0.03	-25	0.39	5
200	0.15	-58	0.02	-50	0.39	5

Tabla 13 Resultados de las series de simulaciones para HE. Fuente: P.A.

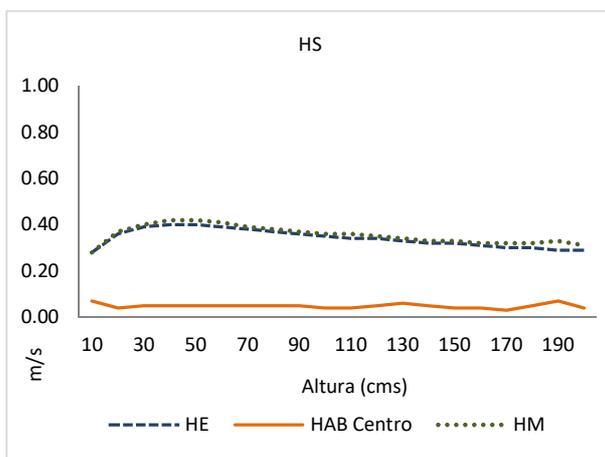
A partir de estos datos se exponen las siguientes observaciones:

1. Reducir la altura de HE aumenta la velocidad del aire proporcionalmente a esta reducción, es decir, el flujo de aire se mantiene constante, pero al ingresar por una sección de HE menor, sufre una compensación a través de la velocidad de aire entrante.
2. El incremento de la velocidad en HE no produce ningún efecto en el comportamiento de la velocidad de aire en HAB ni en HM.
3. La velocidad del aire en HE se estabiliza a partir de HE100, el flujo de aire se mantiene constante hacia el interior de la habitación, pero cuando la sección de HE se incrementa hasta un punto donde existan diferencias de presión, entonces permite un flujo inverso de salida de aire por la parte superior de HE.

4.1.4 Hueco de Salida (HS)

El análisis consiste en modificar la altura del Hueco de Salida (HS), realizando una serie de simulaciones incrementando la altura de HS en 10 cms por etapa, iniciando en 10 cms hasta 200 cms; conservando el ancho de cámara de 100 cms y el espesor de la cámara en 20 cms.

En la Gráfica 7 se observa una tendencia de comportamiento horizontal para los tres puntos de cálculo, es decir, con pocas variaciones, excepto en el caso de la serie de datos para HE y HM, que sugieren un incremento de velocidad respecto al MBS en el rango HS30 a HS 80, y por otra parte, en el punto HAB la velocidad de aire sufre un ligero incremento en HS10 y HS190. En otros puntos la tendencia es muy estable.



Gráfica 7 Resultados de la serie de simulaciones de Hueco de Salida (HS). Fuente: Elaboración propia.

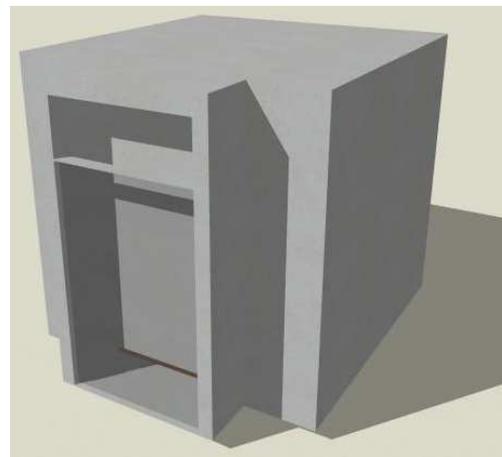


Ilustración 32 Render del Modelo Experimental (ME) en la configuración HS40. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 14 se observa que la velocidad de aire en HE oscila de 0.28 m/s hasta 0.40 m/s, el límite bajo se localiza al reducir la altura de HS, al aumentar la altura de HS las velocidades de aire se incrementan hasta un 11% respecto al MBS en las configuraciones de HS40 y HS50; en el punto de cálculo HM las velocidades de aire presentan un comportamiento similar a HE salvo que los valores se incrementan hasta un 14% en las mismas configuraciones mencionadas. En el punto HAB la velocidad de aire oscila entre 0.04 m/s a 0.07 m/s, aparentemente los incrementos y decrementos en porcentaje son más consistentes que en los otros puntos, pero al presentar valores bajos las diferencias son inadvertidas.

Código	Fecha	Hora					
Hueco de Salida (HS)	9 Enero 2002	14:00:00					
Altura cms	Velocidad de aire						
	HE m/s	Variación MBS %	HAB Centro m/s	Variación MBS %	HM m/s	Variación MBS %	
10	0.28	-22	0.07	75	0.28	-24	
20 MBS	0.36	0	0.04	0	0.37	0	
30	0.39	8	0.05	25	0.40	8	
40	0.40	11	0.05	25	0.42	14	
50	0.40	11	0.05	25	0.42	14	
60	0.39	8	0.05	25	0.41	11	
70	0.38	6	0.05	25	0.39	5	
80	0.37	3	0.05	25	0.38	3	
90	0.36	0	0.05	25	0.37	0	
100	0.35	-3	0.04	0	0.36	-3	
110	0.34	-6	0.04	0	0.36	-3	
120	0.34	-6	0.05	25	0.35	-5	
130	0.33	-8	0.06	50	0.34	-8	
140	0.32	-11	0.05	25	0.33	-11	
150	0.32	-11	0.04	0	0.33	-11	
160	0.31	-14	0.04	0	0.32	-14	
170	0.30	-17	0.03	-25	0.32	-14	
180	0.30	-17	0.05	25	0.32	-14	
190	0.29	-19	0.07	75	0.33	-11	
200	0.29	-19	0.04	0	0.31	-16	

Tabla 14 Resultados de las series de simulaciones en HS. Fuente: P.A.

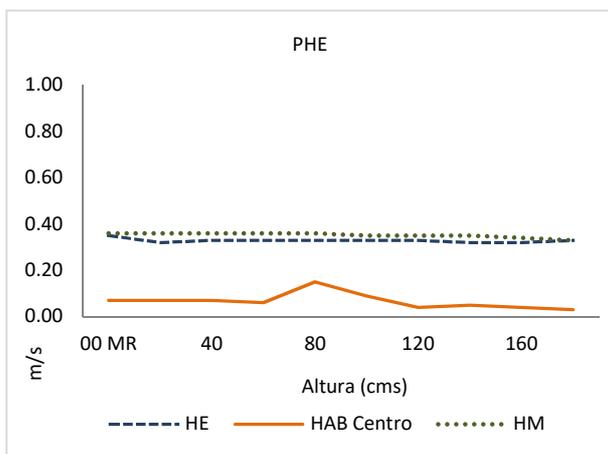
A partir de estos datos se exponen las siguientes observaciones:

1. Incrementar o reducir el HS no incide significativamente en la velocidad de aire calculada en el punto HAB.
2. Reducir el HS con respecto al HE reduce la velocidad de aire en HE y HM.
3. Al aumentar la altura de HS se produce un incremento de la velocidad de aire en HE Y HM en las configuraciones donde HS es menor al 50% de la altura de T, después de ese límite la velocidad de aire empieza a decrecer gradualmente.

4.1.5 Posición Hueco de Entrada (PHE)

El análisis consiste en modificar la posición vertical del Hueco de Entrada (HE), realizando una serie de simulaciones incrementando la altura de la Posición del Hueco de Entrada (PHE) en 20 cms por etapa, iniciando en 0 cms hasta 180 cms; conservando la sección original de la abertura de 100 cms de ancho por 20 cms de alto.

En la Gráfica 8 se observa como la tendencia de comportamiento del punto HE es constante en todas las configuraciones, acusando un ligero descenso en la velocidad del aire a partir de que el PHE se encuentra a una altura mayor al HM. En el punto HAB la tendencia es uniforme en las configuraciones menores a PHE80, en este punto la curva presenta un marcado incremento que indica un aumento en la velocidad del aire, posteriormente se reduce a velocidades, incluso, inferiores al MBS. La tendencia en el punto HM se considera constante en todas las configuraciones.



Gráfica 8 Resultado de la serie de simulaciones para Posición Huevo de Entrada (PHE). Fuente: Elaboración propia.

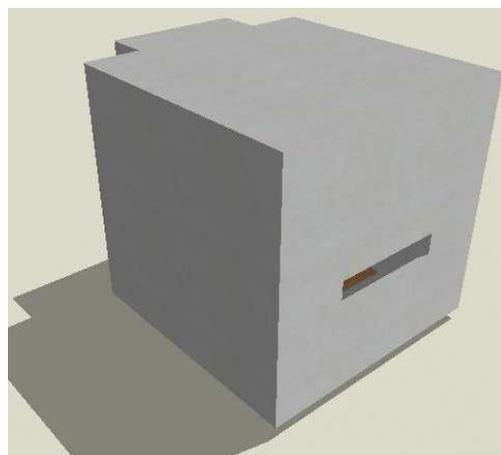


Ilustración 33 Render del Modelo Experimental (ME) para la serie PHE80. Fuente: Elaboración propia.

En Tabla 15 observamos que el rango de velocidad de aire en HE presenta poca variación, con valores inferiores al MBS (0.35m/s) hasta un 9%. En el punto HAB la máxima velocidad de aire (0.15 m/s) se calcula para la configuración PHE80, debajo de esta configuración no presenta cambios respecto al MBS, aunque en las configuraciones superiores la velocidad va decreciendo hasta llegar a la mínima velocidad de 0.03 m/s. En el punto HM la velocidad de aire se mantiene constante en 0.36 m/s hasta la configuración PHE80, a partir de ahí muestra un descenso no mayor al 8%.

Código	Fecha	Velocidad de aire		Velocidad de aire		Velocidad de aire	
Posición Huevo de Entrada (PHE)	9 Enero 2002	HE	Variación MBS	HAB Centro	Variación MBS	HM	Variación MBS
		m/s	%	m/s	%	m/s	%
00 MBS		0.35	0	0.07	0	0.36	0
20		0.32	-9	0.07	0	0.36	0
40		0.33	-6	0.07	0	0.36	0
60		0.33	-6	0.06	-14	0.36	0
80		0.33	-6	0.15	114	0.36	0
100		0.33	-6	0.09	29	0.35	-3
120		0.33	-6	0.04	-43	0.35	-3
140		0.32	-9	0.05	-29	0.35	-3
160		0.32	-9	0.04	-43	0.34	-6
180		0.33	-6	0.03	-57	0.33	-8

Tabla 15 Resultados de las series de simulaciones para PHE. Fuente: P.A.

A partir de estos datos se exponen las siguientes observaciones:

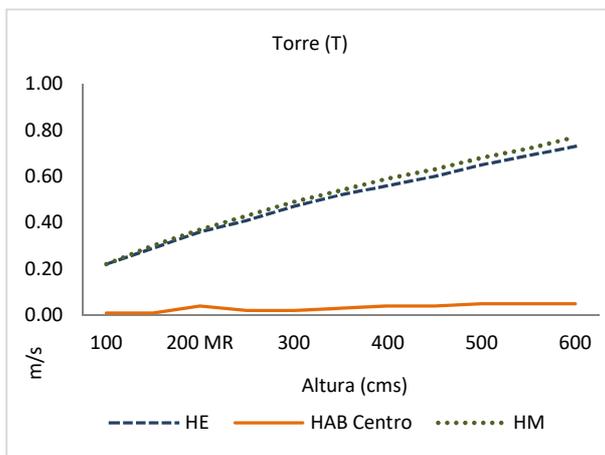
1. La máxima velocidad del aire calculada para HAB se encuentra en la configuración donde la posición de HE coincide con el punto HAB.

2. Modificar la posición del HE no produce cambios sustanciales en la velocidad de HE.
3. La máxima velocidad de aire se produce cuando el HE coincide con la posición del HM, siendo esta la trayectoria más corta y lineal.

4.1.6 Torre (T)

El análisis de la Torre (T) de la chimenea solar fue diseñado incrementando su altura en 50 cms a partir de 100 cms hasta 600 cms, conservando en todos los casos el ancho interior de 100 cms y un espesor de cámara (CA) de 20 cms. Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

En la Gráfica 9 se observa que el incremento de la altura de T produce un aumento gradual en la velocidad de aire en HE y HM, presentando una tendencia ascendente ligeramente amortiguada, es decir, no directamente proporcional al incremento de T. Por otra parte, la curva de comportamiento de la velocidad de aire en HAB presenta una tendencia horizontal, es decir, no presenta modificaciones sustanciales.



Gráfica 9 Resultados de la serie de simulaciones de Torre (T).
Fuente: Elaboración propia.

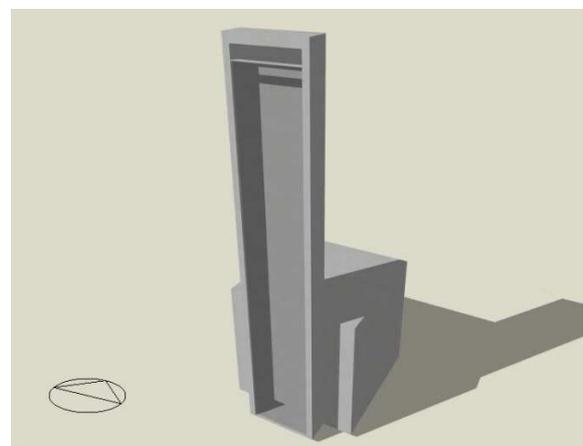


Ilustración 34 Render del Modelo Experimental (ME) para la serie T600. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 16, los datos obtenidos de la serie de simulaciones oscilan de 0.22 m/s hasta 0.73 m/s en el hueco de entrada (HE), con valores muy similares en el hueco medio (HM); y los valores en el centro de la habitación (HAB) no presentan cambios significativos, oscilando entre 0.01 m/s hasta 0.05 m/s, lo cual puede considerarse un viento en calma.

Código	Fecha	Hora					
Torre (T)	9 Enero 2002	14:00:00					
Altura	HE	Velocidad de aire					
		HAB		HM		Variación MBS	
cms	m/s	m/s	%	m/s	%	m/s	%
100	0.22	0.01	-75	0.22	-41		
150	0.29	0.01	-75	0.30	-19		
200 MBS	0.36	0.04	0	0.37	0		
250	0.41	0.02	-50	0.43	16		
300	0.47	0.02	-50	0.49	32		
350	0.52	0.03	-25	0.54	46		

400	0.56	56	0.04	0	0.59	59
450	0.60	67	0.04	0	0.63	70
500	0.65	81	0.05	25	0.68	84
550	0.69	92	0.05	25	0.72	95
600	0.73	103	0.05	25	0.77	108

Tabla 16 Resultados del cálculo de las series de simulación para Torre (T). Fuente: Propia del autor.

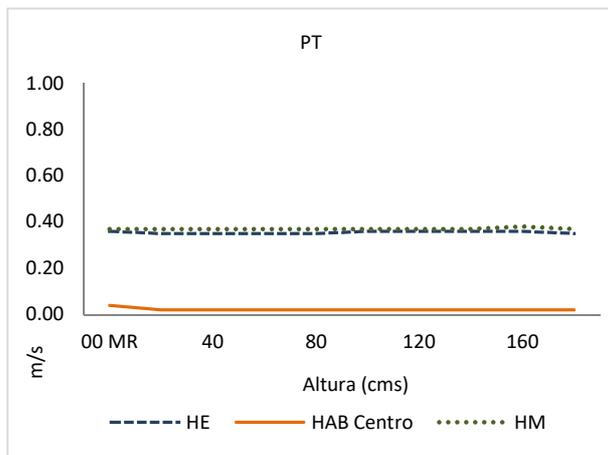
A partir de estos datos se exponen los siguientes comentarios:

1. El incremento de la altura de T (Torre) incide directamente en la velocidad de aire en HE, obteniendo valores superiores al 100% en la configuración de T600, respecto al MBS.
2. Incrementar la altura de T (Torre) no incide significativamente en la velocidad de aire de HAB, al encontrarse este punto a una altura diferente del HE y del HM.
3. Al incrementar la altura de T (Torre) el flujo de aire es cada vez más laminar, por lo que el impacto en las capas superiores de la habitación es muy bajo.

4.1.7 Posición de Torre (PT)

El análisis del impacto en la velocidad del aire interior al modificar la posición de la torre se diseñó realizando una serie de simulaciones incrementando gradualmente en 20 cms la altura de la posición de la torre en el eje vertical; conservando el ancho de cámara de 100 cms y el espesor de la cámara en 20 cms.

En la Gráfica 10 se aprecia una tendencia horizontal en todos los puntos de cálculo, es decir, no sufren modificaciones importantes a lo largo de la serie de simulaciones, por otra parte, las líneas de comportamiento de HE y HM se mantienen por encima de HAB, con valores superiores en todos los casos.



Gráfica 10 Resultados de la serie de simulaciones de Posición Torre (PT). Fuente: Elaboración propia.

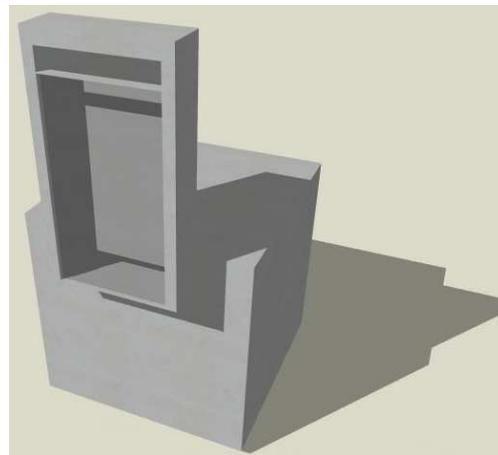


Ilustración 35 Render del Modelo Experimental (ME) para la serie PT160.

En la Tabla 17 podemos observar que los valores calculados en el punto HE presentan una mínima variación respecto al MBS, alternando entre 0.35 m/s y 0.36 m/s; en el punto HM los valores conservan características similares, tanto en velocidad de aire como el comportamiento sin cambios significativos, con valores de 0.37 m/s en la serie de simulaciones. En el punto de cálculo HAB se aprecia un decremento del 50% en la velocidad de aire partiendo de un 0.04 m/s del MBS y descendiendo a 0.02 m/s en todos los demás casos.

Código	Fecha	Hora					
Posición Torre (PT)	9 Enero 2002	14:00:00					
Altura cms	Velocidad de aire						
	HE m/s	Variación MBS %	HAB Centro m/s	Variación MBS %	HM m/s	Variación MBS %	
00 MBS	0.36	3	0.04	0	0.37	0	
20	0.35	0	0.02	-50	0.37	0	
40	0.35	0	0.02	-50	0.37	0	
60	0.35	0	0.02	-50	0.37	0	
80	0.35	0	0.02	-50	0.37	0	
100	0.36	3	0.02	-50	0.37	0	
120	0.36	3	0.02	-50	0.37	0	
140	0.36	3	0.02	-50	0.37	0	
160	0.36	3	0.02	-50	0.38	3	
180	0.35	0	0.02	-50	0.37	0	

Tabla 17 Resultados de las series de simulaciones para PT. Fuente: P.A.

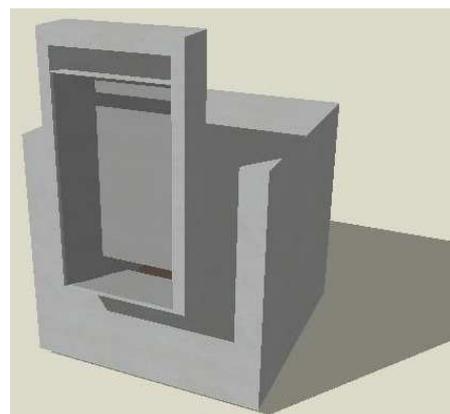
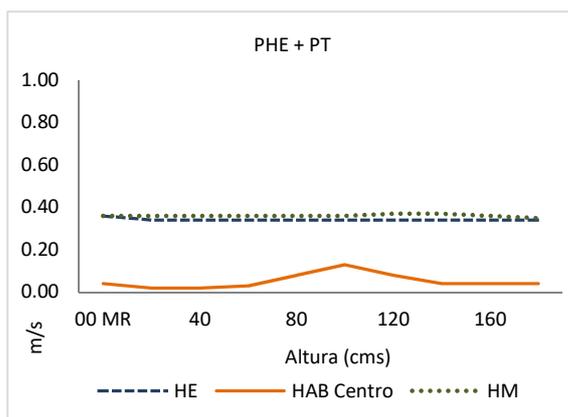
A partir de estos datos se exponen las siguientes observaciones:

1. Incrementar la Posición de la Torre (PT) no produce modificaciones sustanciales en la velocidad de aire interior.
2. La máxima velocidad de aire en el punto HAB se produce en la configuración PT00, destacando que la situación de los puntos HE y HM se encuentran en el mismo eje horizontal permitiendo un flujo más continuo.
3. El punto de cálculo HAB presenta valores muy bajos de velocidad de aire, incluso en la configuración PT80 que hace coincidir el punto HM con HAB no presenta variación alguna, es posible inferir que el flujo de aire se distribuye en el contorno de la envolvente y no en el centro de la habitación.

4.1.8 Posición Hueco de Entrada + Posición Torre (PHE+PT)

Para esta serie de simulaciones se modificó la posición en el eje vertical del Hueco de Entrada (HE) y de la Torre (T), incrementando simultáneamente la altura de la PHE y la PT en 20 cms por etapa, iniciando en 0 cms hasta 180 cms.

En la gráfica 1 observamos que en el punto de cálculo HE la tendencia de comportamiento es constante y horizontal, con un ligero descenso del 6% en las configuraciones distintas al MBS; en el caso del HM la tendencia es similar: constante y horizontal, incrementándose ligeramente en un 3% a partir de PHE120 PT120. En el caso del punto HAB la tendencia es horizontal sin grandes cambios hasta la configuración PHE100 PT100 donde encontramos un incremento significativo, a partir de la siguiente configuración la curva vuelve a disminuir pero con valores ligeramente superiores a los iniciales.



En la Tabla 18 se observa que en el punto de cálculo HE la velocidad de aire presenta dos valores: 0.36 m/s y 0.34 m/s en las configuraciones distintas al MBS; en el punto HAB la velocidad de aire oscila entre 0.02 m/s a 0.04 m/s excepto en la configuración PHE100 PT100 donde la velocidad se incrementa en un **225%** en relación al MBS, es decir 0.13m/s; en el punto HM la velocidad fluctúa entre 0.35 m/s a 0.37m/s, presentando la mayor velocidad en las configuraciones a 120 y 140 cms de altura, y la mínima velocidad en la configuración de mayor altura PHE180 PT180.

Código		Fecha				Hora	
Posición Hueco de Entrada + Posición Torre (PHE+PT)		9 Enero 2002				14:00:00	
Velocidad de aire							
Altura cms	HE	Variación MBS	HAB Centro	Variación MBS	HM	Variación MBS	
	m/s	%	m/s	%	m/s	%	
00 MBS	0.36	0	0.04	0	0.36	0	
20	0.34	-6	0.02	-50	0.36	0	
40	0.34	-6	0.02	-50	0.36	0	
60	0.34	-6	0.03	-25	0.36	0	
80	0.34	-6	0.08	100	0.36	0	
100	0.34	-6	0.13	225	0.36	0	
120	0.34	-6	0.08	100	0.37	3	
140	0.34	-6	0.04	0	0.37	3	
160	0.34	-6	0.04	0	0.36	0	
180	0.34	-6	0.04	0	0.35	-3	

Tabla 18 Resultados de las series de simulaciones para PHE+PT. Fuente: P.A.

A partir de estos datos exponemos las siguientes observaciones:

1. Desplazar el HE y la T simultáneamente en su eje vertical no produce modificaciones significativas en la velocidad de aire calculado para los puntos HE y HM.
2. La velocidad de HE más alta se genera en la posición del MBS, debido posiblemente a la contención natural superficial del suelo, evitando la dispersión del flujo de aire.
3. La mayor velocidad de aire en HAB se registra en PHE100 PT100, siendo esta altura coincidente con la altura del punto de cálculo (Efecto de alineamiento entre la entrada, punto de cálculo y salida de flujo).

4.1.9 Selección de Variables de Impacto

En este apartado se evalúan las diferentes variables que intervienen en el comportamiento de la velocidad del aire en la chimenea solar, obteniendo esta información a partir de los datos revisados previamente. Para este efecto, se propone un método de evaluación basado en tasas de porcentaje de variación sobre la velocidad del aire en los tres puntos de cálculo Hueco de Entrada (HE), Habitación (HAB) y Hueco Medio (HM), del Modelo Base para Simulación (MBS); para poder discriminar la variable o conjunto de variables que impactan en el desempeño de la chimenea solar.

Código	Fecha		Hora				
Evaluación Impacto (EI)	9 Enero		14:00:00				
Parámetros	Puntos de Cálculo						
	HE		HAB		HM		
	Impacto	Variación MBS %	Impacto	Variación MBS %	Impacto	Variación MBS %	
ACHS	Nulo	0	Medio	75	Nulo	0	
CA	Nulo	0	Nulo	0	Nulo	0	
HE	Medio	72	Bajo	25	Bajo	8	
HS	Bajo	11	Medio	75	Bajo	14	
PHE	Nulo	0	Alto	275	Nulo	0	
T	Alto	103	Bajo	25	Alto	108	
PT	Nulo	0	Nulo	0	Bajo	3	
PHE PT	Nulo	0	Alto	225	Nulo	0	

Tabla 19 Evaluación de impacto de los parámetros resultado de las series de simulación. Fuente: Propia del autor.

Siguiendo ésta dinámica, se observa en la Tabla 19 las diferentes variables y porcentajes de variación, identificados con una gradación de color, siendo los más intensos los que registran mayor impacto, así como una nomenclatura que nos permite identificar cuáles son las variables que inciden en la velocidad del aire en los diferentes puntos, ésta nomenclatura se divide en: nulo, bajo, medio y alto impacto.

Destaca que en la tabla general aparece una gran cantidad de valores nulos, es decir, no registran ninguna variación en el comportamiento de la velocidad del aire con respecto al MBS, y adicionalmente, es posible inferir que existen algunas variables que inciden de forma relativamente baja en estos puntos. Por otra parte, existen variables que de forma explícita incrementan la velocidad del aire, en algunos casos coincide la misma variable y en otro caso, sólo una variable de toda la serie genera un cambio sustancial.

En el punto de cálculo HE hay dos variables que impactan directamente en la velocidad del aire, el más importante es T con un incremento del 103% en la configuración T600, como ya se ha comentado a mayor altura de la torre mayor incremento en la velocidad. El segundo punto es HE donde el incremento alcanza un 72% en la configuración HE075, aunque es importante mencionar que este incremento sólo se registra en el punto HE, resultado de un ajuste en la ecuación del flujo de aire, donde se compensa la reducción del área de ingreso del flujo con un incremento en la velocidad.

En el punto de cálculo HAB se encuentran dos variables muy similares que impactan en la velocidad del aire: PHE con un 275% de incremento en la configuración PHE80, y PHE PT con un incremento del 225% en la configuración PHE PT100, siendo éstas dos variables similares en coincidir con la altura del punto de cálculo HAB.

El punto de cálculo HM presenta un comportamiento similar al punto HE, registrando un incremento del 108% al modificar la variable T, específicamente en la configuración T600, que en este caso, representa la configuración más alta par esta serie de simulaciones; a diferencia de los valores registrados en el punto HE, no existe otra variable que sustancialmente impacte en el desempeño de la velocidad del aire en el punto HM.

Para efectos de esta investigación, en un principio, se designó el punto HAB como el valor de referencia para evaluar el impacto de las diferentes variables que intervienen en el sistema de la chimenea solar; ahora bien, para ampliar el criterio de estudio se establecieron dos puntos de cálculo adicionales con el objetivo de analizar el comportamiento del flujo del aire en la trayectoria por la habitación.

A raíz de la discusión de resultados previamente comentada se establece lo siguiente:

1. Los parámetros más importantes que aportan incremento en la velocidad del aire durante el recorrido a través de la habitación son Torre (T) y Posición Hueco de Entrada (PHE), razón por la cual se realiza una siguiente serie de simulaciones combinando estos dos parámetros para analizar su desempeño.

4.1.10 Evaluación de Variables

Esta etapa consiste en evaluar comparativamente el impacto en la velocidad del aire para los diferentes parámetros estudiados, en sus respectivas series de simulaciones, en función de la máxima velocidad de aire registrada en cada uno de los tres puntos de cálculo Hueco de Entrada (HE), Habitación (HAB) y Hueco Medio (HM).

El punto de partida para esta evaluación se toma de los valores iniciales del Modelo Base para Simulación (MBS), para de ahí establecer un factor de impacto, y poder determinar cuáles son los parámetros que inciden sustancialmente en el incremento de la velocidad del aire.

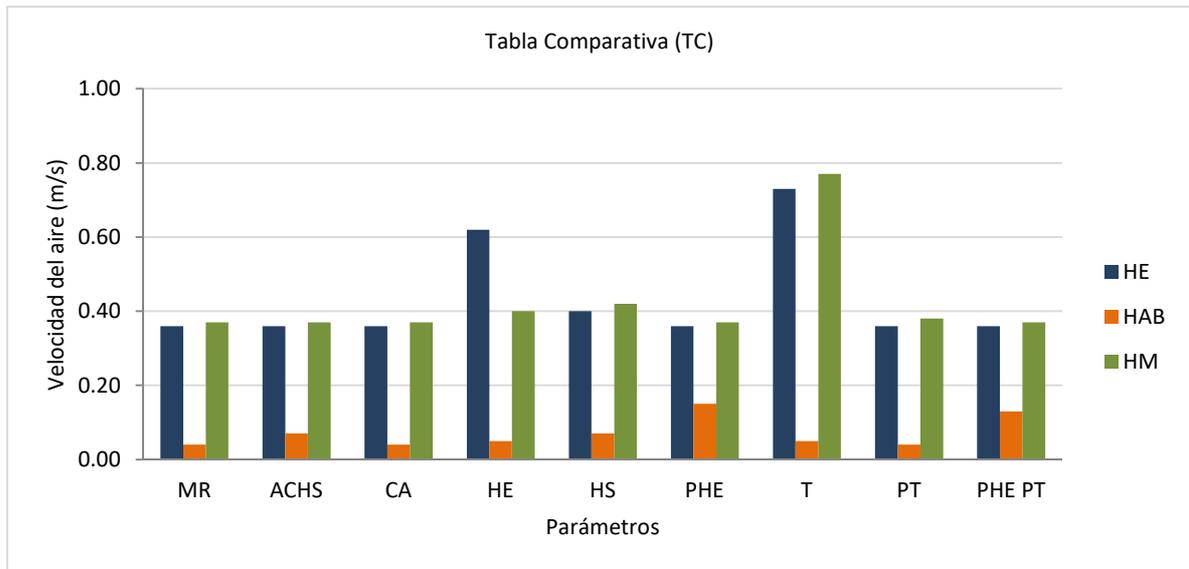
A continuación se analizan las máximas velocidades de aire calculadas en las distintas series de simulaciones, en la Tabla 20 se muestra que existen una gran cantidad de variables que mantienen velocidades cercanas a los valores de referencia, incluso considerando que éstas son las velocidades máximas de cada serie. Por otra parte, existen casos donde el incremento es considerable aunque no coincidan para los tres puntos de cálculo.

Código	Fecha	Hora				
Tabla Comparativa (TC)	9 Enero 2002	14:00:00				
Parámetros	Velocidad de aire					
	HE m/s	Variación MBS %	HAB m/s	Variación MBS %	HM m/s	Variación MBS %
MBS	0.36		0.04		0.37	
ACHS	0.36	0	0.07	75	0.37	0
CA	0.36	0	0.04	0	0.37	0
HE	0.62	72	0.05	25	0.40	8
HS	0.40	11	0.07	75	0.42	14
PHE	0.36	0	0.15	275	0.37	0
T	0.73	103	0.05	25	0.77	108
PT	0.36	0	0.04	0	0.38	3
PHE PT	0.36	0	0.13	225	0.37	0

Tabla 20 Resumen comparativo de las máximas velocidades calculadas en las series de simulación. Fuente: Propia del autor.

En el punto de cálculo HE la velocidad máxima calculada se registró en 0.73 m/s en la serie de simulaciones de T, la subsecuente velocidad se calculó en 0.62 m/s, las demás variables presentan cambios menores a un 10% respecto al MBS. Para el punto HAB, que calcula la velocidad del flujo de aire a la altura del usuario, las simulaciones calculan la velocidad más alta para PHE en 0.15 m/s, es decir, un 275% sobre el MBS, en orden de importancia, la siguiente velocidad es PHE PT con 0.13 m/s, equivalente a un 225% en relación al MBS. Por último, en el punto de cálculo HM aparece sólo una variable que incide en la velocidad del aire, esta es T con un valor de 0.77 m/s, coincidiendo con el resultado previamente obtenido en la revisión de HE, este incremento aporta un 108% de velocidad en relación al MBS, en el análisis de las demás variables encontramos variaciones menores a un 14%.

En la Gráfica 12 destaca que el mayor incremento en la velocidad del aire es generado al modificar los valores de T, obteniendo las velocidades más altas de todo el análisis de variables, aunque esto aplica sólo para el cálculo de los puntos HE y HM. La siguiente variable destacable es HE, donde al modificar sus valores generan una mayor velocidad de aire sobre el MBS, aunque sólo aplica para el mismo punto HE, ya que en los demás puntos de cálculo las velocidades se mantienen sin mayores cambios. En el punto de cálculo HAB las barras se encuentran en rangos muy similares entre ellos, excepto en la serie de modificaciones a las variables HE y PHE PT, donde estos valores superan a los obtenidos en el MBS.



Gráfica 12 Comparativo de velocidad de aire calculado por parámetros. Fuente: Propia del autor.

A partir de estos datos se exponen las siguientes observaciones:

1. La variable más importante en el estudio del impacto de la velocidad del aire a la altura del usuario HAB es PHE. En la configuración donde la altura de PHE se encuentra a un 80% de la altura del punto HAB.
2. La variable que produce la mayor velocidad de aire en HE es el incremento de la altura de T. A mayor altura de T se registra mayor velocidad en el HE.
3. La siguiente variable que registra un incremento en la velocidad del aire en el punto HAB es la combinación de PHE PT, desplazando la altura de ambos hasta coincidir con el punto de cálculo HAB.
4. Modificar las variables Ancho de Cámara (ACHS), Cámara (CA), Hueco de Salida (HS) y Posición de Torre (PT) no generan cambios sustanciales en la velocidad del aire en ninguno de los tres puntos de cálculo, en relación a los datos previamente calculados en el MBS.

4.1.11 Matriz de combinación de las variables T y PHE

Posterior al análisis de variables, se seleccionaron las dos principales: T y PHE, realizando una serie de matrices de combinaciones con el objetivo de identificar la que aportaría mayor velocidad de aire en el punto HAB. En este proceso se redujo la malla de cálculo que utiliza DesignBuilder con el propósito de tener resultados más precisos dentro del área objetivo. Al término de las series de simulaciones de estas matrices se aprecia una mayor área de impacto y velocidad cercana al punto HAB en la configuración T300 PHE100.

Los resultados de las simulaciones indican que la velocidad calculada para los puntos más cercanos a HAB en la configuración T300 PHE100 son muy similares con la velocidad registrada en la configuración T600 PHE80, esto es, en los puntos de cálculo situados a +0.95 mts y +1.05 mts la velocidad del aire sería de 0.25 m/s; considerando que nuestro punto de cálculo principal se encuentra entre estas dos posiciones se asume que la velocidad en el punto HAB es de 0.25 m/s.

A partir de estos datos se exponen las siguientes observaciones:

1. La variable con mayor impacto en el incremento de la velocidad del aire en el punto de cálculo HAB dentro de la habitación es Torre (T).
2. La segunda variable con mayor impacto es Posición Hueco de Entrada (PHE), donde el factor más importante es que la posición del HE coincida con el punto objetivo HAB.

4.1.12 Consideraciones finales previas a Modelo Experimental (ME)

Después de terminar el análisis de las series de simulaciones y determinar cuáles son las variables que generan un mayor incremento en la velocidad del aire en el punto de cálculo HAB, se establece un criterio constructivo para desarrollar el modelo experimental de validación de datos. Las variables que intervienen en este criterio son las siguientes:

1. Factibilidad económica
2. Factibilidad constructiva
3. Factibilidad de inserción arquitectónica

La **factibilidad económica** se resume a la toma de decisiones de la configuración del modelo que permitan llevar a cabo el estudio dentro de un presupuesto que pueda ser costeable para fines académicos. La **factibilidad constructiva** consiste en establecer un criterio de materiales, sistema constructivo y dimensionamiento del modelo, de tal manera que garantice una estabilidad física y estructural. La factibilidad de **inserción arquitectónica** consiste en delimitar cuáles son los posibles ajustes a las variables que intervienen en el modelo, que puedan ser modificadas desde la etapa de proyecto o incluso como una reforma de sitios construidos.

Siguiendo estos criterios se confirma la decisión de construir el Modelo Experimental (ME) con la configuración: **T300 PHE100**, siendo esta la que cumple en mayor medida los criterios aquí expuestos, y desde el punto de vista del comparativo de resultados estaría generando velocidades similares a configuraciones de T más altas, pero que influyen directamente en las factibilidades de costo, constructivas y arquitectónicas.

4.1.13 Modelo Final

Este modelo llamado **T300 PHE100** se desarrolla aumentando la altura de T a una medida de 300 cms y modificando la posición del HE a una altura de 100 cms sobre el nivel de suelo interior, en palabras simples, se incrementa la altura de T para generar mayor velocidad de aire y se modifica la posición de HE para dirigir el flujo de aire. Esta configuración generaría una velocidad de aire en el punto HAB de 0.25 m/s en la simulación del 9 de Enero 2002 a las 14:00 horas.

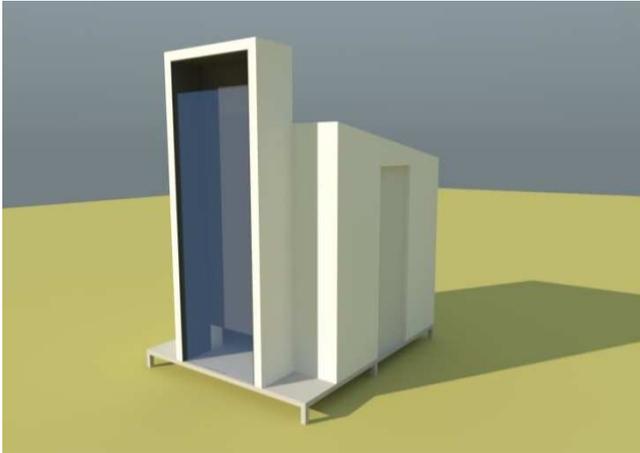


Ilustración 37 Render del Modelo Final (MF) de dimulacion. Fuente: P. del A..

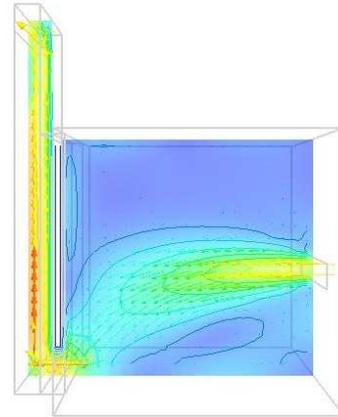


Ilustración 38 Representación gráfica del MF con gradación de color de la trayectoria calculada por simulación. Fuente: Elaboración propia. (DesignBuilder).

4.2 Resultados del Modelo Experimental

El modelo se construye de acuerdo con las características obtenidas de los resultados de simulación, en la configuración T300 PHE100, en el apartado de caso de estudio se describe la construcción, así como la instalación de instrumentos. La adquisición de datos se descarga semanalmente, y el proceso de integración y selección de días de estudio se realiza de acuerdo a los lineamientos establecidos en la metodología.

Los datos mensuales descargados de la estación meteorológica se condensan en una tabla, de la cual se seleccionan los días que contengan más valores dentro de los rangos de selección previamente establecidos, posteriormente se genera una nueva tabla con la integración de los datos obtenidos de los demás instrumentos de medición instalados en el módulo experimental: anemómetros y monitor de estrés térmico. A partir de ahí se obtienen las gráficas de comportamiento y las correlaciones existentes entre las series de datos.

4.2.1 Análisis de datos meteorológicos

Los datos obtenidos por la estación meteorológica documentan que una gran mayoría de los valores de temperatura de aire registrados se encuentran por encima de los valores medios históricos, de tal forma que los días que cumplen el criterio de selección por temperatura representan en promedio un 8% de toda la muestra; los días que cumplen los rangos establecidos para radiación solar representan en promedio un 15%, de tal forma que solo en tres casos de Día Tipo coinciden la selección de temperatura y radiación solar.

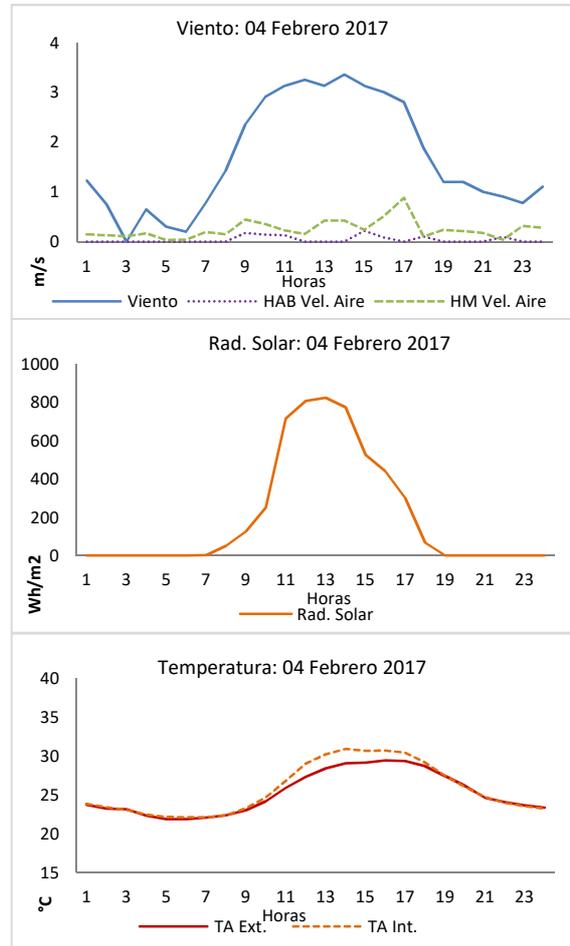
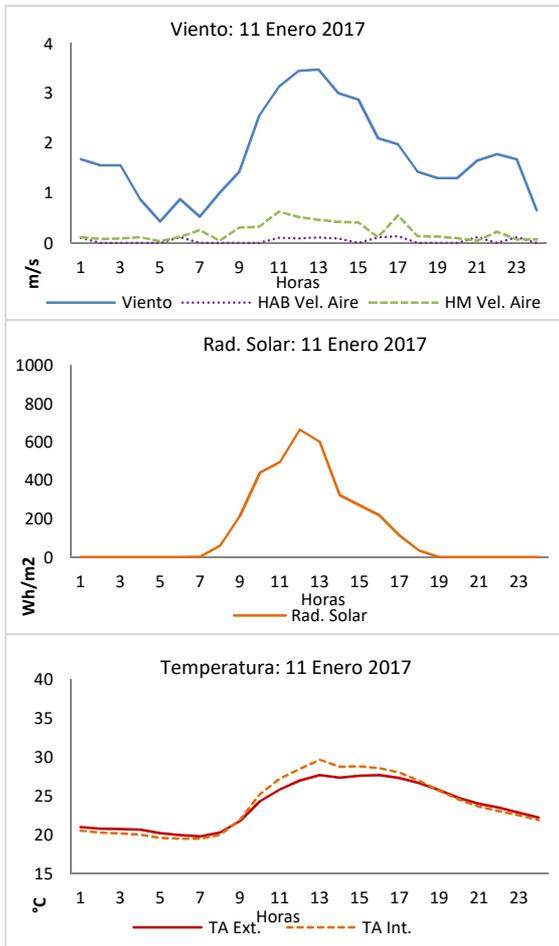
La dirección de viento Este es predominante para la mayoría de los casos, excepto para los meses de Octubre y Diciembre, donde la dirección de viento dominante es Oeste, coincidiendo en Octubre con el período donde existen fenómenos meteorológicos habituales de la temporada de lluvia como tormentas y ciclones tropicales.

El viento exterior registra su velocidad más baja, en la mayoría de los casos entre las 05:00 y 07:00 horas, cuando la temperatura del aire se encuentra en su cota menor, es posible inferir que es el período donde la temperatura del aire y de las superficies están más equilibradas; excepto para los meses de octubre y diciembre, donde se registran valores de velocidad constantes durante el ciclo completo del día.

La velocidad del viento se incrementa a medida que se incrementa la radiación solar, queda registrado que en la mayoría de los casos, los valores de velocidad más altos se registran entre las 13:00 a 16:00 horas presentando un retraso de 2 a 3 horas respecto a los valores más altos de radiación solar; a medida que disminuye la radiación solar la velocidad del viento disminuye, aunque no en proporción directa, de tal forma que la velocidad se mantiene constante incluso en período nocturno, hasta llegar a sus valores mínimos en el período inicial del día.

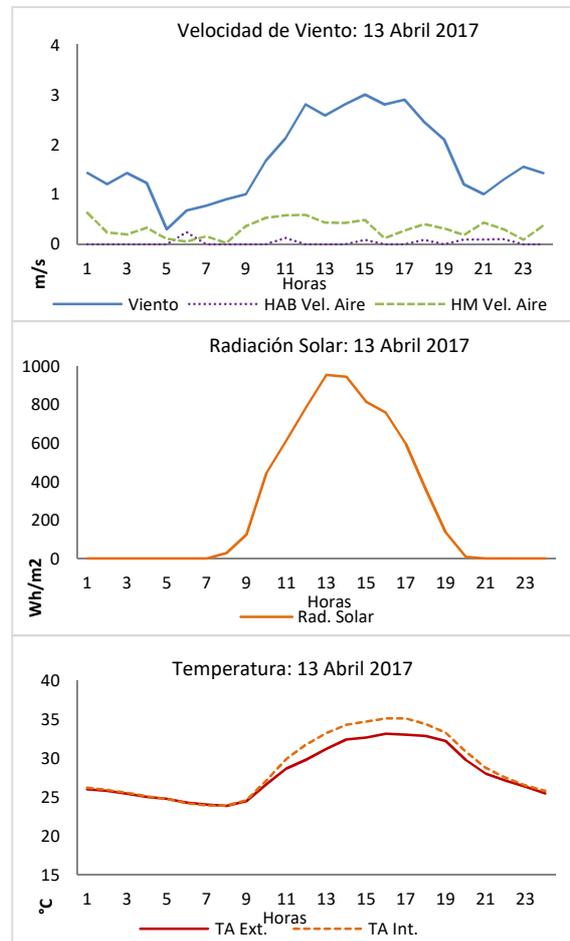
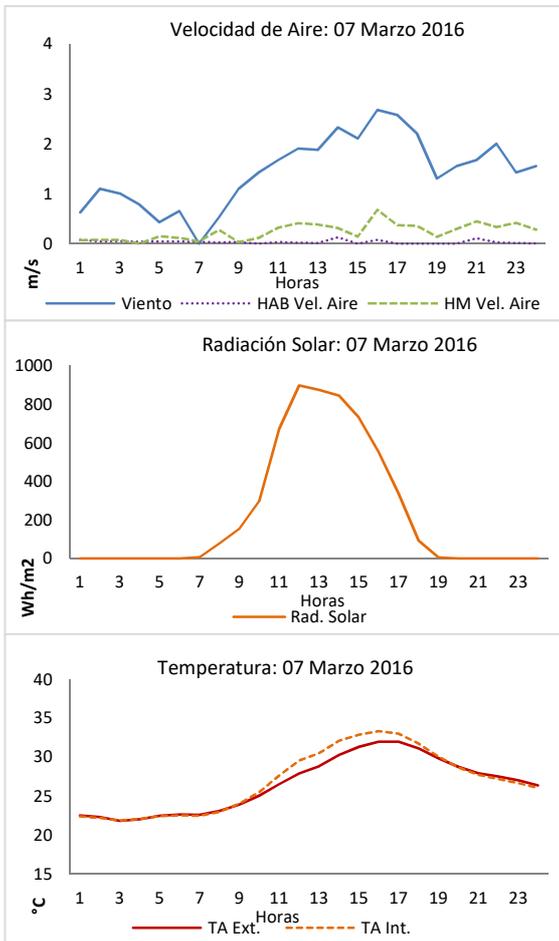
La tendencia de comportamiento del viento exterior puede definirse como continua y uniforme para los meses de Enero a Mayo, período de menor precipitación pluvial y menor humedad relativa; presentando una mayor irregularidad de Septiembre a Diciembre, meses que corresponden a la temporada de máxima precipitación pluvial y alta nubosidad. A continuación se exponen las gráficas que contienen las series de datos de los días tipo de cada mes, pudiendo observar el comportamiento de la radiación solar, velocidad del aire exterior y los puntos de medición HAB y HM, así como la temperatura exterior e interior de la habitación:

Gráficas por Día Tipo mensual



Gráfica 16 Mediciones Día Tipo Enero

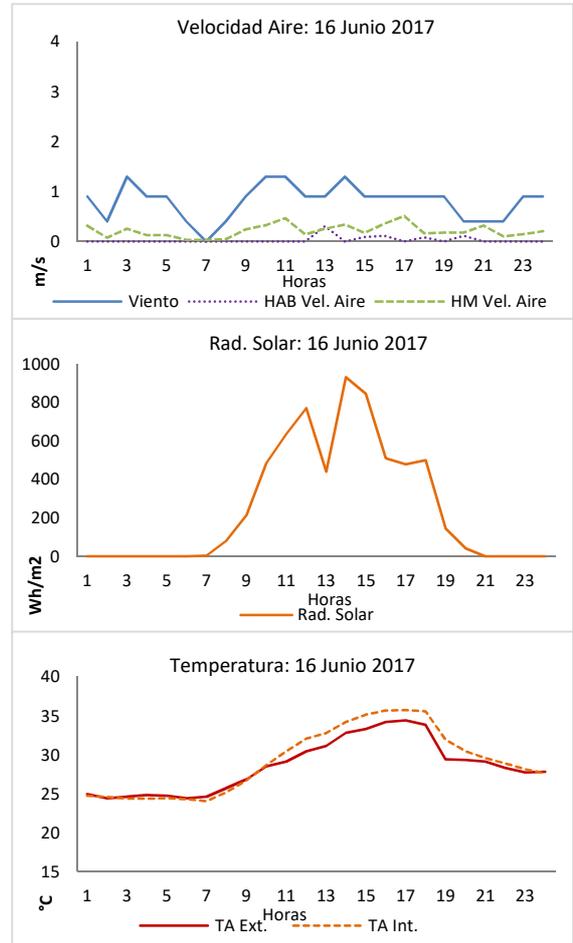
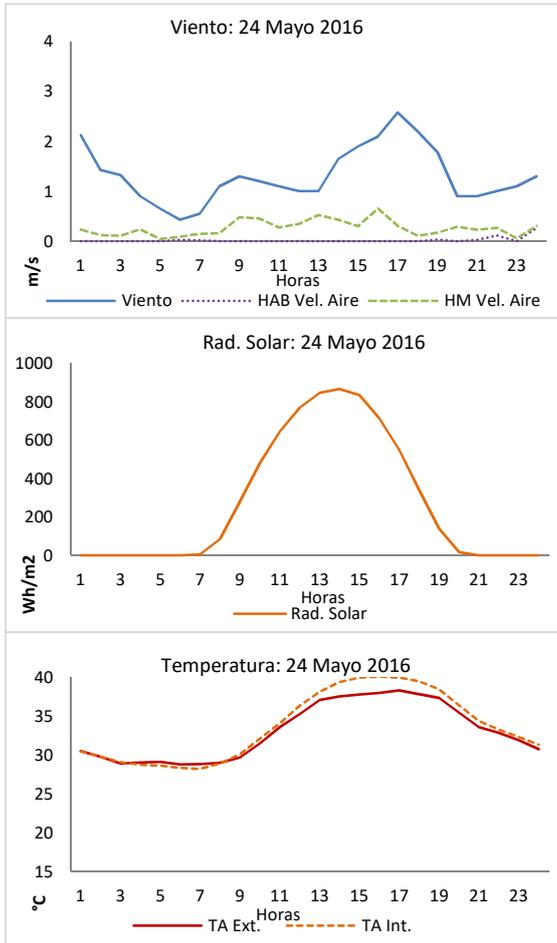
Gráfica 15 Mediciones Día Tipo Febrero



Gráfica 14 Mediciones Día Tipo Marzo

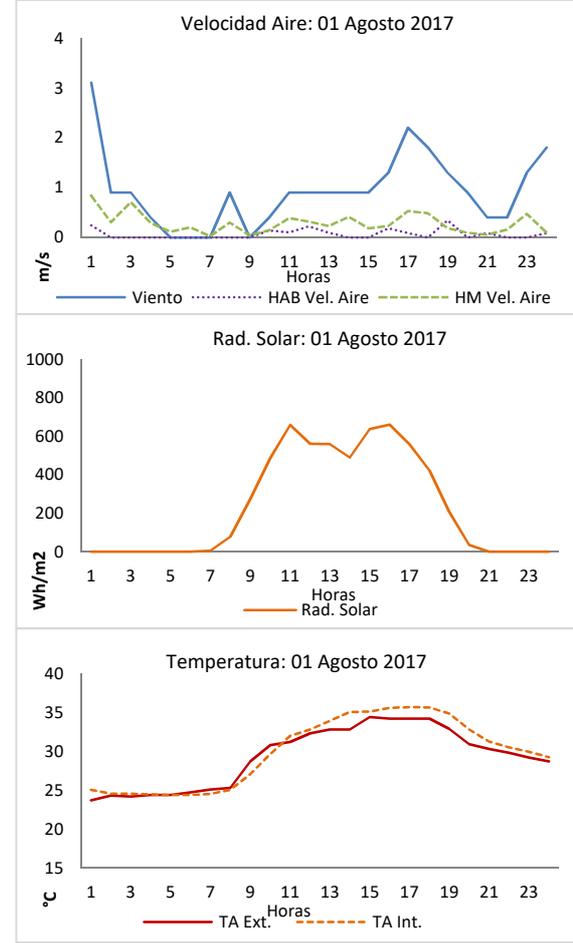
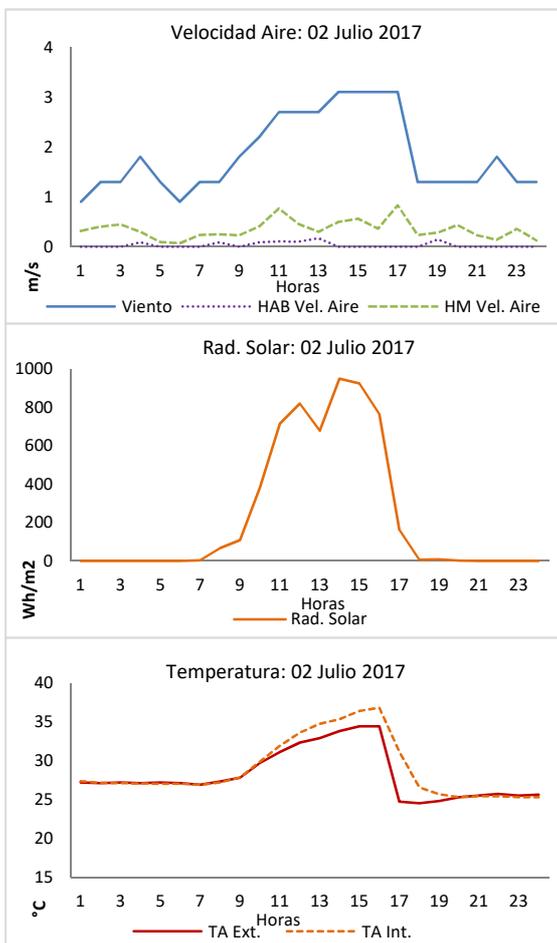
Gráfica 13 Mediciones Día Tipo Abril

Gráficas por Día Tipo mensual



Gráfica 19 Mediciones Día Tipo Mayo

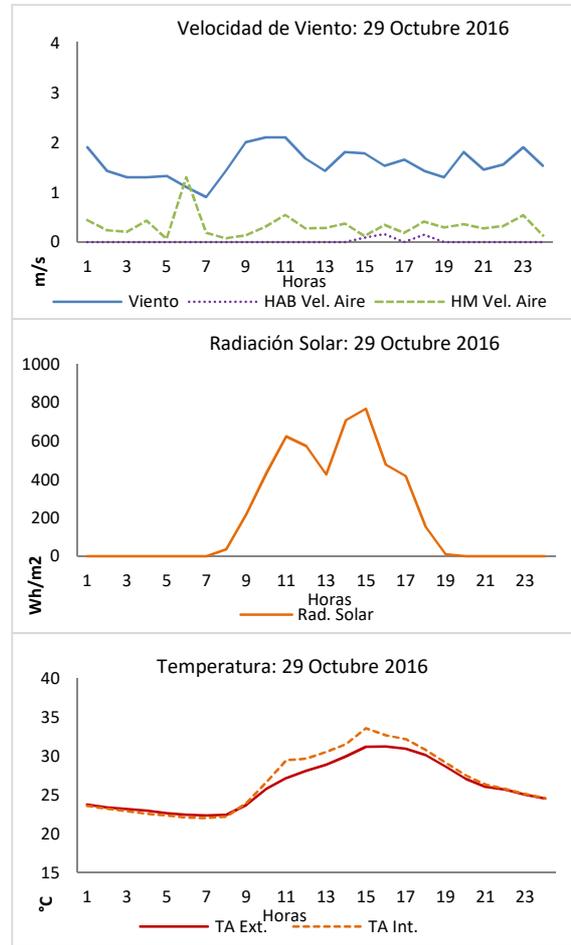
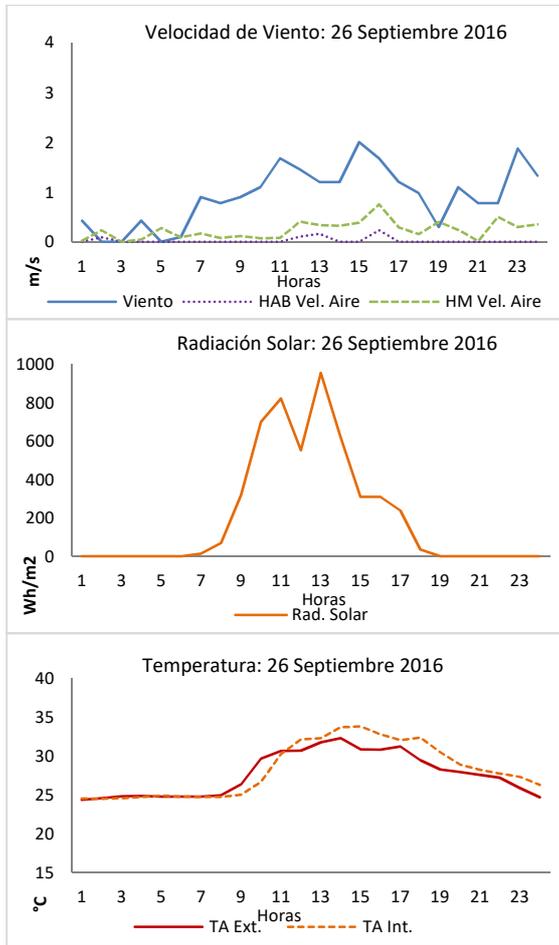
Gráfica 20 Mediciones Día Tipo Junio



Gráfica 18 Mediciones Día Tipo Julio

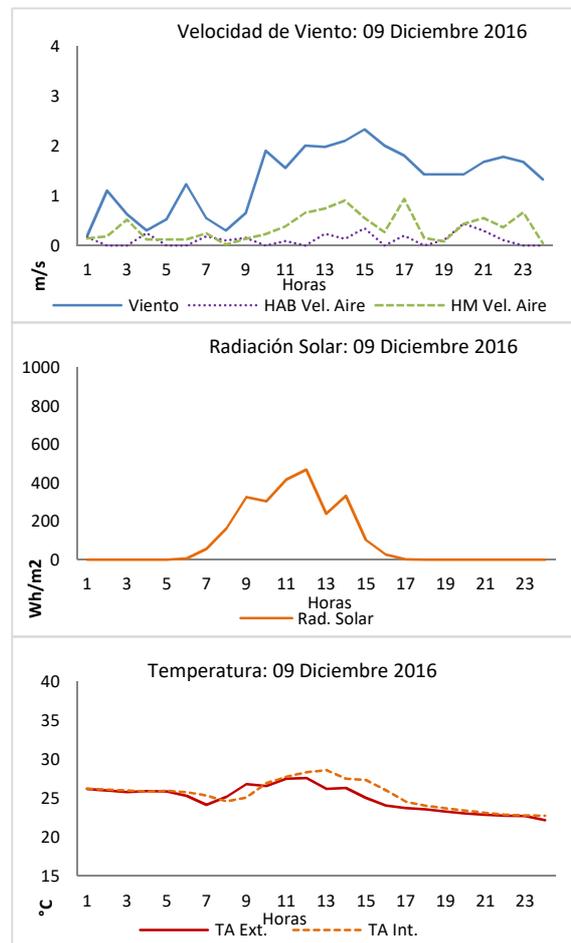
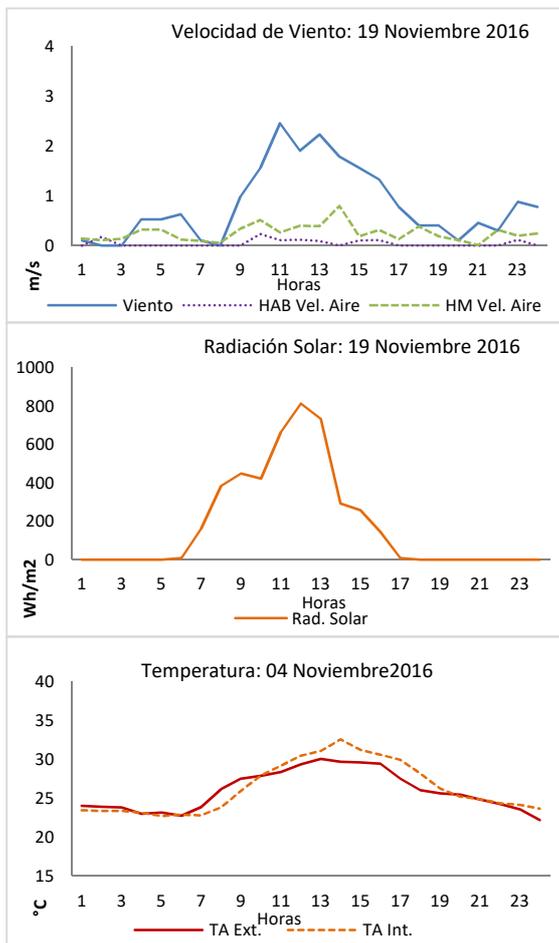
Gráfica 17 Mediciones Día Tipo Agosto

Gráficas por Día Tipo mensual



Gráfica 24 Mediciones Día Tipo Septiembre

Gráfica 23 Mediciones Día Tipo Octubre



Gráfica 22 Mediciones Día Tipo Noviembre

Gráfica 21 Mediciones Día Tipo Diciembre

4.2.2 Análisis de variables

La velocidad de aire promedio permite identificar los Días Tipo que aportan mayor y menor velocidad durante el ciclo diario a lo largo de un año:

Velocidad promedio por Día Tipo de los puntos HAB, HM y Viento Exterior.												
Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
VE	1.76	1.68	1.44	1.69	1.31	0.80	1.84	0.94	0.92	1.57	0.82	1.33
HAB	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.07	0.02	0.02	0.04	0.12
HM	0.22	0.25	0.24	0.32	0.26	0.21	0.35	0.28	0.23	0.32	0.25	0.35

Tabla 21 Velocidad promedio por Día Tipo. Fuente: Propia del autor.

El promedio de velocidad más alto simultáneamente para los puntos HAB (0.12 m/s) y HM (0.35 m/s) es Diciembre, este mes se caracteriza por dar inicio el invierno, descenso de la temperatura media del aire, así como la posición solar más inclinada en la orientación Sur, misma que comparte la chimenea solar.

El punto HAB registra los promedios de velocidad más bajos de todas las variables en todo el año, fluctuando entre 0.02 m/s a 0.04 m/s, con la excepción de Diciembre con 0.12 m/s, este Día Tipo se caracteriza por condiciones climáticas inestables, períodos de precipitación pluvial durante el día e incremento de la velocidad del viento exterior en período nocturno.

Los meses donde se localizan los promedios más bajos de velocidad de aire para todas las variables es Mayo y Junio, que se caracteriza por sus altas temperaturas y cielos parcialmente nublados, por otra parte, la posición del sol se encuentra en su máxima inclinación en la orientación Norte, contraria a la superficie captadora de la chimenea solar.

Por otra parte, el promedio más alto de toda la matriz es VE (1.84 m/s) para el mes de Julio, que a su vez contiene uno de los promedios más altos para HM (0.35m/s), existen factores incidentes en este Día Tipo como la presencia de rachas de viento nocturnas y períodos de precipitación pluvial superior a los 200 mm/h entre las 17:00 y 18:00 horas.

Sin embargo, la tendencia de comportamiento durante el ciclo diario presenta algunas diferencias respecto a los registros de velocidad máxima por variable, como se muestra en la siguiente tabla:

Velocidad máxima por Día Tipo de los puntos HAB, HM y Viento Exterior.												
Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
VE	3.48	3.35	2.68	3.00	2.58	1.30	3.10	3.10	2.00	2.10	2.45	2.33
HAB	0.13	0.22	0.13	0.24	0.26	0.31	0.17	0.35	0.24	0.16	0.23	0.44
HM	0.63	0.88	0.68	0.63	0.65	0.51	0.83	0.84	0.75	1.30	0.79	0.94

Tabla 22 Velocidad máxima por Día Tipo y por variable. Fuente: Propia del autor.

4.2.3 Punto de medición HAB

La velocidad del aire en HAB registra un promedio del 70% de sus datos en 0.00; es decir, durante una gran parte del ciclo diario no existen registros de flujo de aire en HAB, indistintamente de la intensidad de la radiación solar o de la velocidad del aire exterior.

El promedio mensual de velocidad máxima registrada en HAB es 0,24 m/s, donde la máxima velocidad (0,44 m/s) se registra en Diciembre, este valor máximo se localiza en un Día Tipo que presenta baja radiación solar, comportamiento del viento exterior irregular y dirección de viento predominante Oeste, destaca que este registro de máxima velocidad ocurre en horario nocturno (20:00 horas), sin correspondencia directa con las velocidades registradas en HM y Viento Exterior.

La velocidad máxima más baja del año (0,13 m/s) se registra en los meses de Enero y Marzo, estos días pertenecen a meses con baja precipitación y la orientación más favorable para captar radiación solar, incluso Marzo se encuentra dentro del período de mayor radiación solar (5.5 kWh/m²/día) en todo el ciclo anual.

4.2.4 Punto de medición HM

El promedio mensual de velocidad máxima registrada en HM es 0,81 m/s, donde la velocidad más alta (1,30 m/s) se registra en Octubre, este fenómeno coincide parcialmente con los resultados obtenidos para HAB, donde la velocidad máxima se presenta en un mes de baja radiación, dirección de viento Oeste y tendencia de comportamiento del viento exterior irregular sumado a la presencia de precipitación pluvial.

La velocidad máxima más baja (0.51 m/s) se registra en Junio, coincidiendo con la velocidad máxima más baja de Viento Exterior, este mes se caracteriza por el inicio del verano, temperatura media alta, nublados parciales y posición del sol con una ligera inclinación en la orientación Norte.

4.2.5 Análisis de Correlaciones entre variables

A continuación se muestra una tabla que contiene diferentes combinaciones de variables y el grado de correlación entre ellas:

Índice de correlación (Pearson) entre las variables de estudio para cada Día Tipo Mensual.												
Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
HAB - RS	0.34	0.25	0.07	-0.10	-0.28	0.27	0.29	0.29	0.38	0.31	0.45	-0.08
HAB - VE	0.46	0.48	-0.02	-0.15	-0.09	0.02	0.23	0.45	0.23	-0.03	0.51	0.07
HAB - HM	0.36	0.11	0.12	-0.05	0.00	0.09	0.12	0.14	0.60	-0.01	0.22	0.28
RS - VE	0.87	0.88	0.59	0.88	0.39	0.54	0.88	0.16	0.50	0.50	0.78	0.30
RS - HM	0.80	0.40	0.41	0.45	0.69	0.47	0.51	0.06	0.14	-0.09	0.41	0.28
HM - VE	0.77	0.61	0.73	0.47	0.27	0.63	0.66	0.69	0.44	-0.08	0.60	0.63

Tabla 23 Índice del coeficiente de correlación Pearson entre las variables de estudio. fuente: Propia del autor.

Las correlaciones más altas (**0.88**) se registran en la relación de la Radiación Solar con el Viento Exterior, en el período de Enero a Abril, esta relación es Positiva Alta, es decir, mantienen un comportamiento similar en gran parte de la serie de datos, es notable que estos meses presenten características similares: humedad relativa baja, precipitación pluvial baja y en general, las condiciones climáticas son estables, y para el caso de Enero y Febrero la temperatura media del aire se encuentra en sus cotas más bajas de todo el año.

El período que presenta el promedio de correlaciones más bajo en valor absoluto (**0.10**) es Octubre, incluso muchas de ellas en valores negativos, es decir, relaciones inversas; como ya se ha comentado, este período sufre de condiciones meteorológicas especiales: precipitación pluvial alta, rachas de viento fuertes y una dirección de viento distinta a la predominante.

El período con el promedio más alto de correlaciones (0.60) es Enero, con índices que fluctúan desde moderados a altos, en este caso influyen las condiciones climáticas estables, temperatura media del aire baja, y en este mes, el sol se encuentra en su posición más baja en la orientación Sur.

El índice de correlación más bajo (-0.28) se registra en la relación punto HAB y Radiación Solar, catalogándose como negativa baja, es decir, en algunos puntos de la serie de datos las curvas presentan comportamientos inversos; por ejemplo, a mayor

radiación solar, menor velocidad de aire en el punto HAB. Este fenómeno ocurre en Mayo, donde la temperatura media es la más alta de todo el ciclo anual y la precipitación pluvial es la más baja de todo el ciclo. En general, el punto HAB mantiene una correlación muy baja y en algunos casos negativa con las otras variables de medición, para casi todo período de estudio, se observa que la correlación es más crítica para los meses de más altas temperaturas y se incrementa para los meses de temperaturas medias o bajas para este clima.

4.2.6 Análisis de variables en el ciclo anual

En este apartado se utilizan la sumatoria de las variables: viento exterior, HAB, HM y radiación solar, así como la temperatura absoluta máxima y mínima para cada Día Tipo, de igual forma se agrega la diferencia de temperatura exterior e interior en la habitación. La sumatoria de velocidad de aire en los puntos HAB y HM se realiza para cuantificar el flujo de aire en esos puntos, indicando la velocidad de aire registrada hora a hora en el ciclo diario.

Sumatoria de Velocidad de Viento, Aire, Radiación Solar y Temperaturas Max y Min de Días Tipo.													
Variables		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
VE	Σm/s Día	21.11	20.2	34.45	40.63	15.75	19.30	44.20	22.50	11.08	18.84	19.70	31.85
HAB	Σm/s Día	0.53	0.47	0.39	0.41	0.23	0.36	0.39	0.79	0.30	0.20	0.51	1.39
HM	Σm/s Día	2.65	2.97	2.87	3.81	3.13	2.56	4.14	3.39	2.82	3.89	2.99	4.25
RS	kWh/h/Día	3.42	4.87	5.55	6.56	6.55	6.07	5.57	5.63	4.95	4.83	4.33	2.44
T Max	°C	27.7	29.4	32.0	33.1	38.3	34.4	34.4	34.4	32.3	31.2	30.1	27.6
T Min	°C	19.8	21.9	21.8	23.9	28.8	24.4	24.5	23.7	24.4	22.3	22.2	22.2
T Ext-Int	Σ°C Hora	4.7	11.9	9.8	19.6	15.5	14.9	18.2	14.6	14.3	13.1	8.9	12.2

Tabla 24 Sumatorias de velocidad de Viento, Radiación solar y Temperatura. Fuente: Propia del autor.

Los valores más altos de radiación solar (6.55 kWh/m²/día), T Max (38.3°C), T Min (28.8°C) se registran en Mayo, en contraste con los valores bajos de viento exterior (15.75 m/s sumados 24 puntos/ día) y el punto HAB (0.23 m/s sumados 24 puntos/ día), un factor a considerar es la posición del sol, ya que para los meses de Mayo, Junio y Julio traza su recorrido por la orientación Norte, contraria a la chimenea solar.

En el otro extremo, los valores más altos de sumatoria de velocidad para HAB (1.39 m/s sumados 24 puntos/ día) y para HM (4.25 m/s sumados 24 puntos/ día) se registran en Diciembre, a pesar de que la radiación solar se encuentra en su cota más baja (2.44 kWh/m²/día), como ya se ha mencionado este mes se caracteriza por temperatura baja, máxima inclinación solar en orientación Sur, pero principalmente por presentar períodos de rachas de viento y precipitación pluvial.

Existe una posible tendencia de comportamiento entre la diferencia de temperatura exterior e interior, en relación a la velocidad de aire en HM, de tal forma que los meses que presentan mayor diferencia de temperatura Abril (19.6°C día) y Julio (18.2°C día) coinciden con los valores de velocidad altos para HM con 3.81 y 4.14 m/s sumados 24 puntos/ día respectivamente.

La sumatoria de velocidad del punto HAB representa en promedio el 14% de la sumatoria de velocidad de HM, y en algunos puntos la relación entre estas dos variables es inversa, destacando Enero con la segunda mayor velocidad registrada en HAB (0.53 m/s sumados 24 puntos/ día) en comparación con una de las sumatorias de velocidad más bajas para HM (2.65 m/s sumados 24 puntos/ día), mismo caso para Febrero y Noviembre.

4.3 Validación de simulaciones con EPW de datos medidos

El estudio de los parámetros de diseño de la chimenea solar y las diferentes configuraciones de aberturas se realizó utilizando el programa de simulación energética DesignBuilder, esta herramienta permitió obtener una serie de resultados que determinaron la configuración del Modelo Experimental.

El principal objetivo del Modelo Experimental es medir la velocidad del aire en el punto HAB y el punto HM, analizar los resultados de un ciclo anual completo y determinar la tendencia de comportamiento en función del período del año y de las variables climáticas que interactúan con el modelo.

En una última etapa se configuraron nuevos archivos Energy Plus Weather (EPW) para cada Día Tipo, utilizando los datos climáticos medidos en el período de investigación: temperatura, humedad relativa, punto de rocío, presión barométrica, velocidad y dirección de viento, y radiación solar. Los resultados se integran en una tabla comparativa entre las series de datos medidos y simulados para establecer la correspondencia que existe entre ellos, y así determinar el grado de correspondencia que puede atribuirse a DesignBuilder para este caso.

La siguiente tabla contiene los índices de correlación para HAB y HM entre los datos medidos y simulados, así como una gradación de color que indica los valores superiores e inferiores:

Índice de correlación (Pearson) entre datos simulados (EPW) y medidos para cada Día Tipo Mensual.												
Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
HAB	0.38	0.28	-0.07	-0.28	-0.17	0.29	0.08	0.15	0.16	-0.02	0.19	0.03
HM	0.68	0.55	0.56	0.31	0.44	0.50	0.57	0.12	0.51	-0.04	0.48	0.46

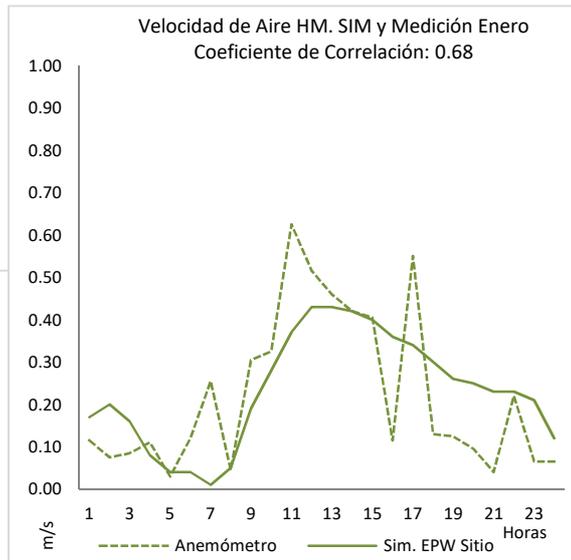
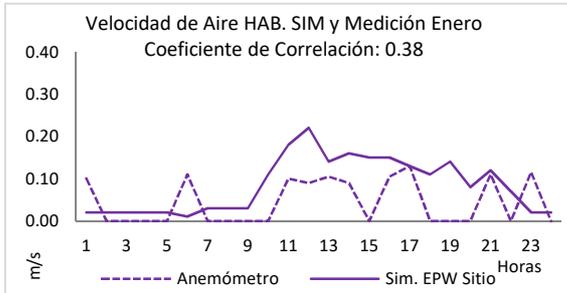
Tabla 25 Índice de Correlación entre datos medidos a simulados EPW. Fuente: Propia del autor.

Nota: El Coeficiente de Correlación de Pearson establece como máxima correlación absoluta el valor 1 y la mínima correlación absoluta es 0. El signo positivo indica correlación positiva, si la variable x crece, la y crece, (pendiente positiva), mientras que signo negativo indica que si x crece y decrece (pendiente negativa).

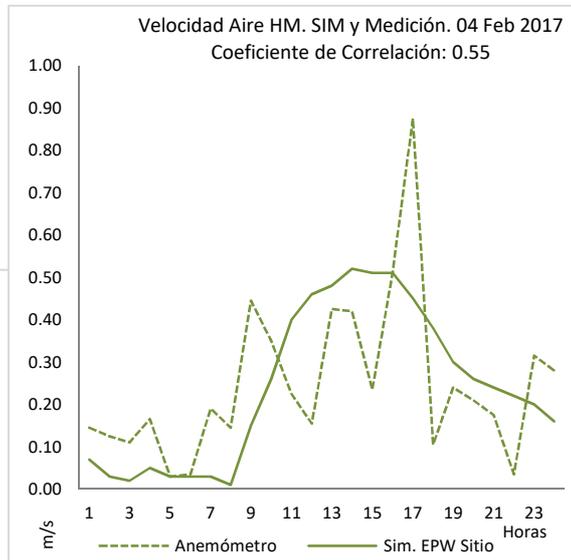
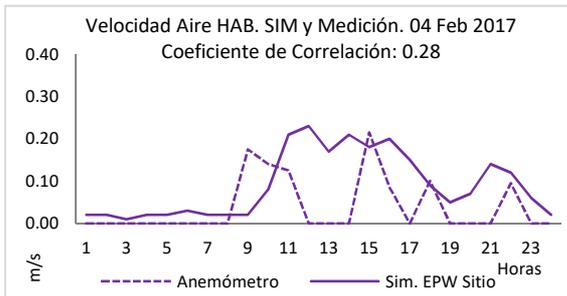
Los índices del coeficiente de correlación más altos en ambos casos se registran en Enero, el punto HAB (0.38) indica una correlación positiva moderada baja y el punto HM (0.68) una correlación positiva moderada alta, interpretándose como líneas que presentan tendencias de comportamiento similares en algunos puntos de la serie. Existen factores que pueden ser incidentes en el nivel de predicción de las simulaciones, tales como: la radiación solar directa hacia la chimenea solar, cielo despejado sin presencia de nubes, comportamiento uniforme del viento exterior; estas mismas condiciones se presentan para Febrero, que sería el segundo caso con correlaciones positivas moderadas. Ver Gráfica 25

En el otro extremo, los coeficientes más bajos en ambos casos se registran en Octubre, con valores para HAB (-0.02) y para HM (-0.04) que se interpretan como negativos muy bajos, donde la correspondencia es prácticamente inexistente y de relación inversa. El Día Tipo para este mes está afectado por condiciones climáticas de la temporada de lluvias, por ejemplo: rachas de viento en períodos nocturnos, nublados parciales y períodos de precipitación pluvial. En líneas generales, el punto HAB muestra las correlaciones más bajas de todas las series, acentuándose para los meses de Marzo, Abril y Mayo en valores negativos, es decir de relación inversa; un factor que define este período es la temperatura de aire alta a muy alta, incluso en horario nocturno, radiación solar indirecta (orientación norte), y velocidad de viento exterior baja. Ver Tabla 25

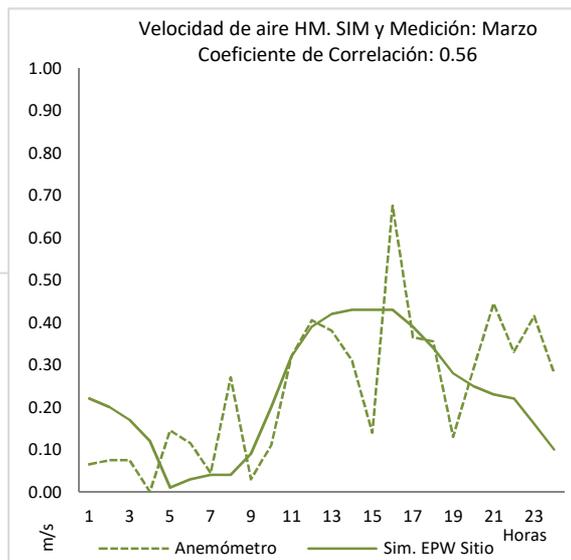
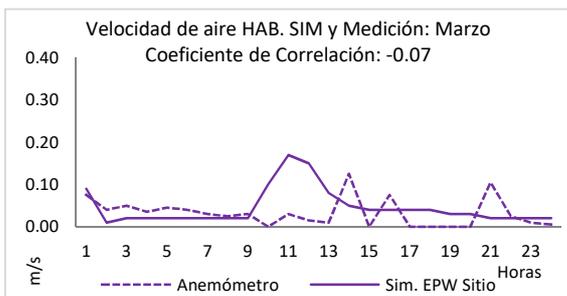
Coefficiente de Correlación Pearson
Mediciones y Sim EPW



Gráfica 25 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Enero. Fuente: Propia del autor.

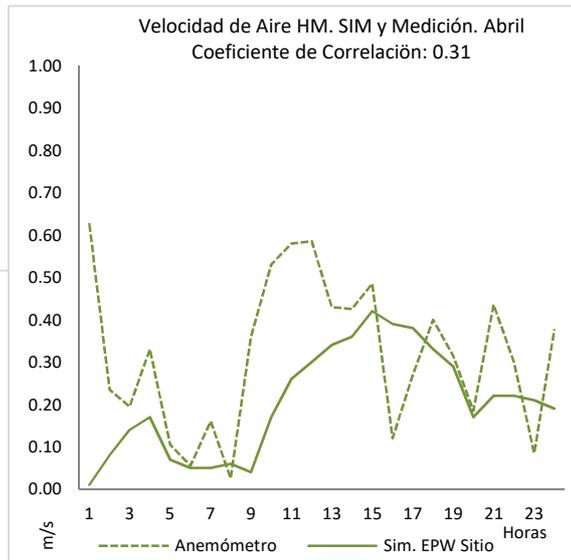
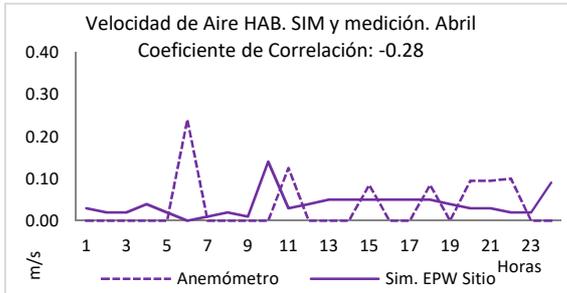


Gráfica 26 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Febrero. Fuente: Propia del autor.

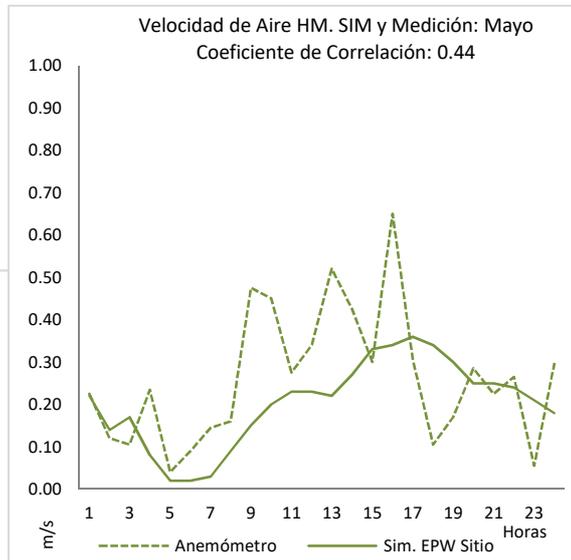
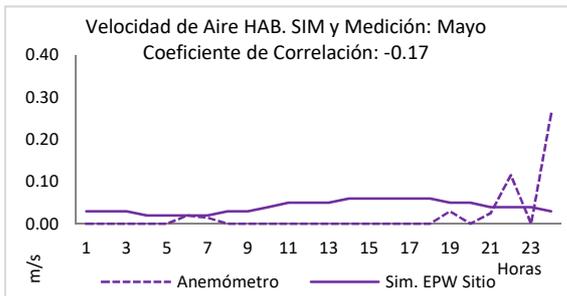


Gráfica 27 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Marzo. Fuente: Propia del autor.

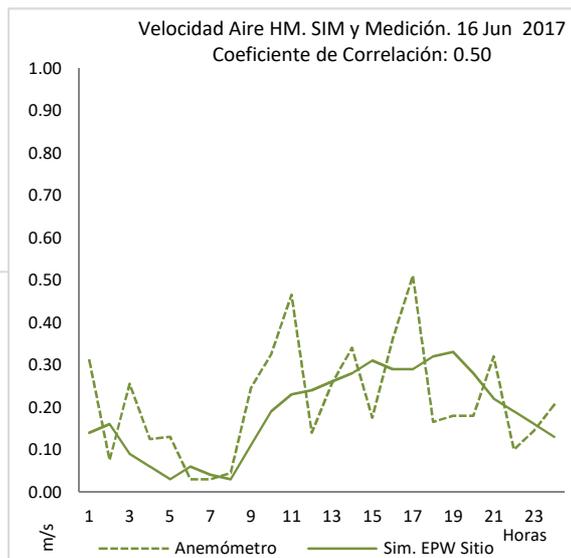
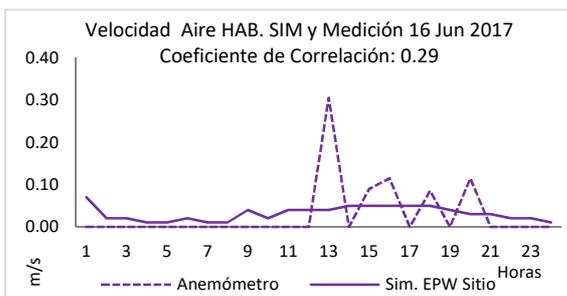
Coefficiente de Correlación Pearson
Mediciones y Sim. EPW



Gráfica 28 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Abril. Fuente: Propia del autor.

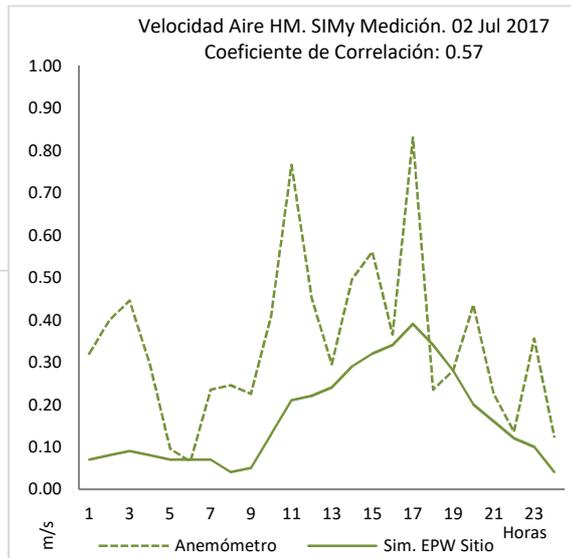
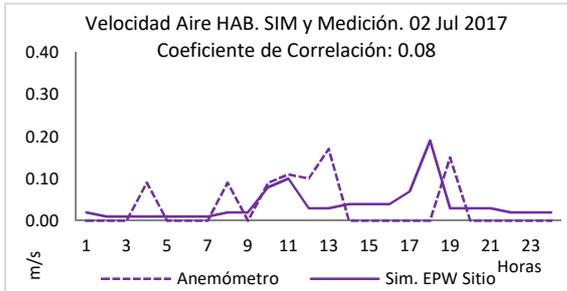


Gráfica 29 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Mayo. Fuente: Propia del autor.

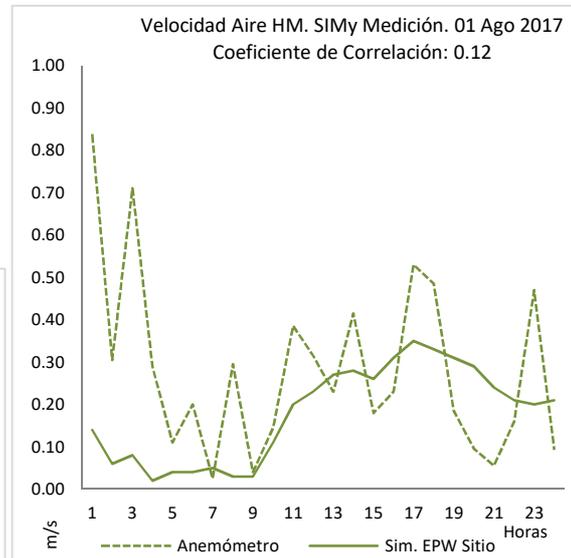
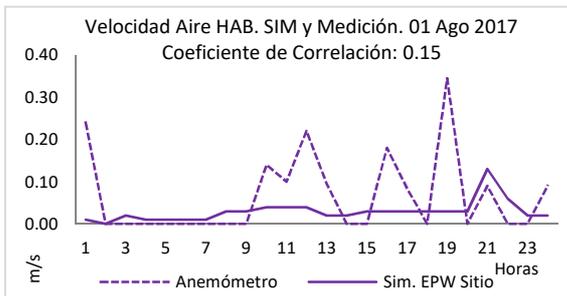


Gráfica 30 Correlación de simulación con EPW de datos medidos. Junio 2017. Fuente: Propia del autor.

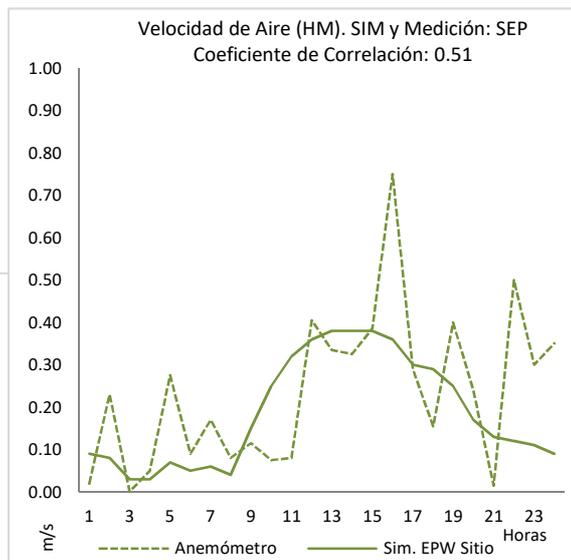
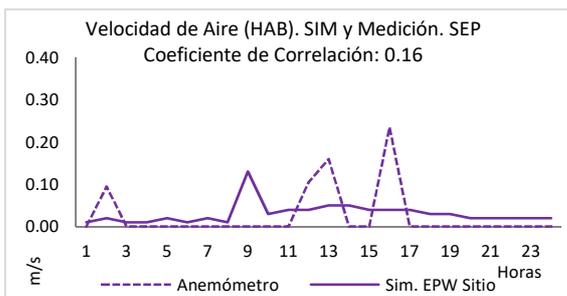
Coefficiente de Correlación Pearson
Mediciones y Sim EPW



Gráfica 31 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Julio 2017. Fuente: Propia del autor.

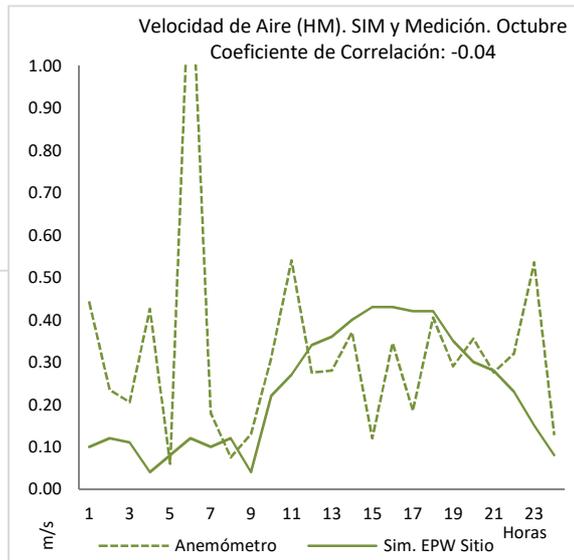
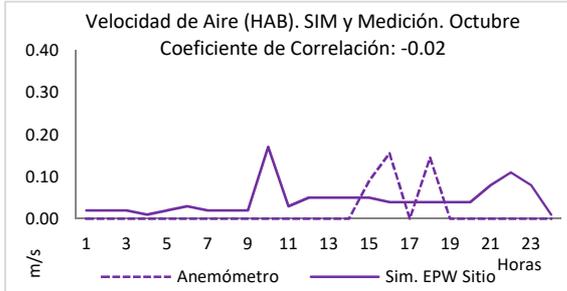


Gráfica 32 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Agosto 2017. Fuente: Propia del autor.

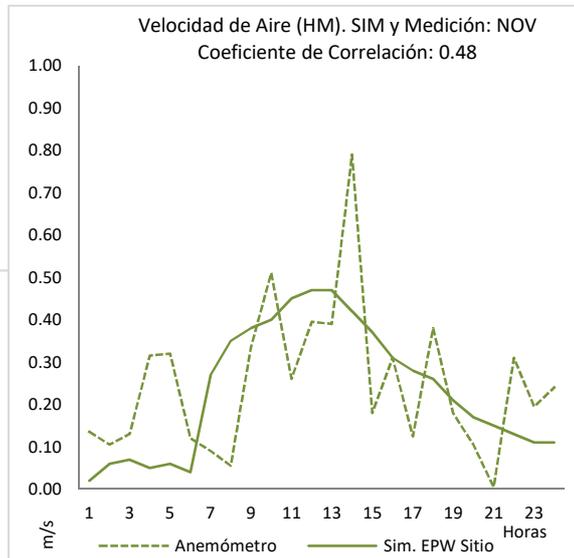
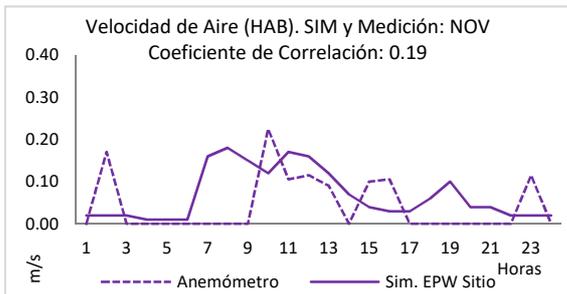


Gráfica 33 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Septiembre. Fuente: Propia del autor.

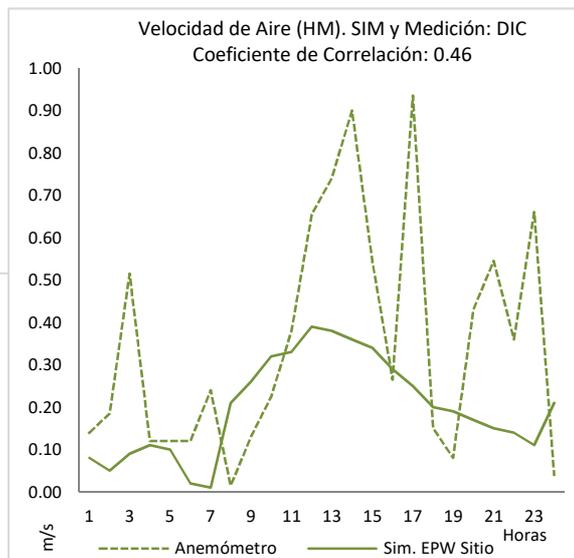
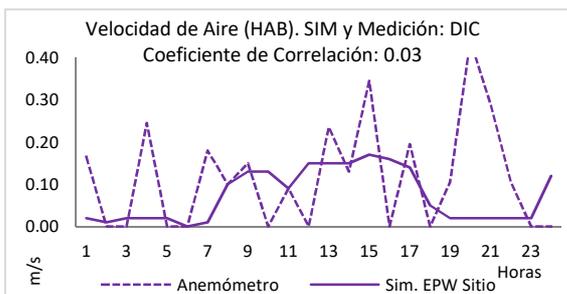
Coefficiente de Correlación Pearson
Mediciones y Sim EPW



Gráfica 34 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Octubre. Fuente: Propia del autor.



Gráfica 35 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Noviembre. Fuente: propia del autor



Gráfica 36 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Diciembre. Fuente: Propia del autor.

Las gráficas anteriores describen los valores obtenidos de las simulaciones con EPW generados con datos meteorológicos de medición, y los valores obtenidos de las mediciones de los anemómetros instalados en los puntos HAB y HM.

De acuerdo a las correlaciones obtenidas, es posible describir algunas tendencias de comportamiento similares:

Los valores de correlaciones más altos se registran en los meses de Enero y Febrero. Se observa que las curvas de datos de simulación son moderadamente coincidentes en magnitud respecto a las curvas de datos de medición, sin embargo, la tendencia de comportamiento de las líneas presenta discordancias principalmente porque la línea de simulación es continua y la línea de medición es irregular, siendo aún más evidente en el punto HAB que presenta la mitad de sus valores en 0.00.

Los valores de correlaciones más bajos se registran en Octubre, en este caso la relación de intensidad entre las curvas es moderada, es decir, coinciden en el cálculo de las velocidades alcanzadas, más no en la tendencia de comportamiento; en el punto HAB por la ausencia de velocidad en la mayoría de los puntos y en el punto HM por la presencia de rachas de viento nocturnas de intensidad variable.

La correlación con el valor positivo más bajo es HAB (0.02) en el mes de Diciembre, en este caso la relación entre las líneas de datos tienen una correspondencia casi nula, la magnitud de valores y tendencia de comportamiento no son coincidentes; principalmente porque aun cuando en la construcción del archivo EPW están incluidos los picos de velocidad de viento, al parecer no influyen de forma sustancial en el cálculo de la velocidad del aire en los puntos de estudio HAB y HM.

La correlación negativa más alta se registra en Abril para el punto HAB (-0.28), aunque este índice es considerado moderado bajo, significa que la relación entre las series de datos es inversa en algunos puntos del ciclo; para el punto HM (0.31) la correlación es positiva moderada baja, es decir mantiene una correspondencia de tendencia de comportamiento con la excepción de rachas de viento nocturnas que no están calculadas en la simulación. Las condiciones meteorológicas de Abril son en su mayoría estables, sin embargo, también se caracteriza por la presencia de masas de aire frío del norte que generan descensos temporales de temperatura y/o incremento de la velocidad de viento en cualquier punto del ciclo diario.

El resumen anual indica que los Días Tipo con mayores índices de correspondencia pertenecen a los meses con condiciones meteorológicas más controladas, en este caso Enero y Febrero; y los Días Tipo con menor correspondencia pertenecen a los meses con condiciones meteorológicas variables, afectadas por factores externos al microclima, en este caso Abril, Octubre y Diciembre.

Capítulo 5

5 Conclusiones

De acuerdo al proceso de investigación que se plantea en la metodología, el desarrollo de este apartado se divide en tres partes:

- Simulación energética
- Modelo Experimental
- Validación de simulaciones con integración de archivos EPW con datos medidos

5.1 Simulación energética

El parámetro de diseño que tiene mayor impacto en la velocidad de aire al centro de la habitación (HAB) es la Posición del Hueco de Entrada (PHE), ya que al ubicar la entrada de aire a 80 cms de altura se calculó un incremento del 275% en relación al Modelo Base de Referencia (MBS). Esta configuración se obtiene cuando la posición de la abertura se encuentra a un 80% de la altura del punto de estudio. **Con lo cual se puede concluir que se debe ubicar la entrada de aire de la habitación a una altura relativa cercana al punto donde se desea provocar la mayor velocidad de aire.**

El parámetro de diseño que tiene mayor impacto en la velocidad del aire en la chimenea solar es la altura de la Torre (T), ya que en la configuración del modelo con torre de 6 mts se calculó una velocidad de 0.77 m/s en la entrada de la chimenea, que representa un incremento del 108% para este punto en relación al Modelo Base de Referencia (MBS). En este caso la mayor velocidad se obtiene al incrementar la altura de la torre, y puede asumirse que seguirá incrementándose aunque no en una proporción directa, ya que el volumen de aire que puede circular por las secciones representa en sí mismo un límite que impide un aumento indefinido del flujo.

La combinación de estos dos parámetros – altura de torre y posición de hueco de entrada - en una nueva serie de simulaciones condujo a conclusiones similares: para el punto HAB, la mayor velocidad se obtuvo en la configuración un modelo con torre de 3 mts. Encontrándose que, **incrementar la altura de la torre más del 50% en relación a la altura de la habitación continúa incrementando la velocidad del aire, pero cada vez en menor intensidad en relación a su altura.** Y por otra parte, la altura del hueco de entrada aporta mayor velocidad cuando se encuentra a la misma altura del punto de medición, que en este caso fue de 100 cms. Alcanzando una velocidad de 0.25 m/s, es decir, un 357% más en relación a las velocidades obtenidas para este punto en el modelo de referencia.

Por lo tanto, **se concluye que aumentar la altura de la torre de la chimenea solar incrementará la velocidad del aire en toda su trayectoria desde el ingreso por la habitación hasta su salida por el hueco superior de la chimenea solar; y que para dirigir el flujo de aire hacia el objetivo es necesario colocar el hueco de entrada del aire a una altura similar al objetivo.**

De acuerdo a los resultados obtenidos, se determina **que modificar el resto de las variables de diseño de la chimenea solar**, es decir: el ancho de la cámara (ACHS), el espesor de la cámara (CA), la posición de la torre (PT), la altura del hueco de entrada (HE), la altura del hueco medio (HM) y la altura del hueco de salida (HS); **genera muy poco impacto en el cálculo de la velocidad del aire al centro de la habitación.**

5.2 Modelo Experimental

La principal variable dependiente de estudio en el modelo experimental es la velocidad del aire en los puntos de medición al centro de la habitación y en la entrada de la chimenea. Así como la relación de estas velocidades con las variables meteorológicas que pueden incidir en su comportamiento, tales como la radiación solar, el viento exterior y la temperatura del aire. Una vez obtenidos los valores dichas variables, se utilizó el Coeficiente de Correlación Pearson para establecer los índices de correspondencia entre ellas.

Datos Meteorológicos

Los resultados permiten concluir que existe una correlación moderada alta entre la radiación solar y el viento exterior con valores promedio de 0.65, es decir, a medida que se incrementa la radiación solar se incrementa la velocidad del viento exterior. En la mayoría de los casos los valores de velocidad más bajos, tanto del aire exterior como de los puntos HAB y HM, se registran entre las 05:00 y 07:00 horas. Este período coincide con los menores registros de temperatura del día, **por lo que se deduce que la ausencia de diferencias de temperatura entre el aire y las superficies, además de la falta de radiación solar, minimiza macroscópicamente los movimientos del aire tanto en interior como exterior.**

Velocidad promedio

La velocidad promedio más alta de viento exterior para los puntos de estudio HAB y HM se registran en los Días Tipo que corresponden a Julio, Octubre y Diciembre, estos meses se caracterizan por la inestabilidad climática generada por la presencia de tormentas tropicales: que presentan rachas de viento diurnas y nocturnas; precipitación pluvial y descenso de temperatura. **Por lo tanto se concluye que la influencia de estos fenómenos meteorológicos supera al efecto de flotabilidad térmica generado por el sistema de la chimenea solar.**

Velocidad máxima

Los Días Tipo que registran la velocidad de viento exterior más alta pertenecen a los meses del período de Enero a Abril. En este mismo período se registran la velocidad más baja para el punto HAB, sugiriendo una relación de carácter inverso, **se concluye que a mayor velocidad de viento exterior se reduce la velocidad de viento en HAB.** Este comportamiento es posible visualizarlo en las mediciones punto a punto, donde la relación de la velocidad del aire exterior y el punto HM es más directa, contrario al punto HAB donde en muchos casos el incremento de velocidad de aire se registra cuando desciende la velocidad del aire exterior. Este fenómeno corresponde a un concepto de distribución del flujo de aire en el interior de la habitación.

Correlaciones entre variables

El período que presenta los índices de correlaciones entre variables más altos es Enero y Febrero, donde las condiciones climáticas son estables, con poca variabilidad, sumado a que la radiación solar es directa hacia la chimenea solar. En el otro extremo las correlaciones más bajas se presentan en Octubre y Diciembre, meses afectados por inestabilidad climática debido a la presencia de tormentas tropicales como rachas de viento, precipitación pluvial y descenso de temperatura. **Por lo cual se concluye que en situaciones de alta variabilidad climática el comportamiento del flujo de aire es inestable y se comporta de manera pseudo-aleatoria con respecto a los parámetros meteorológicos.**

Punto HAB

Los datos de velocidad del aire en el punto HAB registran en promedio el 70% de sus valores en 0.00, en consecuencia, los promedios de velocidad son los más bajos de todo el estudio, fluctuando de 0.02 a 0.04 m/s, es decir, **el flujo de aire en el punto HAB presenta una intensidad de velocidad muy baja.**

Es importante destacar que al centro de la habitación se registran valores de velocidad de aire bajos, y en la mayoría de los casos en cero. En consecuencia, los promedios de velocidad son los más bajos de todo el estudio, oscilando entre los 0.02 a 0.04 m/s.

A diferencia de la entrada de la chimenea, donde la velocidad es mayor y más regular en la mayoría de sus mediciones. Estos resultados difieren de los cálculos realizados en las simulaciones previas, donde sí se encontraron velocidades importantes en el punto HAB. **Por lo que se concluye que el programa informático puede calcular con un mayor grado de aproximación en una abertura delimitada, pero en el caso de un espacio más amplio, las condiciones de límites del espacio, mallado del mismo, y acabados reales, limitan la aproximación a la realidad medida.**

5.3 Validación de simulaciones con archivo EPW de datos medidos

La comprobación del grado de aproximación de los cálculos realizados en DesignBuilder para la velocidad del aire en los puntos de medición se realizó mediante la construcción de archivos EPW con datos medidos por la estación meteorológica para posteriormente evaluar su índice de correspondencia con los datos medidos por los anemómetros en HAB y HM.

Las correlaciones más altas entre las velocidades registradas en el modelo experimental y las calculadas por DesignBuilder se encontraron en los días tipo de Enero y Febrero (condiciones estables) y las más bajas en Octubre y Diciembre (condiciones inestables). **Por lo que se concluye que el programa puede calcular con un mayor grado de aproximación en situaciones climáticas controladas, pero en el caso de los períodos inestables, existe un factor que son las rachas de viento nocturnas que a pesar de que se integran en los archivos EPW no parecen tener un impacto significativo en el cálculo de las simulaciones.**

Las correlaciones más bajas entre lo calculado y lo medido se presentan en las series de simulaciones de HAB, con coeficientes de correlación incluso negativos. Para estos casos el programa puede calcular con relativa aproximación la velocidad del aire para el punto de cálculo, sin embargo no llega a coincidir en todos los casos con la hora del día en que se presenta dicha velocidad.

En el caso del punto HM las correlaciones son positivas moderadas altas, donde el cálculo de magnitudes de velocidad y tendencia de comportamiento tiene una aproximación alta, con excepción de los períodos nocturnos y algunas rachas fuertes diurnas.

Por lo que se concluye que el programa informático tiene una aproximación alta para los puntos que se encuentran en una sección definida como HM, pero baja en los puntos menos definidos como HAB.

Además de que las condiciones climáticas inestables son un factor importante que afecta la capacidad de cálculo del programa.

5.4 Perspectivas de investigación

Como resultado del proceso de investigación existen algunos conceptos que merecen un estudio más profundo para complementar la información disponible actualmente:

Desempeño y Diferencias de temperatura

Estudiar la relación que existe entre el desempeño de la chimenea solar y las diferencias de temperatura exteriores e interiores. Para este caso de estudio la tendencia de comportamiento más estable y uniforme se registró en el período de invierno, que se caracteriza por dos factores que inciden en la operación de la chimenea solar: por una parte es el período donde la incidencia de la radiación solar es directa hacia la superficie captadora de la chimenea, y por otra parte es el período donde se registran las temperaturas de aire exterior más bajas; en contraste con el período de temperaturas de aire más altas, que registra velocidades bajas en el interior de la habitación. Sugiriendo una relación directa entre la diferencia de temperaturas exterior e interior y el rango de velocidad alcanzado en la chimenea solar.

Confort térmico y altas temperatura de aire

Evaluar el impacto de la chimenea solar en el confort térmico dentro de la habitación en condiciones de altas temperaturas de aire. Esta perspectiva de investigación surge en el transcurso del análisis de resultados, encontrando que la velocidad de aire exterior e interior se incrementa a medida que se incrementa la radiación solar, incrementándose de igual manera la temperatura del aire; ahora bien, es importante el estudio de la aportación del ingreso del aire exterior a la habitación desde el punto de vista del confort térmico del usuario, si este aire se encuentra a temperaturas superiores a los 40°C.

Orientación y Demanda

Evaluar la aportación de la chimenea solar al confort térmico de acuerdo a su orientación en relación a los períodos de tiempo que demanden mayores recursos de refrigeración al interior de una habitación. En el diseño del experimento para esta investigación se evaluó la aportación cuantitativa de datos al orientar la superficie captadora de la chimenea en dirección sur o norte, se decidió por la orientación que aportara más datos por tener una mayor exposición a la radiación solar. Aunque dependiendo de la latitud en que se encuentre el proyecto y las condiciones específicas del microclima afectan el balance final de la aportación de la chimenea solar para reducir la demanda de refrigeración.

Estudio de Configuración de Aberturas

Una de las conclusiones en el desarrollo de esta investigación sugiere que la posición del hueco de entrada es preponderante para dirigir el flujo de aire hacia el punto que se plantea como objetivo, ahora bien, la observación y el análisis de los resultados dejan en evidencia que por lo menos a las velocidades de aire que alcanza este sistema no es suficiente para controlar este flujo, por lo que se considera indispensable un estudio más profundo de la posición y/o morfología de la abertura de entrada, ya que las velocidades más altas del flujo de aire se registraron en el hueco de entrada a la habitación, el área cercana a las superficies de los cerramientos y el hueco medio; pero no en el centro de la habitación, donde se infiere se realizará la actividad de los usuarios.

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1 Localización de Villahermosa, Tabasco, México. Fuente: Google INEGI. 2012	14
Ilustración 2 Diagrama estereográfico para Villahermosa, Tabasco, México incluyendo las temperaturas medias durante el recorrido solar. Fuente: Weatherbase (2007)	14
Ilustración 3: Parámetros de confort y factores del usuario. Fuente: Room Conditioning. Klein, Oliver	20
Ilustración 4: Modelos de flujo de aire analizados en túnel de viento Fuente: Arquitectura y Clima. Olgyay, Víctor.....	25
Ilustración 5 :Modelos de flujo de aire en túnel de viento. Análisis de posición de aberturas. Fuente: Arquitectura y Clima. Olgyay, Víctor.	26
Ilustración 6: Esquemas de porcentaje de entrada de aire al interior dependiendo de aberturas y sus relaciones. Fuente: Arquitectura Bioclimática. Gonzalo, Guillermo	27
Ilustración 7: Gráfica bioclimática condensada por Víctor Olgyay	28
Ilustración 8: Esquema de ventilación a través de una habitación inducida por un tipo de chimenea solar.	29
Ilustración 9: Esquemas de Neutral Pressure Level en diferentes configuraciones de aberturas en una habitación. Fuente: Ventilación natural de edificios. Yarke, Eduardo.....	31
Ilustración 11: Efecto Chimenea. Fuente: Clima, Lugar y Arquitectura. Serra, Rafael.	32
Ilustración 11: Efecto de cámara solar Fuente: Clima, Lugar y Arquitectura. Serra, Rafael.	32
Ilustración 12 Esquema de componentes de la chimenea solar. Fuente: Varias	34
Ilustración 13: Variables del Modelo Base. Sección longitudinal. Fuente: Propia del autor.....	41
Ilustración 14: Variables y configuraciones del Modelo Base.	42
Ilustración 15: Estación Meteorológica (EM).....	43
Ilustración 16: Anemómetro de Hilo Tpermico (An).....	43
Ilustración 17: Monitor de Estrés Térmico (WBGT)	43
Ilustración 18: Posición de instrumentos en Modelo Experimental.....	43
Ilustración 19 Ejemplo de correlación perfecta positiva (+1).....	48
Ilustración 20 Ejemplo de correlación perfecta negativa (-1).	48
Ilustración 21 Ejemplo de correlación nula (0).	48
Ilustración 23: Planta para modelos de simulación	52
Ilustración 23: Sección para modelo de simulación.....	52
Ilustración 24: Imagen renderizada del modelo base de simulación en el programa DesignBuilder.....	53
Ilustración 25 Planta arquitectónica del sitio de instalación del Modelo Experimental. Fuente: Elaboración propia.....	55
Ilustración 26 Sitio de localización del Modelo Experimental. Fuente: Google INEGI	55
Ilustración 27: Corte longitudinal del modelo experimental	56
Ilustración 28: Planta arquitectónica del modelo experimental.....	56
Ilustración 29 Render del modelo utilizado en la serie ACHS200. Fuente: Elaboración propia.	65
Ilustración 30 Render del modelo de simulación CA60. Fuente: Elaboración propia.	67
Ilustración 31 Render del Modelo Experimental (ME) en la configuración HE100. Fuente: Elaboración propia.	68
Ilustración 32 Render del Modelo Experimental (ME) en la configuración HS40. Fuente: Elaboración propia.	69
Ilustración 33 Render del Modelo Experimental (ME) para la serie PHE80. Fuente: Elaboración propia.	71
Ilustración 34 Render del Modelo Experimental (ME) para la serie T600. Fuente: Elaboración propia.....	72
Ilustración 35 Render del Modelo Experimental (ME) para la serie PT160.	73
Ilustración 36 Render del ME en la serie PHE PT 100. Fuente: P. del A,	75
Ilustración 37 Render del Modelo Final (MF) de dimulación. Fuente: P. del A.....	80
Ilustración 38 Representación gráfica del MF con gradación de color de la trayectoria calculada por simulación. Fuente: Elaboración propia. (DesignBuilder).....	80

Lista de figuras

Figura 1 Fachada exterior del sitio de instalación del Modelo Experimental: Fuente: Propia del autor.....	55
Figura 2 Planta del Modelo Experimental	56
Figura 3 Corte longitudinal del Modelo Experimental.....	56
Figura 4 Nivelación de base metálica de Modelo Experimental. Fuente: Propia del autor.	60
Figura 5 Colocación de madera contrachapada de pino como suelo de Modelo Experimental. Fuente: Propia del autor.....	60

Figura 6 Fabricación de estructura de Modelo Experimental. Fuente: Propia del autor.	61
Figura 7 Recorte de paneles de Glassrey para habilitar Hueco de Entrada (HE). Fuente: Propia del autor.	61
Figura 8 Detalle de colocación de paneles de cemento Permabase en el interior de la Torre (T) de la chimenea solar.	61
Figura 9 Colocación de paneles aislantes de EPS en el interior de la Torre (T) de la chimenea solar. Fuente: Propia del autor.....	61
Figura 10 Vista exterior del Modelo Experimental (ME) con aplicación de color selectivo. Fuente: Propia del autor.	62
Figura 11 Instalación de vidrio transparente en fachada sur de la chimenea solar. Fuente: Propia del autor..	62
Figura 12 Instrumentos instalados en el interior de la habitación del Modelo Experimental (ME). Fuente: Propia del autor.....	63
Figura 13 Instalación de anemómetro en punto HAB del interior de la habitación del Modelo Experimental (ME). Fuente: Propia del autor.	63
Figura 15 Detalle de los perfiles galvanizados de la habitación del Modelo Experimental. Fuente: Propia del autor.	137
Figura 15 Fabricación de la estructura interior del Modelo Experimental. Fuente: Propia del autor.	137
Figura 17 Instalación de los paneles exteriores de GlassRey en el Modelo Experimental. Fuente: Propia del autor.	137
Figura 18 Detalle de construcción del Hueco Medio del Modelo Experimental. Fuente: Propia del autor.....	137
Figura 19 Mástil de fijación de la suite de sensores de la estación meteorológica. Fuente: Propia del autor.	138
Figura 20 Fabricación de la cubierta de la habitación del Modelo Experimental. Fuente: Propia del autor. ...	138
Figura 21 Sensor de radiación sola de la estación meteorológica Davis. Fuente: Propia del autor.	138
Figura 22 Vista del hueco medio (HM) desde el interior de la chimenea solar (CHS). Fuente: Propia del autor.	139
Figura 23 Fijación de los paneles de malla cemento en el interior de la torre de la chimenea solar. Fuente: Propia del autor.....	139
Figura 24 Colocación de los vidrios transparentes en la fachada sur de la chimenea solar (CHS). Fuente: Propia del autor.....	140
Figura 25 Aplicación de acabados de color selectivo en el interior de la chimenea solar (CHS). Fuente: Propia del autor.....	140
Figura 26 Aplicación de pasta Basecoat en el interior de la chimenea solar (CHS). Fuente: Propia del autor.	140
Figura 27 Detalle de la fachada sur de la chimenea solar (CHS). Fuente: Propia del autor.....	141
Figura 28 Etapa de pruebas de los instrumentos de medición. Fuente: Propia del autor.	141
Figura 29 Limpieza del anemómetro de la estación meteorológica Davis. Fuente: Propia del autor.	141
Figura 30 Colocación de goteros en diferentes puntos del Modelo Experimental. Fuente: Propia del autor.	141

Lista de tablas

Tabla 1 Lista cronológica de artículos publicados que estudian la chimenea solar. Fuente: Science Direct (Elsevier)	37
Tabla 2 Valores climáticos medios. Fuente: Weatherbase	44
Tabla 3 Selección de Día Tipo para marzo 2016. Fuente: Propia del autor.	45
Tabla 4 Día tipo seleccionado para marzo 2016. Fuente: Propia del autor.	46
Tabla 5 Día Tipo Integrado para marzo 2016. Fuente: Propia del autor.....	46
Tabla 6 Correlaciones de variables meteorológicas para marzo 2016. Fuente: Propia del autor.	47
Tabla 7: Correspondencia de datos simulados a medidos para marzo 2016. Fuente: Propia del autor.....	49
Tabla 8 Configuración de paquetes constructivos para el Modelo Base de Simulación. Fuente: Propia del autor.	53
Tabla 9 Configuración de Materiales Constructivos.....	58
Tabla 10 Instrumentos de medición y respaldo	59
Tabla 11 Resultados de serie de simulaciones para ACHS. Fuente: Propia del autor.	66
Tabla 12 Resultados de la series de simulaciones para CA. Fuente: P.A.	67
Tabla 13 Resultados de las series de simulaciones para HE. Fuente: P.A.	69
Tabla 14 Resultados de las series de simulaciones en HS. Fuente: P.A.	70
Tabla 15 Resultados de las series de simulaciones para PHE. Fuente: P.A.	71
Tabla 16 Resultados del cálculo de las series de simulación para Torre (T). Fuente: Propia del autor.	73
Tabla 17 Resultados de las series de simulaciones para PT. Fuente: P.A.	74
Tabla 18 Resultados de las series de simulaciones para PHE+PT. Fuente: P.A.	75
Tabla 19 Evaluación de impacto de los parámetros resultado de las series de simulación. Fuente: Propia del autor.	76
Tabla 20 Resumen comparativo de las máximas velocidades calculadas en las series de simulación. Fuente: Propia del autor.....	77
Tabla 21 Velocidad promedio por Día Tipo. Fuente: Propia del autor.	86
Tabla 22 Velocidad máxima por Día Tipo y por variable. Fuente: Propia del autor.....	86
Tabla 23 Índice del coeficiente de correlación Pearson entre las variables de estudio. fuente: Propia del autor.	87
Tabla 24 Sumatorias de velocidad de Viento, Radiación solar y Temperatura. Fuente: Propia del autor.....	88
Tabla 25 Índice de Correlación entre datos medidos a simulados EPW. Fuente: Propia del autor.....	89
Tabla 26 Correlación entre datos medidos y simulados: Enero 2017. Fuente: propia del autor.....	131
Tabla 27 Correlación entre datos medidos y simulados: Febrero 2017. Fuente: Propia del autor.	131
Tabla 28 Correlación entre datos medidos y simulados: Marzo 2016. Fuente: Propia del autor.....	132
Tabla 29 Correlación entre datos medidos y simulados: Abril 2017. Fuente: Propia del autor.	132
Tabla 30 Correlación entre datos medidos y simulados: Mayo 2016. Fuente: Propia del autor.....	133
Tabla 31 Correlación entre datos medidos y simulados: junio 2017. Fuente: Propia del autor.....	133
Tabla 32 Correlación entre datos medidos y simulados: Julio 2017. Fuente: Propia del autor.....	134
Tabla 33 Correlación entre datos medidos y simulados: Agosto 2017. Fuente: Propia del autor.....	134
Tabla 34 Correlación entre datos medidos y simulados: Septiembre 2016. Fuente: Propia del autor.....	135
Tabla 35 Correlación entre datos medidos y simulados: Octubre 2016. Fuente: Propia del autor.	135
Tabla 36 Correlación entre datos medidos y simulados: Noviembre 2016. Fuente: Propia del autor.	136
Tabla 37 Correlación entre datos medidos y simulados: Diciembre 2016. Fuente: Propia del autor.....	136

Lista de gráficas

Gráfica 1 Rosa de los vientos con información del aeropuerto Carlos Roviroso (Villahermosa, México). Fuente: Windfinder.	15
Gráfica 2 Datos climáticos para Villahermosa, Tabasco, México. Fuente: temperatura, humedad relativa y precipitación pluvial (Weatherbase), uente: radiación solar (UJAT).	16
Gráfica 3: Datos climáticos de Villahermosa, Tabasco implantados en el Ábaco Psicométrico de Baruch Givoni	17
Gráfica 4 Resultados de la serie de simulaciones de Ancho de Chimenea Solar (ACHS). Fuente: Elaboración propia.....	65
Gráfica 5 Resultado de la serie de simulaciones de Cámara (CA). Fuente: Elaboración propia	67
Gráfica 6 Resultados de la serie de simulaciones de Hueco de Entrada (HE). Fuente: Elaboración propia.....	68
Gráfica 7 Resultados de la serie de simulaciones de Hueco de Salida (HS). Fuente: Elaboración propia.....	69
Gráfica 8 Resultado de la serie de simulaciones para Posición Hueco de Entrada (PHE). Fuente: Elaboración propia.....	71
Gráfica 9 Resultados de la serie de simulaciones de Torre (T). Fuente: Elaboración propia.....	72
Gráfica 10 Resultados de la serie de simulaciones de Posición Torre (PT). Fuente: Elaboración propia.....	73
Gráfica 11 Resultados de la serie de simulaciones para Posición Hueco de Entrada (PHE) + Posición Torre (PT). Fuente: P. de A.	75
Gráfica 12 Comparativo de velocidad de aire calculado por parámetros. Fuente: Propia del autor.	78
Gráfica 13 Mediciones Día Tipo Abril	83
Gráfica 14 Mediciones Día Tipo Marzo.....	83
Gráfica 15 Mediciones Día Tipo Febrero	83
Gráfica 16 Mediciones Día Tipo Enero.....	83
Gráfica 17 Mediciones Día Tipo Agosto.....	84
Gráfica 18 Mediciones Día Tipo Julio.....	84
Gráfica 19 Mediciones Día Tipo Mayo.....	84
Gráfica 20 Mediciones Día Tipo Junio	84
Gráfica 21 Mediciones Día Tipo Diciembre.....	85
Gráfica 22 Mediciones Día Tipo Noviembre	85
Gráfica 23 Mediciones Día Tipo Octubre	85
Gráfica 24 Mediciones Día Tipo Septiembre	85
Gráfica 25 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Enero. Fuente: Propia del autor.	90
Gráfica 26 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Febrero. Fuente: Propia del autor.	90
Gráfica 27 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Marzo. Fuente: Propia del autor.	90
Gráfica 28 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Abril. Fuente: Propia del autor.	91
Gráfica 29 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Mayo. Fuente: Propia del autor.	91
Gráfica 30 Correlación de simulación con EPW de datos medidos. Junio 2017. Fuente: Propia del autor.....	91
Gráfica 31 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Julio 2017. Fuente: Propia del autor.....	92
Gráfica 32 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Agosto 2017. Fuente: Propia del autor.....	92
Gráfica 33 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Septiembre. Fuente: Propia del autor.	92
Gráfica 34 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Octubre. Fuente: Propia del autor.....	93
Gráfica 35 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Noviembre. Fuente: propia del autor.....	93
Gráfica 36 Correlación de simulación con EPW de datos medidos: Diciembre. Fuente: Propia del autor.	93

Bibliografía

- Afonso, C., & Oliveira, A. (2000). Solar chimneys: simulation and experiment, 71–79.
- Arce, J., Jiménez, M. J., Guzmán, J. D., Heras, M. R., Alvarez, G., & Xamán, J. (2009). Experimental study for natural ventilation on a solar chimney. *Renewable Energy*, 34(12), 2928–2934. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2009.04.026>
- Bansal, N. K., Mathur, R., & Bhandari, M. S. (1993). Solar Chimney for Enhanced Stack. *Building and Environment*, 28(3).
- Botella, J. (Botella A., Suero Suñe, M., & Ximénez, M. C. (2012). *Análisis de datos en psicología. I. Pirámide*. Retrieved from <https://mx.casadellibro.com/libro-analisis-de-datos-en-psicologia-i/9788436826555/1964262>
- Cannon, W., & Bernard, C. (1932). Interacción entre ser vivo y medio ambiente: respuestas a los cambios, 2–5. Retrieved from <http://es.wikipedia.org/wiki/Homeostasis>
- Chungloo, S., & Limmeechokchai, B. (2009). Utilization of cool ceiling with roof solar chimney in Thailand: The experimental and numerical analysis. *Renewable Energy*, 34(3), 623–633. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2008.05.026>
- Coriolis, E., & Coriolis, G. (1836). Efecto Coriolis. Retrieved from http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Coriolis
- Ding, W., Hasemi, Y., & Yamada, T. (2005). Natural ventilation performance of a double-skin façade with a solar chimney. *Energy and Buildings*, 37(4), 411–418. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.08.002>
- Eficiencia energética. (n.d.). Retrieved June 26, 2017, from https://es.wikipedia.org/wiki/Eficiencia_energética
- Givoni, B. (1969). *Man, Climate and Architecture*. (H. Cowan, Ed.). Essex: Elsevier Ltd.
- Givoni, B. (1994). *Passive and low energy cooling of buildings*. John Wiley and Sons, Inc.
- González Díaz, M. J. (2004). *Arquitectura sostenible y aprovechamiento solar*. (S. P. Técnicas, Ed.) (2004th ed.). Madrid. Retrieved from www.erasolar.es
- Gonzalo, G. E. (1998). *Manual de arquitectura bioclimática* (2004th ed.). Buenos Aires.
- Harris, D. J., & Helwig, N. (2007). Solar chimney and building ventilation. *Applied Energy*, 84(2), 135–146. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.07.001>
- Johnson, R. R., Kuby, P., & Campos Olguín, V. (2016). *Estadística elemental*. Cengage Learning. Retrieved from https://books.google.com.mx/books/about/ESTADISTICA_ELEMENTAL_EDICION_REVISADA.html?id=oNslvgAACAAJ&redir_esc=y
- Khedari, J., Boonsri, B., & Hirunlabh, J. (2000). Ventilation impact of a solar chimney on indoor temperature fluctuation and air change in a school building. *Energy and Buildings*, 32(1), 89–93. [http://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00042-0](http://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00042-0)
- Khedari, J., Rachapradit, N., & Hirunlabh, J. (2003). Field study of performance of solar

- chimney with air-conditioned building. *Energy*, 28(11), 1099–1114.
[http://doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00092-6](http://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00092-6)
- Koenigsberger, O. H., Ingersoll, T. G., Mayhew, A., & Szokolay, S. V. (1977). *Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales*. (Longman Group Limited, Ed.). Madrid: Paraninfo.
- Lee, K. H., & Strand, R. K. (2009). Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney. *Energy and Buildings*, 41(6), 615–621.
<http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.12.006>
- Mathur, J., & Mathur, S. (2006). Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. *Energy and Buildings*, 38(10), 1156–1163.
<http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.01.006>
- Mcknight, T. L., & Hess, D. (1993). *Physical Geography*. Pearson.
- Mitjá, A. (1991). *La refrigeració natural als edificis*. (I. C. D'Energia, Ed.).
- Olgay, V. (1963). *Arquitectura y Clima* (1998th ed.). Barcelona: Editorial Gustavo Gili.
- Ong, K. S., & Chow, C. C. (2003). Performance of a solar chimney, 74, 1–17.
- Saifi, N., Settou, N., Dokkar, B., Negrou, B., & Chennouf, N. (2012). Experimental Study And Simulation Of Airflow In Solar Chimneys. *Energy Procedia*, 18, 1289–1298.
<http://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.146>
- Santamouris, M. (2007). *Advances in passive cooling*. Earthscan.
- Serra, R. (1999). *Arquitectura y Climas* (2002nd ed.). Barcelona: Editorial Gustavo Gili.
- Serra Florensa, R., & Coch Roura, H. (2001). *Arquitectura y Energía Natural* (Ediciones). Barcelona.
- Shi, L., & Chew, M. Y. L. (2012). A review on sustainable design of renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 192–207.
<http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.147>
- Weatherbase. (2016). Retrieved May 23, 2013, from
[http://www.weatherbase.com/weather/weather.php3?s=134767&cityname=Villa hermosa-Tabasco-Mexico](http://www.weatherbase.com/weather/weather.php3?s=134767&cityname=Villa+hermosa-Tabasco-Mexico)
- Yarke, E. (2005). *Ventilación natural de edificios*. Buenos Aires: Nobuko.

Anexos

Anexo 1: Simulación Energética

Matrices de variables

Tablas de resultados de simulaciones

Código	Fecha					Hora
Torre + Posición Hueco de Entrada + Posición Torre	9 Enero 2002					14:00:00
	T					
Configuración	200	300	400	500	600	
PHE 00 PT 00	0.04	0.02	0.04	0.05	0.05	
PHE 20 PT 20	0.02	0.03	0.06	0.08	0.09	
PHE 40 PT 40	0.02	0.03	0.05	0.07	0.08	
PHE 60 PT 60	0.03	0.04	0.06	0.06	0.07	
PHE 80 PT 80	0.08	0.23	0.19	0.18	0.21	
PHE 100 PT 100	0.13	0.11	0.07	0.05	0.05	
PHE 120 PT 120	0.08	0.05	0.05	0.04	0.04	
PHE 140 PT 140	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	
PHE 160 PT 160	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	
PHE 180 PT 180	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	

Código	Fecha				Hora
Torre + Posición Hueco de Entrada + Alto HE	9 Enero 2002				14:00:00
	HE (cms)				
PHE (cms)	5	10	15	20	
00				0.07	
20				0.07	
40				0.07	
60		0.06		0.06	
80		0.10		0.15	
100		0.05		0.09	
120				0.04	
140				0.05	
160				0.04	
180				0.03	

Código	Fecha					Hora
Torre + Posición Hueco de Entrada	9 Enero 2002					14:00:00
	T					
Configuración	200	300	400	500	600	
PHE 00	0.07	0.02	0.04	0.05	0.05	
PHE 20	0.07	0.03	0.05	0.07	0.09	
PHE 40	0.07	0.02	0.04	0.06	0.07	
PHE 60	0.06	0.03	0.04	0.05	0.06	
PHE 80	0.15	0.13	0.21	0.24	0.25	
PHE 100	0.09	0.12	0.08	0.06	0.06	
PHE 120	0.04	0.06	0.03	0.03	0.03	
PHE 140	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	
PHE 160	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	
PHE 180	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	

Matrices de variables
Tablas de resultados de simulaciones

Código		Fecha					Hora
Torre + Posición Hueco de Entrada + Hueco de Entrada		9 Enero 2002					14:00:00
Punto de medición HAB		T (cms)					
HE (cms)	PHE (cms)	200	300	400	500	600	
5	00						
	20						
	40						
	60						
	80						
	100						
	120						
	140						
	160						
	180						
10	PHE 00					0.05	
	PHE 20					0.09	
	PHE 40					0.09	
	PHE 60					0.07	
	PHE 80					0.14	
	PHE 100					0.06	
	PHE 120					0.05	
	PHE 140					0.06	
	PHE 160					0.05	
	PHE 180					0.06	
15	PHE 00					0.04	
	PHE 20					0.09	
	PHE 40					0.08	
	PHE 60					0.06	
	PHE 80					0.23	
	PHE 100					0.05	
	PHE 120					0.04	
	PHE 140					0.05	
	PHE 160					0.05	
	PHE 180					0.06	
20	PHE 00	0.07	0.02	0.04	0.05	0.05	
	PHE 20	0.07	0.03	0.05	0.07	0.09	
	PHE 40	0.07	0.02	0.04	0.06	0.07	
	PHE 60	0.06	0.03	0.04	0.05	0.06	
	PHE 80	0.15	0.13	0.21	0.24	0.25	
	PHE 100	0.09	0.12	0.08	0.06	0.06	
	PHE 120	0.04	0.06	0.03	0.03	0.03	
	PHE 140	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	
	PHE 160	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	
	PHE 180	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	

Matrices de variables
Tablas de resultados de simulaciones

Código		Fecha					Hora
Torre + Posición Hueco de Entrada + Hueco de Entrada		9 Enero 2002					14:00:00
Punto de medición HAB							
HE (cms)	PHE PT (cms)	T (cms)					
		200	300	400	500	600	
5	00						
	20						
	40						
	60						
	80						
	100						
	120						
	140						
	160						
	180						
10	00						
	20		0.05				
	40		0.05				
	60		0.22				
	80		0.10				
	100		0.03				
	120		0.04				
	140		0.04				
	160		0.04				
	180		0.03				
15	00					0.04	
	20		0.04			0.10	
	40		0.03			0.10	
	60		0.21				
	80		0.13				
	100		0.06				
	120		0.05				
	140		0.04				
	160		0.03				
	180		0.03				
20	00	0.04	0.02	0.04	0.05	0.05	
	20	0.02	0.03	0.06	0.08	0.09	
	40	0.02	0.03	0.05	0.07	0.08	
	60	0.03	0.04	0.06	0.06	0.07	
	80	0.08	0.23	0.19	0.18	0.21	
	100	0.13	0.11	0.07	0.05	0.05	
	120	0.08	0.05	0.05	0.04	0.04	
	140	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	
	160	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	
	180	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	

Matrices de variables
Tablas de resultados de simulaciones

Código							Fecha	Hora
Torre + Posición Hueco de Entrada / Posición Torre + Hueco Medio							9 Enero 2002	14:00:00
Punto de cálculo HAB								
HE	PHE PT	T						
		200	300	400	500	600		
	00							
	20							
	40							
	60							
35	80		0.06					
	100		0.24					
	120		0.11					
	140							
	160							
	180							
	00							
	20							
	40							
	60							
30	80		0.03					
	100		0.22					
	120		0.10					
	140							
	160							
	180							
	00							
	20							
	40							
	60							
25	80		0.04					
	100		0.19					
	120		0.09					
	140							
	160							
	180							
	00	0.04	0.02	0.04	0.05	0.05		
	20	0.02	0.03	0.06	0.08	0.09		
	40	0.02	0.03	0.05	0.07	0.08		
	60	0.03	0.04	0.06	0.06	0.07		
20	80	0.08	0.23	0.19	0.18	0.21		
	100	0.13	0.11	0.07	0.05	0.05		
	120	0.08	0.05	0.05	0.04	0.04		
	140	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05		
	160	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04		
	180	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03		

Matrices de variables
Tablas de resultados de simulaciones

Código							Fecha	Hora
Torre + Posición Hueco de Entrada / Posición Torre + Hueco Medio + Hueco de Salida							9 Enero 2002	14:00:00
Punto de cálculo HAB								
HS	PHE PT	T						
		200	300	400	500	600		
35	00							
	20							
	40							
	60							
	80			0.22				
	100							
	120							
	140							
	160							
	180							
	30	00						
20								
40								
60								
80				0.20				
100								
120								
140								
160								
180								
25		00						
	20							
	40							
	60							
	80			0.22				
	100							
	120							
	140							
	160							
	180							
	20	00						
20			0.04	0.02	0.04	0.05	0.05	
40			0.02	0.03	0.06	0.08	0.09	
60			0.02	0.03	0.05	0.07	0.08	
80			0.03	0.04	0.06	0.06	0.07	
100			0.08	0.23	0.19	0.18	0.21	
120			0.13	0.11	0.07	0.05	0.05	
140			0.08	0.05	0.05	0.04	0.04	
160			0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	
180			0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	
			0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	

Anexo 2: Modelo experimental

Instrumentación

Estación Meteorológica

Este equipo es un sistema completo de monitoreo de las condiciones climáticas, se compone de: consola, módulo de registro de datos, software de descarga y el módulo de sensores. La consola consta principalmente de una pantalla LCD donde es posible leer los datos climáticos, una conexión para el Registrador de Datos y conectividad a computadora personal; el registrador de datos Weather Link es un módulo que se instala dentro de la consola y se encarga de grabar la información proporcionada por los sensores de acuerdo a la programación seleccionada por el usuario; el software incluido contiene varias funciones para programar los períodos de medición, seleccionar los períodos de descarga de datos y visualización de gráficos de comportamiento; la suite integrada de sensores consiste en: anemómetro de tres copas, veleta de dirección de viento, pluviómetro, termo-higrómetro, barómetro y piranómetro, los cuales se instalan en un mástil a diferentes alturas según especificaciones.

Anemómetro de Hilo Térmico

Es un instrumento que consta principalmente de dos elementos: la base de mano o portátil y la sonda telescópica. La base portátil tiene una pantalla LCD donde es posible leer las mediciones punto a punto (velocidad del aire, temperatura y humedad relativa), se alimenta con baterías o directamente al tomacorriente, esta base incluye un Registrador de Datos con capacidad hasta 20,000 lecturas; la sonda telescópica integra dos sensores: un hilo térmico y un termo-higrómetro; el software incluido permite conectar la base a la computadora y la descarga de datos, así como monitorear la velocidad directamente desde la pantalla.

Medidor de Estrés Térmico

Este instrumento consta de un solo elemento, en este caso es una base portátil que incluye una pantalla LCD con retro-iluminación para visualizar los datos ambientales (temperatura, humedad relativa y temperatura radiante), integra un sensor de temperatura encapsulado en un globo negro para medir temperatura radiante, así como un Registrador de Datos que almacena la información en una tarjeta SD de capacidad variable; se alimenta de baterías o directamente al tomacorriente. En este caso no incluye software de adquisición de datos ya que la información se descarga directamente en formato XLS.

Batería de respaldo

Este equipo tiene dos funciones: regular el voltaje que alimenta a los instrumentos de medición y proveer de energía al sistema en caso de cualquier interrupción. El regulador de voltaje mantiene la tensión nominal estable en 120 V, y tiene una capacidad de soporte de 450 W durante 15 minutos, la energía eléctrica es regulada y respaldada en los 8 contactos que suministra por medio de un microprocesador que envía información a unos testigos led indicando la función de operación.

Instalación de Instrumentos de Medición

El proceso de instalación de instrumentos de medición se dividen en de la siguiente manera:

1. Alimentación eléctrica y cableado de instrumentos
2. Estación Meteorológica
3. Monitor de Estrés Térmico

4. Anemómetro

Alimentación eléctrica y cableado de instrumentos

Esta etapa preliminar inicia con la habilitación de ductos eléctricos con tubos galvanizados cédula 22 con una sección de 1.9 cms, conectando el tablero eléctrico con el centro de HAB por la cara inferior del suelo de triplay, por su cara interior se instaló una caja condulet LB donde se habilitó un contacto dúplex Leviton Cien, el cual fue alimentado con cable THW Calibre 12 para energizar el tomacorriente; finalmente se conectó la batería de respaldo para protección de los equipos. Por otra parte, se instaló un cable dúplex calibre 18 (suministrado por Davis Instruments) desde la oficina donde se instalará la consola principal de la estación meteorológica, hasta el mástil en nivel de azotea donde se instalará la suite de sensores de la misma estación; dicho cable se sujetó a una tubería existente con cinchos de plástico @60 cms.

Estación Meteorológica

El primer paso en la instalación de la estación meteorológica consistió en fijar con abrazaderas tipo omega un mástil de tubo galvanizado de 3.8 cms de diámetro, a un murete en la planta de la azotea que estuviese localizado en un área libre de sombras; posteriormente se instaló la base de la suite de sensores a la altura indicada por el fabricante (2 mts. sobre el N.P.T.), y sobre ésta se fijó el bote del pluviómetro, dentro del bote se integró el sensor de precipitación calibrándolo con los contrapesos indicados; debajo de este equipo instalamos el termo-higrómetro y en un extremo se instaló el módulo con la tarjeta electrónica.

En un segundo paso se instaló la base del anemómetro y las copas de medición, orientándolo en dirección Norte con la ayuda de una brújula magnética, éste anemómetro se instaló a una altura igual que el paramento más alto en un diámetro de 10 mts. El piranómetro se instala en una base adjunta al bote del pluviómetro, de tal forma que no lo impacte alguna posible sombra del propio equipo, para su instalación es necesaria la nivelación al plano horizontal con unos tornillos ajustables. Finalmente todos los sensores se conectan al módulo de la tarjeta electrónica en sus respectivos bornes de conexión, este módulo se cierra herméticamente con una junta de neopreno para evitar posibles interferencias con los fenómenos climáticos.

En una tercera etapa se realizó la intercomunicación de la suite de sensores con la consola principal, conectándose a través del cable dúplex en sus respectivas terminales. Adicionalmente se insertó el módulo del Registrador de Datos WeatherLink dentro de la consola y éste a su vez hacia una computadora de escritorio, finalmente se instaló el software de descarga de datos y la interfaz de comunicación. Adicional a este proceso de instalación, es necesario introducir datos específicos del sitio a través de la consola principal, tales como: geo-localización, zona horaria, altitud, y definir cuáles datos se desplegarán en la pantalla de la consola.

Monitor de Estrés Térmico

Para la instalación de los instrumentos que se posicionarán al centro de la HAB fue necesario implementar una base soporte que se fabricó de la siguiente manera: la base principal está habilitada con un tramo de 20 cms. de perfil de aluminio natural de 5.0 cms. x 10.0 cms, el cual fue sujeto al suelo de triplay con dos tornillos auto-roscables de 2.5 cms, al centro de este perfil se sujetó con tuercas y arandelas una varilla roscable de 90 cms de alto con una sección de 0.6 cms, que tendrá la función de mástil de instalación para los instrumentos de medición, y, a ésta misma varilla se agregaron dos ángulos para escuadra de aluminio como bases específicas de cada equipo, sujetos de igual forma

con tuercas roscables que permitan el ajuste de altura y el correcto posicionamiento de los instrumentos de medición. En primer término se instaló el Monitor de Estrés Térmico, fijando una cinta Velcro al equipo y su contraparte a la escuadra de aluminio, adicionalmente se colocó un cincho de plástico transparente para evitar un posible desprendimiento, se instaló el cable que suministra la corriente eléctrica y se conectó a la batería de respaldo, inmediatamente después se insertó una tarjeta de memoria SD de 8 Gb de capacidad, el posicionamiento del equipo consistió en nivelar el centro del globo negro a 100 cms de altura respecto al suelo ajustando las tuercas roscables hasta llegar a ese punto, así como orientar el equipo al eje longitudinal de las aberturas HE y HM. La programación del equipo se realiza directamente en el teclado del instrumento, ajustando hora y la frecuencia de grabación de datos, en este caso a cada 30 minutos.

Anemómetros

La instalación de los anemómetros corresponde a dos puntos de medición diferentes, en primer lugar describiremos el Anemómetro HAB que se sitúa en el centro de la Habitación (HAB), y posteriormente se describirá el Anemómetro HM que se sitúa al centro del Hueco Medio (HM).

El Anemómetro HAB se instaló de la siguiente manera: se fijó la sonda telescópica al ángulo de aluminio, el procedimiento fue muy similar al anterior, encintando la base de la sonda con cinta Velcro y la contra-parte directamente al ángulo de aluminio, se aseguró con dos cinchos de plástico transparente de 15 cms, nivelando la sonda en el sentido vertical con ayuda de un nivel de mano, en este caso la base de aluminio se colocó a una altura de 25 cms sobre el nivel del suelo, ajustando la altura del cabezal mediante la extensión telescópica de la sonda, situando el Hilo Térmico a una altura de 100 cms sobre el nivel del suelo, el sensor del termo-higrómetro se encuentra en este mismo cabezal; el instrumento de mano se colocó a un costado de la base del mástil, extrayendo una paletilla de soporte para separarlo del suelo, se conectó a la batería de respaldo mediante un eliminador de corriente a 12V y se conectó la sonda por la parte superior del instrumento; una vez conectados todos los cables se encendió el equipo, permitiendo el calentamiento de la sonda durante 15 segundos para acceder al menú de operación, en este caso fue necesario ajustar hora actual y frecuencia de medición. A diferencia del Monitor de Estrés Térmico, el anemómetro no necesita tarjeta de memoria adicional, ya que el propio equipo hace la función de registro de datos.

El Anemómetro HM se instaló colocando la base del instrumento en el extremo izquierdo de la habitación directamente en el suelo, y a ésta base se conectó la sonda telescópica, la cual fue fijada en 4 puntos con cinta adhesiva metálica, colocando la base de la sonda a 15 cms sobre el HM y posteriormente extendiendo telescópicamente el sensor hasta localizarlo en el centro de esta abertura, se revisó la posición del sensor con un nivel de mano y flexómetro metálico. El proceso de alimentación eléctrica y programación es idéntico al aplicado en el Anemómetro HAB.

Pruebas y Descarga de datos

En esta etapa se describe el proceso de adquisición de datos y validación de la información obtenida, para comprobar el correcto funcionamiento de los equipos y la confiabilidad de los archivos descargados. Estas pruebas se explican por equipos:

1. Estación Meteorológica
2. Monitor de Estrés Térmico
3. Anemómetro de Hilo Térmico

Estación Meteorológica

Para la descarga de datos de este equipo es necesario instalar en una terminal de computadora el software Weather Link proporcionado por el fabricante (Davis Instruments) y conectar el Registrador de Datos a la misma computadora. Al abrir el programa se despliega en pantalla varias ventanas con la información meteorológica, en la pestaña de Configuración se realizan los ajustes necesarios de geo-localización y frecuencia de registros. Para entrar a la opción de descarga de datos se ingresa en la pestaña de Datos, en este caso se seleccionó un período de 7 días, es posible seleccionar el formato de archivo de salida, para este caso se seleccionará archivos en formato (.xls) para homologar la información de los diferentes equipos.

Se descargó el primer archivo a una carpeta destino previamente creado, la selección contenía un período de 7 días con mediciones a cada 15 minutos, después de la descarga se abrió el archivo en el software Microsoft Excel, la información está dividida en una serie de columnas que contienen diferentes datos climáticos, la validación consistió en revisar la hora de inicio y terminación del monitoreo, contrastar estos valores con los datos proporcionados por la estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional (México) más cercana y los datos proporcionados por el sitio de Internet Accuweather con información del Aeropuerto Internacional Carlos Rovirosa Pérez, encontrando un comportamiento muy similar en los tres puntos, a excepción de la velocidad del viento que siempre era mayor en el caso del aeropuerto; por otra parte se revisó la no duplicación de datos ni la ausencia de filas o columnas. El método para el análisis de la información consistió en separar el archivo en segmentos diarios, en diferentes pestañas por cada día, solamente dejando activos los valores de fecha, hora, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección de viento y radiación solar; de esta forma es posible crear un resumen con los valores de T máx, T min, T media, HR y Radiación Solar, para efectos de localizar el día tipo correspondiente a cada mes.

Monitor de estrés Térmico

El Monitor de Estrés Térmico funciona como Registrador de Datos, almacenando la información en una tarjeta de memoria SD. Previamente instalado el equipo, se procedió a realizar los ajustes necesarios: sincronizando fecha y hora con el teléfono Microsoft Lumia 520 (utilizado en todos los casos), seleccionar las unidades métricas y establecer la frecuencia de monitoreo (30 minutos). Para iniciar el registro de datos se presiona la tecla REC y posteriormente Data Logger, en esta primera prueba se dejó el equipo midiendo en un período de tres días, para después proceder a la descarga, que inicia deteniendo el registro de datos dejando presionado el botón Data Logger, en este momento es posible extraer la tarjeta de memoria.

Una vez extraída la tarjeta se inserta en una computadora para copiar o cortar el archivo llamado WBA 01001 que es un archivo en formato para Microsoft Excel, consecutivo, es decir, es posible grabar diferentes mediciones; en este caso, optaremos por cortar el archivo para evitar duplicar la información obtenida. Abierto el archivo aparecen los datos en diferentes columnas, ya que el equipo registra diferentes valores es necesario un proceso de filtrado, segregando los datos que nos son útiles: Fecha, Hora, Temperatura, Temperatura Radiante, Humedad Relativa. De igual forma el archivo base se dejó intacto, se crearon nuevas pestañas por días y se extrajo la información por segmentos, posteriormente se revisan los valores por filas comprobando que no haya interrupciones o filas duplicadas, así como la continuidad de los valores registrados. La operación del equipo es óptima y la descarga de datos es confiable.

Anemómetro de Hilo Térmico

A diferencia de los equipos anteriores, los anemómetros funcionan como la unidad de memoria para el registro de datos, es decir, deben desacoplarse del sitio de instalación para ser trasladados a una terminal de computadora.

Para la prueba de descarga, se ajustaron los valores de fecha, hora, unidades (métricas), y frecuencia de registro de datos: 30 minutos para todos los equipos, en el caso de la hora se sincronizó con el mismo teléfono Microsoft Lumia 520. El momento horario para dar inicio a la medición será el minuto 00 o el minuto 30 de cualquier hora, para que los valores coincidan en el mismo punto para todos los equipos y permita ensamblar todos los resultados.

Para iniciar el registro de datos se encendió el equipo, esperamos el período de calentamiento y presionamos la tecla REC durante 3 segundos, hecho esto la pantalla indica entonces que se ha iniciado el modo de registro de datos, establecimos un período de prueba de 3 días de observación. Al término de este período, se detuvo la función de registro de datos al presionar durante 3 segundos la tecla REC, el aviso de DataLog se desactiva de la pantalla LCD, después se apagó el equipo presionando la tecla OFF, desconectamos la base del equipo de la alimentación eléctrica y de la sonda telescópica. Posteriormente se conecta la base a la terminal de computadora mediante un cable USB y se abre la aplicación que permite descargar los datos o analizarlos en tiempo real, para este caso procedemos a descargar los datos, esperamos a que la aplicación reconozca el equipo y establezca comunicación, está confirmado cuando en la ventana del software Anemometer AP-V01 el botón de conexión cambia a color verde y en la pantalla LCD del equipo aparece el texto LINK. Para la descarga se presiona el botón Stop Upload de la función Data Logger, debe aparecer una nueva ventana donde se define el destino del archivo de descarga, aunque es importante mencionar que este paso es necesario repetirlo en varias ocasiones porque de manera constante genera un aviso de Error de Comunicación; cuando la descarga es exitosa es posible abrir el archivo que se encuentra en formato terminación CSV, para posteriormente convertirlo en un XLS.

En el caso de los anemómetros la información es más compacta, aunque de todas formas es necesario filtrarla, separando los segmentos por días en nuevas pestañas asignadas, y aislando la información útil para esta investigación: Fecha, Hora, Temperatura y Velocidad de Aire; se revisó que los datos fueran continuos, no duplicados y sin interrupciones, en este caso, se realizó una sumatoria de los promedios de velocidad de aire por día. Los datos de los anemómetros se contrastaron con los datos del Monitor de Estrés Térmico, fue factible establecer una correspondencia entre los tres equipos, aunque los tres indicaban temperaturas con variaciones de +/- 3 décimas de grado.

En este punto damos por terminado el período de pruebas y descarga de datos, concluyendo que los equipos funcionan correctamente, donde los valores coinciden con datos de instrumentos externos y mantienen una congruencia entre ellos. Aunque es importante destacar algunos puntos:

1. Los sensores están expuestos a diferentes factores ambientales, principalmente polvo y humedad, por lo que es necesario una limpieza periódica programada con los aditamentos sugeridos por el fabricante.
2. Los relojes internos de todos los equipos sufren desfases o variaciones en períodos extensos de medición, por lo que es necesario ajustarlos en cada descarga de datos.

3. Los anemómetros presentan dificultades en el proceso de descarga de datos, aunque no fue incidente para el desarrollo de la investigación, no reportamos pérdida de información o archivos corruptos.
4. Los cambios estacionales de horario no funcionan de forma automática en los equipos, los ajustes deben ser manuales para mantener la sincronización con el horario oficial.

Tablas de selección de Días Tipo e integración de datos de equipos de medición

Enero 2017

Tablas de selección de Día Tipo y Día Tipo con valores integrados.

Selección Día Tipo		Enero 2017				
Villahermosa, Tabasco, México.						
Estación Meteorológica Davis Pro II						
Día	Valores Históricos	T Máx °C	T Media °C	T Min °C	HR Media %	Radiación Wh/m2/día
		27.9	23.6	19.3	90	4194
11		27.7	23.7	19.8	82	3420
17		31.7	26.1	21.4	80	4219
Rangos de Selección						
Límite Alto		28.9	24.6	20.3	95	4404
Límite Bajo		26.9	22.6	18.3	86	3985

Día Tipo Integrado								
11 Enero 2017								
Estación Meteorológica Davis II						Anemómetro		WBGT
Hora	TA Ext. °C	Viento m/s	Dir. Viento Card.	Rad. Solar Wh/m2	HAB	HM	TA Int. °C	
					Vel. Aire m/s	Vel. Aire m/s		
1	21.0	1.68	ENE	0	0.10	0.12	20.5	
2	20.7	1.55	ENE	0	0.00	0.08	20.3	
3	20.7	1.55	ENE	0	0.00	0.09	20.1	
4	20.6	0.88	E	0	0.00	0.11	20.0	
5	20.2	0.43	ESE	0	0.00	0.03	19.6	
6	19.9	0.88	ESE	0	0.11	0.12	19.5	
7	19.8	0.53	E	2	0.00	0.26	19.5	
8	20.2	1.00	E	58	0.00	0.05	20.0	
9	21.7	1.43	E	214	0.00	0.31	21.9	
10	24.3	2.55	E	439	0.00	0.33	25.2	
11	25.8	3.13	E	494	0.10	0.63	27.2	
12	27.0	3.45	E	663	0.09	0.52	28.4	
13	27.7	3.48	E	600	0.11	0.46	29.6	
14	27.3	3.00	E	321	0.09	0.42	28.7	
15	27.6	2.88	E	268	0.00	0.41	28.8	
16	27.7	2.10	E	217	0.11	0.12	28.6	
17	27.3	1.98	E	113	0.13	0.55	28.0	
18	26.6	1.43	E	33	0.00	0.13	26.9	
19	25.7	1.30	E	0	0.00	0.13	25.6	
20	24.7	1.30	E	0	0.00	0.10	24.5	
21	23.9	1.65	ENE	0	0.11	0.04	23.6	
22	23.4	1.78	ENE	0	0.00	0.22	23.0	
23	22.8	1.68	E	0	0.12	0.07	22.5	
24	22.2	0.65	ESE	0	0.00	0.07	21.9	
Sumatoria Vel. Aire:		21.11			0.53	2.65		
Dirección Viento Predominante:				E				

Febrero 2017

Tablas de selección de Día Tipo y Día Tipo con valores integrados.

Selección Día Tipo		Febrero 2017				
Villahermosa, Tabasco, México.						
Estación Meteorológica Davis Pro II						
Día	Valores Históricos	T Máx °C	T Media °C	T Min °C	HR Media %	Radiación Wh/m2/día
		29.2	24.5	19.7	88	5000
2		29.5	24.8	20.8	87	3497
4		29.4	25.2	21.9	85	4869
Rangos de Selección						
Límite Alto		30.2	25.5	20.7	92	5250
Límite Bajo		28.2	23.5	18.7	84	4750

Día Tipo Integrado							
04 Febrero 2017							
Estación Meteorológica Davis II						Anemómetro	
Hora	TA Ext. °C	Viento m/s	Dir. Viento Card.	Rad. Solar Wh/m2	Anemómetro		TA Int. °C
					HAB Vel. Aire m/s	HM Vel. Aire m/s	
1	23.7	1.23	ESE	0	0.00	0.15	23.9
2	23.2	0.75	SE	0	0.00	0.13	23.4
3	23.1	0.00	SE	0	0.00	0.11	23.1
4	22.3	0.65	SE	0	0.00	0.17	22.5
5	21.9	0.30	SE	0	0.00	0.03	22.2
6	21.9	0.20	E	0	0.00	0.04	22.1
7	22.1	0.78	ENE	2	0.00	0.19	22.1
8	22.4	1.43	ENE	49	0.00	0.15	22.4
9	23.0	2.35	E	126	0.18	0.45	23.3
10	24.2	2.90	E	249	0.14	0.35	24.7
11	25.9	3.13	E	714	0.13	0.23	26.8
12	27.3	3.25	E	805	0.00	0.16	29.0
13	28.4	3.13	E	822	0.00	0.43	30.2
14	29.1	3.35	E	772	0.00	0.42	30.9
15	29.1	3.13	E	523	0.22	0.24	30.7
16	29.4	3.00	E	439	0.09	0.51	30.7
17	29.3	2.80	E	300	0.00	0.88	30.4
18	28.7	1.88	E	67	0.10	0.11	29.2
19	27.4	1.20	ENE	1	0.00	0.24	27.5
20	26.1	1.20	E	0	0.00	0.21	26.0
21	24.6	1.00	ENE	0	0.00	0.18	24.7
22	24.0	0.90	ENE	0	0.10	0.04	24.0
23	23.7	0.78	E	0	0.00	0.32	23.5
24	23.3	1.10	E	0	0.00	0.28	23.2
Sumatoria Vel. Aire:		20.20			0.47	2.97	
Dirección Viento Predominante:				E			

Marzo 2016

Tablas de selección de Día Tipo y Día Tipo con valores integrados.

Día Tipo Seleccionado		Marzo 2016				
Villahermosa, Tabasco, México.						
Estación Meteorológica Davis Pro II						
Día	Valores Históricos	T Máx °C	T Media °C	T Min °C	HR Media %	Radiación Wh/m2/día
		31.9	26.6	21.3	85	5889
7		32.0	26.5	21.8	82	5551
23		31.9	26.6	20.9	74	6483
Rangos de Selección						
Límite Alto		32.9	27.6	22.3	89	6183
Límite Bajo		30.9	25.6	20.3	81	5594

Día Tipo Integrado							
07 Marzo 2016							
Estación Meteorológica Davis II						Anemómetro	
Hora	TA Ext. °C	Viento m/s	Dir. Viento Card.	Rad. Solar Wh/m2	Anemómetro		TA Int. °C
					HAB Vel. Aire m/s	HM Vel. Aire m/s	
1	22.5	0.63	ENE	0	0.08	0.07	22.4
2	22.3	1.10	ENE	0	0.04	0.08	22.2
3	21.8	1.00	ENE	0	0.05	0.08	21.9
4	22.0	0.78	E	0	0.04	0.00	22.1
5	22.5	0.43	ESE	0	0.05	0.15	22.4
6	22.6	0.65	E	0	0.04	0.12	22.5
7	22.6	0.00	---	7	0.03	0.05	22.5
8	23.1	0.53	ESE	77	0.03	0.27	23.0
9	23.9	1.10	E	153	0.03	0.03	24.0
10	25.0	1.43	E	299	0.00	0.11	25.5
11	26.5	1.68	E	674	0.03	0.32	27.6
12	27.9	1.90	E	899	0.02	0.41	29.6
13	28.8	1.88	E	877	0.01	0.38	30.5
14	30.2	2.33	E	846	0.13	0.31	32.1
15	31.3	2.10	E	731	0.00	0.14	32.9
16	32.0	2.68	E	555	0.08	0.68	33.3
17	32.0	2.58	E	337	0.00	0.37	33.0
18	31.1	2.20	E	93	0.00	0.36	31.7
19	29.8	1.30	E	4	0.00	0.13	30.1
20	28.7	1.55	E	0	0.00	0.29	28.7
21	27.9	1.68	E	0	0.11	0.45	27.7
22	27.5	2.00	E	0	0.03	0.33	27.2
23	27.0	1.43	ESE	0	0.01	0.42	26.7
24	26.4	1.55	ESE	0	0.01	0.28	26.0
Sumatoria Vel. Aire:		34.45			0.39	2.89	
Dirección Viento Predominante:				E			

Abril 2017

Tablas de selección de Día Tipo y Día Tipo con valores integrados.

Selección Día Tipo		Abril 2017				
Villahermosa, Tabasco, México.						
Estación Meteorológica Davis Pro II						
Día	Valores Históricos	T Máx °C	T Media °C	T Min °C	HR Media %	Radiación Wh/m2/día
		33.9	28.5	23.1	82	6472
13		33.1	28.0	23.9	73	6567
15		34.2	28.5	24.0	74	6778
21		34.3	27.6	22.3	76	6165
Rangos de Selección						
Límite Alto		34.9	29.5	24.1	86	6796
Límite Bajo		32.9	27.5	22.1	78	6149

Día Tipo Integrado								
13 Abril 2017								
Estación Meteorológica Davis II						Anemómetro		WBGT
Hora	TA Ext. °C	Viento m/s	Dir. Viento Card.	Rad. Solar Wh/m2	Vel. Aire m/s		TA Int. °C	
					HAB	HM		
1	26.0	1.43	ESE	0	0.00	0.63	26.2	
2	25.8	1.20	E	0	0.00	0.24	25.9	
3	25.4	1.43	E	0	0.00	0.20	25.6	
4	25.0	1.23	E	0	0.00	0.33	25.1	
5	24.8	0.30	ENE	0	0.00	0.11	24.8	
6	24.3	0.68	E	0	0.24	0.06	24.2	
7	24.0	0.78	E	0	0.00	0.16	23.9	
8	23.9	0.90	ESE	27	0.00	0.03	23.9	
9	24.5	1.00	ESE	124	0.00	0.36	24.6	
10	26.7	1.68	E	445	0.00	0.53	27.2	
11	28.7	2.13	E	614	0.13	0.58	29.9	
12	29.8	2.80	E	789	0.00	0.59	31.8	
13	31.2	2.58	E	956	0.00	0.43	33.2	
14	32.4	2.80	E	945	0.00	0.43	34.3	
15	32.6	3.00	ENE	815	0.09	0.49	34.7	
16	33.1	2.80	E	757	0.00	0.12	35.1	
17	33.0	2.90	E	597	0.00	0.27	35.1	
18	32.9	2.45	E	359	0.09	0.40	34.4	
19	32.2	2.10	E	134	0.00	0.32	33.3	
20	29.8	1.20	SSW	8	0.10	0.19	30.9	
21	28.0	1.00	E	0	0.10	0.44	28.8	
22	27.1	1.30	E	0	0.10	0.30	27.5	
23	26.3	1.55	E	0	0.00	0.09	26.5	
24	25.5	1.43	E	0	0.00	0.38	25.8	
Sumatoria Vel. Aire:		40.63			0.41	3.81		
Dirección Viento Predominante:				E				

Mayo 2016

Tablas de selección de Día Tipo y Día Tipo con valores integrados.

Selección Día Tipo		Mayo 2016				
Villahermosa, Tabasco, México.						
Estación Meteorológica Davis Pro II						
Día	Valores Históricos	T Máx °C	T Media °C	T Min °C	HR Media %	Radiación Wh/m2/día
		35.1	29.6	24.2	82	6556
9		35.4	29.9	24.3	69	6324
Rangos de Selección						
Límite Alto		36.1	30.6	25.2	86	6883
Límite Bajo		34.1	28.6	23.2	78	6228

Día Tipo Integrado							
24 Mayo 2016							
Estación Meteorológica Davis II							
Hora	TA Ext. °C	Viento m/s	Dir. Viento Card.	Rad. Solar Wh/m2	Anemómetro		TA Int. °C
					HAB Vel. Aire m/s	HM Vel. Aire m/s	
1	30.5	2.13	E	0	0.00	0.23	30.5
2	29.8	1.43	E	0	0.00	0.12	29.8
3	28.9	1.33	E	0	0.00	0.11	29.1
4	29.0	0.90	ESE	0	0.00	0.24	28.8
5	29.1	0.65	SSW	0	0.00	0.04	28.6
6	28.8	0.43	E	0	0.02	0.09	28.4
7	28.8	0.55	E	4	0.02	0.15	28.2
8	29.0	1.10	E	85	0.00	0.16	28.9
9	29.7	1.30	E	280	0.00	0.48	30.1
10	31.5	1.20	E	480	0.00	0.45	32.1
11	33.6	1.10	NNE	645	0.00	0.28	34.1
12	35.3	1.00	E	770	0.00	0.34	36.4
13	37.1	1.00	E	845	0.00	0.52	38.2
14	37.5	1.65	E	865	0.00	0.43	39.4
15	37.8	1.90	E	834	0.00	0.30	40.0
16	38.0	2.10	E	713	0.00	0.65	40.1
17	38.3	2.58	E	547	0.00	0.31	40.0
18	37.8	2.20	E	338	0.00	0.11	39.5
19	37.3	1.78	E	137	0.03	0.17	38.5
20	35.5	0.90	E	16	0.00	0.29	36.4
21	33.6	0.90	E	0	0.03	0.23	34.4
22	32.9	1.00	E	0	0.12	0.27	33.3
23	31.9	1.10	E	0	0.00	0.06	32.3
24	30.8	1.30	E	0	0.26	0.30	31.4
Sumatoria Vel. Aire:		15.75			0.23	3.13	
Dirección Viento Predominante:				E			

Junio 2017

Tablas de selección de Día Tipo y Día Tipo con valores integrados.

Selección Día Tipo		Junio 2017				
Villahermosa, Tabasco, México.						
Estación Meteorológica Davis Pro II						
Día	Valores Históricos	T Máx °C	T Media °C	T Min °C	HR Media %	Radiación Wh/m2/día
		34.4	29.3	24.2	86	6389
16		34.4	28.5	24.4	86	6074
Rangos de Selección						
Límite Alto		35.4	30.3	25.2	90	6708
Límite Bajo		33.4	28.3	23.2	82	6069

Día Tipo Integrado								
16 Junio 2017								
Estación Meteorológica Davis II						Anemómetro		WBGT
Hora	TA Ext. °C	Viento m/s	Dir. Viento Card.	Rad. Solar Wh/m2	HAB	HM	TA Int. °C	
					Vel. Aire m/s	Vel. Aire m/s		
1	24.9	0.90	SSW	0	0.00	0.31	24.7	
2	24.4	0.40	SSW	0	0.00	0.08	24.6	
3	24.6	1.30	E	0	0.00	0.26	24.4	
4	24.8	0.90	E	0	0.00	0.13	24.4	
5	24.7	0.90	ENE	0	0.00	0.13	24.4	
6	24.4	0.40	ESE	0	0.00	0.03	24.3	
7	24.6	0.00	---	4	0.00	0.03	24.0	
8	25.7	0.40	ESE	82	0.00	0.05	25.2	
9	26.8	0.90	E	213	0.00	0.25	26.7	
10	28.5	1.30	E	484	0.00	0.33	28.7	
11	29.1	1.30	E	635	0.00	0.47	30.4	
12	30.4	0.90	E	770	0.00	0.14	32.1	
13	31.1	0.90	E	439	0.31	0.26	32.8	
14	32.8	1.30	E	930	0.00	0.34	34.2	
15	33.3	0.90	ENE	844	0.09	0.18	35.2	
16	34.2	0.90	SSE	509	0.12	0.36	35.7	
17	34.4	0.90	ENE	478	0.00	0.51	35.7	
18	33.8	0.90	ENE	500	0.09	0.17	35.6	
19	29.4	0.90	ENE	144	0.00	0.18	31.9	
20	29.3	0.40	ENE	42	0.12	0.18	30.4	
21	29.1	0.40	E	0	0.00	0.32	29.6	
22	28.3	0.40	ENE	0	0.00	0.10	28.9	
23	27.7	0.90	ESE	0	0.00	0.15	28.1	
24	27.8	0.90	ENE	0	0.00	0.21	27.6	
Sumatoria Vel. Aire:		19.30			0.36	2.56		
Dirección Viento Predominante:				E				

Julio 2017

Tablas de selección de Día Tipo y Día Tipo con valores integrados

Selección Día Tipo		Julio 2017				
Villahermosa, Tabasco, México.						
Estación Meteorológica Davis Pro II						
Día	Valores Históricos	T Máx °C	T Media °C	T Min °C	HR Media %	Radiación Whr/m2
		33.9	28.9	23.8	87	6667
2		34.4	28.1	24.5	86	5578
21		34.3	28.9	24.5	79	7160
Rangos de Selección						
Límite Alto		34.9	29.9	24.8	91	7000
Límite Bajo		32.9	27.9	22.8	83	6333

Día Tipo Integrado							
02 Julio 2017							
Estación Meteorológica Davis II						Anemómetro	WBG
Hora	TA Ext. °C	Viento m/s	Dir. Viento Card.	Rad. Solar Wh/m2	HAB	HM	TA Int. °C
					Vel. Aire m/s	Vel. Aire m/s	
1	27.2	0.90	E	0	0.00	0.32	27.4
2	27.1	1.30	ENE	0	0.00	0.40	27.2
3	27.2	1.30	E	0	0.00	0.45	27.1
4	27.1	1.80	ENE	0	0.09	0.30	27.1
5	27.2	1.30	E	0	0.00	0.10	27.0
6	27.1	0.90	E	0	0.00	0.07	27.0
7	26.9	1.30	E	2	0.00	0.24	26.9
8	27.3	1.30	E	66	0.09	0.25	27.2
9	27.8	1.80	E	107	0.00	0.23	27.9
10	29.7	2.20	E	381	0.09	0.41	29.9
11	31.1	2.70	E	714	0.11	0.77	31.9
12	32.3	2.70	E	818	0.10	0.45	33.6
13	32.9	2.70	E	677	0.17	0.30	34.8
14	33.8	3.10	E	949	0.00	0.50	35.3
15	34.4	3.10	E	924	0.00	0.56	36.4
16	34.4	3.10	ENE	764	0.00	0.37	36.8
17	24.7	3.10	E	162	0.00	0.83	31.2
18	24.5	1.30	N	6	0.00	0.24	26.6
19	24.8	1.30	E	7	0.15	0.28	25.7
20	25.3	1.30	ENE	1	0.00	0.44	25.3
21	25.5	1.30	ENE	0	0.00	0.23	25.4
22	25.7	1.80	E	0	0.00	0.14	25.4
23	25.5	1.30	E	0	0.00	0.36	25.3
24	25.6	1.30	E	0	0.00	0.13	25.3
Sumatoria Vel. Aire:		44.20			0.39	4.14	
Dirección Viento Predominante:				E			

Agosto 2016

Tablas de selección de Día Tipo y Día Tipo con valores integrados.

Selección Día Tipo		Agosto 2017				
Villahermosa, Tabasco, México.						
Estación Meteorológica Davis Pro II						
Día	Valores Históricos	T Máx °C	T Media °C	T Min °C	HR Media %	Radiación Whr/m2
		34.0	28.9	23.8	87	6361
1		34.4	29.3	23.7	79	5632
3		35.0	29.2	24.8	82	6751
12		34.0	28.2	24.1	82	5841
13		34.6	29.3	24.1	77	7103
Rangos de Selección						
Límite Alto		35.0	29.9	24.8	91	6679
Límite Bajo		33.0	27.9	22.8	83	6043

Día Tipo Integrado							
01 Agosto 2017							
Estación Meteorológica Davis II							
Hora	TA Ext. °C	Viento m/s	Dir. Viento Card.	Rad. Solar Wh/m2	Anemómetro		TA Int. °C
					HAB Vel. Aire m/s	HM Vel. Aire m/s	
1	23.7	3.10	SE	0	0.24	0.84	25.1
2	24.3	0.90	ESE	0	0.00	0.31	24.6
3	24.2	0.90	S	0	0.00	0.71	24.6
4	24.4	0.40	SSW	0	0.00	0.29	24.5
5	24.4	0.00	---	0	0.00	0.11	24.4
6	24.7	0.00	---	0	0.00	0.20	24.4
7	25.1	0.00	---	4	0.00	0.03	24.5
8	25.3	0.90	W	78	0.00	0.30	25.1
9	28.7	0.00	WSW	274	0.00	0.04	27.1
10	30.8	0.40	WSW	486	0.14	0.15	29.7
11	31.2	0.90	WSW	660	0.10	0.39	32.0
12	32.3	0.90	W	561	0.22	0.32	32.8
13	32.8	0.90	WNW	559	0.10	0.23	33.9
14	32.8	0.90	W	489	0.00	0.42	35.1
15	34.4	0.90	NE	638	0.00	0.18	35.1
16	34.2	1.30	E	661	0.18	0.23	35.6
17	34.2	2.20	E	558	0.09	0.53	35.7
18	34.2	1.80	E	422	0.00	0.49	35.7
19	32.9	1.30	ENE	207	0.35	0.19	34.9
20	30.9	0.90	ENE	35	0.00	0.10	32.8
21	30.3	0.40	ENE	0	0.09	0.06	31.3
22	29.8	0.40	ENE	0	0.00	0.16	30.5
23	29.2	1.30	ENE	0	0.00	0.47	30.0
24	28.7	1.80	E	0	0.09	0.10	29.3
Sumatoria Vel. Aire:		22.50			0.79	3.39	
Dirección Viento Predominante:				ENE			

Septiembre 2016

Tablas de selección de Día Tipo y Día Tipo con valores integrados.

Selección Día Tipo		Septiembre 2016				
Villahermosa, Tabasco, México.						
Estación Meteorológica Davis Pro II						
Día	Valores Históricos	T Máx °C	T Media °C	T Min °C	HR Media %	Radiación Wh/m2/día
		33.0	28.4	23.7	88	5583
5		34.3	29.1	24.6	79	5449
11		33.0	28.0	24.3	84	4636
15		33.0	27.9	24.5	85	3717
25		33.8	27.6	24.4	87	3884
26		32.3	27.6	24.4	86	4949
30		33.0	28.1	24.0	85	4827
Rangos de Selección						
Límite Alto		34.0	29.4	24.7	92	5863
Límite Bajo		32.0	27.4	22.7	84	5304

Día Tipo Integrado							
26 Septiembre 2016							
Estación Meteorológica Davis II							
Hora	TA Ext. °C	Viento m/s	Dir. Viento Card.	Rad. Solar Wh/m2	Anemómetro		WBGT °C
					HAB Vel. Aire m/s	HM Vel. Aire m/s	
1	24.4	0.43	S	0	0.00	0.02	24.6
2	24.6	0.00	---	0	0.10	0.23	24.5
3	24.8	0.00	S	0	0.00	0.00	24.6
4	24.9	0.43	E	0	0.00	0.05	24.8
5	24.8	0.00	SE	0	0.00	0.28	24.9
6	24.8	0.10	ESE	0	0.00	0.09	24.8
7	24.8	0.90	ESE	14	0.00	0.17	24.8
8	25.0	0.78	ESE	69	0.00	0.08	24.8
9	26.4	0.90	ESE	319	0.00	0.12	25.1
10	29.7	1.10	E	701	0.00	0.08	26.7
11	30.7	1.68	E	823	0.00	0.08	30.3
12	30.7	1.45	E	553	0.11	0.41	32.2
13	31.8	1.20	E	956	0.16	0.34	32.3
14	32.3	1.20	E	622	0.00	0.33	33.7
15	30.9	2.00	E	310	0.00	0.39	33.9
16	30.9	1.68	ESE	309	0.24	0.75	32.8
17	31.3	1.20	E	239	0.00	0.29	32.1
18	29.5	0.98	ENE	35	0.00	0.16	32.4
19	28.3	0.30	SW	0	0.00	0.40	30.5
20	28.0	1.10	SW	0	0.00	0.24	28.9
21	27.6	0.78	SSW	0	0.00	0.02	28.3
22	27.2	0.78	E	0	0.00	0.50	27.8
23	25.9	1.88	SE	0	0.00	0.30	27.4
24	24.7	1.33	0	0	0.00	0.35	26.3
Sumatoria Vel. Aire:		11.08			0.30	2.82	
Dirección Viento Predominante:				E			

Octubre 2016

Tablas de selección de Día Tipo y Día Tipo con valores integrados.

Selección Día Tipo		Octubre 2016				
Villahermosa, Tabasco, México.						
Estación Meteorológica Davis Pro II						
Día	Valores Históricos	T Máx °C	T Media °C	T Min °C	HR Media %	Radiación Wh/m2/día
		31.2	27.1	23.0	87	4861
27		31.3	26.3	23.3	83	4193
29		31.2	26.1	22.3	84	4835
30		31.6	26.5	23.6	86	4401
Rangos de Selección						
Límite Alto		32.2	28.1	24.0	91	5104
Límite Bajo		30.2	26.1	22.0	83	4618

Día Tipo Integrado							
29 Octubre 2016							
Estación Meteorológica Davis II						Anemómetro	
Hora	TA Ext. °C	Viento m/s	Dir. Viento Card.	Rad. Solar Wh/m2	HAB	HM	TA Int. °C
					Vel. Aire m/s	Vel. Aire m/s	
1	23.8	1.90	W	0	0.00	0.44	23.6
2	23.4	1.43	WSW	0	0.00	0.24	23.2
3	23.2	1.30	W	0	0.00	0.21	22.9
4	23.0	1.30	WSW	0	0.00	0.43	22.6
5	22.6	1.33	SW	0	0.00	0.06	22.4
6	22.4	1.10	SW	0	0.00	1.30	22.1
7	22.3	0.90	SW	0	0.00	0.18	22.0
8	22.4	1.43	SW	36	0.00	0.08	22.2
9	23.7	2.00	WSW	217	0.00	0.13	24.0
10	25.7	2.10	WSW	432	0.00	0.31	26.6
11	27.1	2.10	WSW	623	0.00	0.54	29.5
12	28.1	1.68	W	574	0.00	0.28	29.7
13	28.9	1.43	W	425	0.00	0.28	30.5
14	29.9	1.80	W	708	0.00	0.37	31.5
15	31.2	1.78	W	768	0.09	0.12	33.6
16	31.2	1.53	W	476	0.16	0.35	32.7
17	30.9	1.65	W	417	0.00	0.19	32.2
18	30.1	1.43	W	152	0.15	0.41	30.8
19	28.6	1.30	W	9	0.00	0.29	29.1
20	27.1	1.80	W	0	0.00	0.36	27.5
21	26.1	1.45	W	0	0.00	0.28	26.3
22	25.7	1.55	W	0	0.00	0.32	25.8
23	25.0	1.90	WSW	0	0.00	0.54	25.1
24	24.5	1.53	WSW	0	0.00	0.13	24.6
Sumatoria Vel. Aire:		18.84			0.20	3.89	
Dirección Viento Predominante:				W			

Noviembre 2016

Tablas de selección de Día Tipo y Día Tipo con valores integrados.

Selección Día Tipo		Noviembre 2016				
Villahermosa, Tabasco, México.						
Estación Meteorológica Davis Pro II						
Día	Valores Históricos	T Máx °C	T Media °C	T Min °C	HR Media %	Radiación Wh/m2/día
		29.8	25.7	21.5	88	4444
19		30.1	25.9	22.2	80	4330
20		29.5	24.7	21.3	84	3862
27		29.5	25.5	22.5	88	3033
Rangos de Selección						
Límite Alto		30.8	26.7	22.5	92	4667
Límite Bajo		28.8	24.7	20.5	84	4222

Día Tipo Integrado							
19 Noviembre 2016							
Estación Meteorológica Davis II							
Hora	TA Ext. °C	Viento m/s	Dir. Viento Card.	Rad. Solar Wh/m2	Anemómetro		WBGT TA Int. °C
					HAB Vel. Aire m/s	HM Vel. Aire m/s	
1	24.0	0.10	ENE	0	0.00	0.14	23.5
2	23.9	0.00	W	0	0.17	0.11	23.4
3	23.8	0.00	WNW	0	0.00	0.13	23.4
4	23.0	0.53	S	0	0.00	0.32	23.1
5	23.2	0.53	SW	0	0.00	0.32	22.7
6	22.8	0.63	ENE	7	0.00	0.12	22.9
7	23.9	0.10	SSE	160	0.00	0.09	22.8
8	26.2	0.00	---	383	0.00	0.06	23.8
9	27.5	0.98	E	449	0.00	0.34	26.0
10	27.9	1.55	E	421	0.23	0.51	27.9
11	28.4	2.45	E	664	0.11	0.26	29.2
12	29.4	1.90	E	812	0.12	0.40	30.5
13	30.1	2.23	E	733	0.09	0.39	31.1
14	29.7	1.78	E	292	0.00	0.79	32.6
15	29.6	1.55	E	258	0.10	0.18	31.2
16	29.4	1.33	E	144	0.11	0.31	30.6
17	27.5	0.78	E	8	0.00	0.13	30.0
18	26.1	0.40	NE	0	0.00	0.38	28.2
19	25.6	0.40	E	0	0.00	0.18	26.3
20	25.5	0.10	ENE	0	0.00	0.11	25.2
21	24.9	0.45	NW	0	0.00	0.01	24.9
22	24.3	0.30	NW	0	0.00	0.31	24.4
23	23.6	0.88	E	0	0.12	0.20	24.2
24	22.2	0.78	SSE	0	0.00	0.24	23.7
Sumatoria Vel. Aire:		19.70			0.51	2.99	
Dirección Viento Predominante:				E			

Diciembre 2016

Tablas de selección de Día Tipo y Día Tipo con valores integrados

Selección Día Tipo		Diciembre 2016				
Villahermosa, Tabasco, México.						
Estación Meteorológica Davis Pro II						
Día	Valores Históricos	T Máx °C	T Media °C	T Min °C	HR Media %	Radiación Wh/m2/día
		28.3	24.1	19.9	90	3861
9		27.6	24.9	22.2	91	2437
10		25.9	23.2	20.8	93	2217
11		28.6	24.5	22.1	89	2262
Rangos de Selección						
Límite Alto		29.3	25.1	20.9	95	4054
Límite Bajo		27.3	23.1	18.9	86	3668

Día Tipo Integrado							
09 Diciembre 2016							
Estación Meteorológica Davis II							
Hora	TA Ext. °C	Viento m/s	Dir. Viento Card.	Rad. Solar Wh/m2	Anemómetro		WBGT °C
					HAB Vel. Aire m/s	HM Vel. Aire m/s	
1	26.2	0.20	NNE	0	0.17	0.14	26.3
2	26.0	1.10	ENE	0	0.00	0.19	26.1
3	25.8	0.63	NE	0	0.00	0.52	26.0
4	25.9	0.30	E	0	0.25	0.12	25.9
5	25.9	0.53	ENE	0	0.00	0.12	26.0
6	25.3	1.23	ENE	6	0.00	0.12	25.8
7	24.2	0.55	N	56	0.18	0.24	25.4
8	25.2	0.30	W	162	0.10	0.02	24.6
9	26.8	0.65	W	325	0.15	0.13	25.1
10	26.6	1.90	W	304	0.00	0.23	27.0
11	27.5	1.55	W	417	0.09	0.38	27.8
12	27.6	2.00	WNW	469	0.00	0.66	28.4
13	26.2	1.98	W	239	0.24	0.74	28.6
14	26.3	2.10	W	331	0.13	0.90	27.5
15	25.0	2.33	W	102	0.35	0.55	27.4
16	24.1	2.00	W	26	0.00	0.27	26.1
17	23.7	1.80	W	2	0.20	0.94	24.6
18	23.6	1.43	W	0	0.00	0.15	24.0
19	23.3	1.43	W	0	0.11	0.08	23.7
20	23.0	1.43	W	0	0.44	0.43	23.4
21	22.9	1.68	W	0	0.29	0.55	23.1
22	22.7	1.78	W	0	0.11	0.36	22.9
23	22.7	1.68	W	0	0.00	0.66	22.8
24	22.2	1.33	N	0	0.00	0.04	22.8
Sumatoria Vel. Aire:		31.85			1.39	4.25	
Dirección Viento Predominante:				W			

Anexo 3: Simulaciones EPW

Enero 2017

Tabla de Simulaciones con EPW de mediciones.

Correspondencia entre Datos Medidos y Datos Simulados.				
11 Enero 2017				
Hora	Habitación (HAB)		Hueco Medio (HM)	
	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s
1	0.10	0.02	0.12	0.17
2	0.00	0.02	0.08	0.20
3	0.00	0.02	0.09	0.16
4	0.00	0.02	0.11	0.08
5	0.00	0.02	0.03	0.04
6	0.11	0.01	0.12	0.04
7	0.00	0.03	0.26	0.01
8	0.00	0.03	0.05	0.05
9	0.00	0.03	0.31	0.19
10	0.00	0.11	0.33	0.28
11	0.10	0.18	0.63	0.37
12	0.09	0.22	0.52	0.43
13	0.11	0.14	0.46	0.43
14	0.09	0.16	0.42	0.42
15	0.00	0.15	0.41	0.40
16	0.11	0.15	0.12	0.36
17	0.13	0.13	0.55	0.34
18	0.00	0.11	0.13	0.30
19	0.00	0.14	0.13	0.26
20	0.00	0.08	0.10	0.25
21	0.11	0.12	0.04	0.23
22	0.00	0.07	0.22	0.23
23	0.12	0.02	0.07	0.21
24	0.00	0.02	0.07	0.12
Coef. de Correlación (Pearson)	0.38		0.68	

Tabla 26 Correlación entre datos medidos y simulados: Enero 2017. Fuente: propia del autor.

Febrero 2017

Tabla de Simulaciones con EPW de mediciones.

Correspondencia entre Datos Medidos y Datos Simulados.				
04 Febrero 2017				
Hora	Habitación (HAB)		Hueco Medio (HM)	
	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s
1	0.00	0.02	0.15	0.07
2	0.00	0.02	0.13	0.03
3	0.00	0.01	0.11	0.02
4	0.00	0.02	0.17	0.05
5	0.00	0.02	0.03	0.03
6	0.00	0.03	0.04	0.03
7	0.00	0.02	0.19	0.03
8	0.00	0.02	0.15	0.01
9	0.18	0.02	0.45	0.15
10	0.14	0.08	0.35	0.26
11	0.13	0.21	0.23	0.40
12	0.00	0.23	0.16	0.46
13	0.00	0.17	0.43	0.48
14	0.00	0.21	0.42	0.52
15	0.22	0.18	0.24	0.51
16	0.09	0.20	0.51	0.51
17	0.00	0.15	0.88	0.45
18	0.10	0.09	0.11	0.38
19	0.00	0.05	0.24	0.30
20	0.00	0.07	0.21	0.26
21	0.00	0.14	0.18	0.24
22	0.10	0.12	0.04	0.22
23	0.00	0.06	0.32	0.20
24	0.00	0.02	0.28	0.16
Coef. de Correlación (Pearson)	0.28		0.55	

Tabla 27 Correlación entre datos medidos y simulados: Febrero 2017. Fuente: Propia del autor.

Marzo 2016

Tabla de Simulaciones con EPW de mediciones.

Correspondencia Mediciones a Datos Simulados				
07 Marzo 2016				
Hora	Habitación (HAB)		Hueco Medio (HM)	
	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s
1	0.08	0.09	0.07	0.22
2	0.04	0.01	0.08	0.20
3	0.05	0.02	0.08	0.17
4	0.04	0.02	0.00	0.12
5	0.05	0.02	0.15	0.01
6	0.04	0.02	0.12	0.03
7	0.03	0.02	0.05	0.04
8	0.03	0.02	0.27	0.04
9	0.03	0.02	0.03	0.09
10	0.00	0.10	0.11	0.20
11	0.03	0.17	0.32	0.32
12	0.02	0.15	0.41	0.39
13	0.01	0.08	0.38	0.42
14	0.13	0.05	0.31	0.43
15	0.00	0.04	0.14	0.43
16	0.08	0.04	0.68	0.43
17	0.00	0.04	0.37	0.39
18	0.00	0.04	0.36	0.34
19	0.00	0.03	0.13	0.28
20	0.00	0.03	0.29	0.25
21	0.11	0.02	0.45	0.23
22	0.03	0.02	0.33	0.22
23	0.01	0.02	0.42	0.16
24	0.01	0.02	0.28	0.10
Coef. de Correlación (Pearson)	-0.07		0.56	

Tabla 28 Correlación entre datos medidos y simulados: Marzo 2016. Fuente: Propia del autor.

Abril 2017

Tabla de Simulaciones con EPW de mediciones.

Correspondencia entre Datos Medidos y Datos Simulados.				
13 Abril 2017				
Hora	Habitación (HAB)		Hueco Medio (HM)	
	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s
1	0.00	0.03	0.63	0.01
2	0.00	0.02	0.24	0.08
3	0.00	0.02	0.20	0.14
4	0.00	0.04	0.33	0.17
5	0.00	0.02	0.11	0.07
6	0.24	0.00	0.06	0.05
7	0.00	0.01	0.16	0.05
8	0.00	0.02	0.03	0.06
9	0.00	0.01	0.36	0.04
10	0.00	0.14	0.53	0.17
11	0.13	0.03	0.58	0.26
12	0.00	0.04	0.59	0.30
13	0.00	0.05	0.43	0.34
14	0.00	0.05	0.43	0.36
15	0.09	0.05	0.49	0.42
16	0.00	0.05	0.12	0.39
17	0.00	0.05	0.27	0.38
18	0.09	0.05	0.40	0.33
19	0.00	0.04	0.32	0.29
20	0.10	0.03	0.19	0.17
21	0.10	0.03	0.44	0.22
22	0.10	0.02	0.30	0.22
23	0.00	0.02	0.09	0.21
24	0.00	0.09	0.38	0.19
Coef. de Correlación (Pearson)	-0.28		0.31	

Tabla 29 Correlación entre datos medidos y simulados: Abril 2017. Fuente: Propia del autor.

Mayo 2016

Tabla de Simulaciones con EPW de mediciones.

Correspondencia entre Datos Medidos y Datos Simulados.				
24 Mayo 2016				
Hora	Habitación (HAB)		Hueco Medio (HM)	
	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s
1	0.00	0.03	0.23	0.22
2	0.00	0.03	0.12	0.14
3	0.00	0.03	0.11	0.17
4	0.00	0.02	0.24	0.08
5	0.00	0.02	0.04	0.02
6	0.02	0.02	0.09	0.02
7	0.02	0.02	0.15	0.03
8	0.00	0.03	0.16	0.09
9	0.00	0.03	0.48	0.15
10	0.00	0.04	0.45	0.20
11	0.00	0.05	0.28	0.23
12	0.00	0.05	0.34	0.23
13	0.00	0.05	0.52	0.22
14	0.00	0.06	0.43	0.27
15	0.00	0.06	0.30	0.33
16	0.00	0.06	0.65	0.34
17	0.00	0.06	0.31	0.36
18	0.00	0.06	0.11	0.34
19	0.03	0.05	0.17	0.30
20	0.00	0.05	0.29	0.25
21	0.03	0.04	0.23	0.25
22	0.12	0.04	0.27	0.24
23	0.00	0.04	0.06	0.21
24	0.26	0.03	0.30	0.18
Coefficiente de Correlación (Pearson)	-0.17		0.44	

Tabla 30 Correlación entre datos medidos y simulados: Mayo 2016. Fuente: Propia del autor.

Junio 2017

Tabla de Simulaciones con EPW de mediciones.

Correspondencia entre Datos Medidos y Datos Simulados.				
16 Junio 2017				
Hora	Habitación (HAB)		Hueco Medio (HM)	
	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s
1	0.00	0.07	0.31	0.14
2	0.00	0.02	0.08	0.16
3	0.00	0.02	0.26	0.09
4	0.00	0.01	0.13	0.06
5	0.00	0.01	0.13	0.03
6	0.00	0.02	0.03	0.06
7	0.00	0.01	0.03	0.04
8	0.00	0.01	0.05	0.03
9	0.00	0.04	0.25	0.11
10	0.00	0.02	0.33	0.19
11	0.00	0.04	0.47	0.23
12	0.00	0.04	0.14	0.24
13	0.31	0.04	0.26	0.26
14	0.00	0.05	0.34	0.28
15	0.09	0.05	0.18	0.31
16	0.12	0.05	0.36	0.29
17	0.00	0.05	0.51	0.29
18	0.09	0.05	0.17	0.32
19	0.00	0.04	0.18	0.33
20	0.12	0.03	0.18	0.28
21	0.00	0.03	0.32	0.22
22	0.00	0.02	0.10	0.19
23	0.00	0.02	0.15	0.16
24	0.00	0.01	0.21	0.13
Coefficiente de Correlación (Pearson)		0.29		0.50

Tabla 31 Correlación entre datos medidos y simulados: junio 2017. Fuente: Propia del autor.

Julio 2017

Tabla de Simulaciones con EPW de mediciones.

Correspondencia entre Datos Medidos y Datos Simulados.				
02 Julio 2017				
Hora	Habitación (HAB)		Hueco Medio (HM)	
	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s
1	0.00	0.02	0.32	0.07
2	0.00	0.01	0.40	0.08
3	0.00	0.01	0.45	0.09
4	0.09	0.01	0.30	0.08
5	0.00	0.01	0.10	0.07
6	0.00	0.01	0.07	0.07
7	0.00	0.01	0.24	0.07
8	0.09	0.02	0.25	0.04
9	0.00	0.02	0.23	0.05
10	0.09	0.08	0.41	0.13
11	0.11	0.10	0.77	0.21
12	0.10	0.03	0.45	0.22
13	0.17	0.03	0.30	0.24
14	0.00	0.04	0.50	0.29
15	0.00	0.04	0.56	0.32
16	0.00	0.04	0.37	0.34
17	0.00	0.07	0.83	0.39
18	0.00	0.19	0.24	0.34
19	0.15	0.03	0.28	0.28
20	0.00	0.03	0.44	0.20
21	0.00	0.03	0.23	0.16
22	0.00	0.02	0.14	0.12
23	0.00	0.02	0.36	0.10
24	0.00	0.02	0.13	0.04
Coefficiente de Correlación (Pearson)	0.08		0.57	

Tabla 32 Correlación entre datos medidos y simulados: Julio 2017. Fuente: Propia del autor.

Agosto 2017

Tabla de Simulaciones con EPW de mediciones.

Correspondencia entre Datos Medidos y Datos Simulados.				
01 Agosto 2017				
Hora	Habitación (HAB)		Hueco Medio (HM)	
	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s
1	0.24	0.01	0.84	0.14
2	0.00	0.00	0.31	0.06
3	0.00	0.02	0.71	0.08
4	0.00	0.01	0.29	0.02
5	0.00	0.01	0.11	0.04
6	0.00	0.01	0.20	0.04
7	0.00	0.01	0.03	0.05
8	0.00	0.03	0.30	0.03
9	0.00	0.03	0.04	0.03
10	0.14	0.04	0.15	0.11
11	0.10	0.04	0.39	0.20
12	0.22	0.04	0.32	0.23
13	0.10	0.02	0.23	0.27
14	0.00	0.02	0.42	0.28
15	0.00	0.03	0.18	0.26
16	0.18	0.03	0.23	0.31
17	0.09	0.03	0.53	0.35
18	0.00	0.03	0.49	0.33
19	0.35	0.03	0.19	0.31
20	0.00	0.03	0.10	0.29
21	0.09	0.13	0.06	0.24
22	0.00	0.06	0.16	0.21
23	0.00	0.02	0.47	0.20
24	0.09	0.02	0.10	0.21
Coefficiente de Correlación (Pearson)	0.15		0.12	

Tabla 33 Correlación entre datos medidos y simulados: Agosto 2017. Fuente: Propia del autor.

Septiembre 2016

Tabla de Simulaciones con EPW de mediciones.

Correspondencia entre Datos Medidos y Datos Simulados.				
26 Septiembre 2016				
Hora	Habitación (HAB)		Hueco Medio (HM)	
	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s
1	0.00	0.01	0.02	0.09
2	0.10	0.02	0.23	0.08
3	0.00	0.01	0.00	0.03
4	0.00	0.01	0.05	0.03
5	0.00	0.02	0.28	0.07
6	0.00	0.01	0.09	0.05
7	0.00	0.02	0.17	0.06
8	0.00	0.01	0.08	0.04
9	0.00	0.13	0.12	0.15
10	0.00	0.03	0.08	0.25
11	0.00	0.04	0.08	0.32
12	0.11	0.04	0.41	0.36
13	0.16	0.05	0.34	0.38
14	0.00	0.05	0.33	0.38
15	0.00	0.04	0.39	0.38
16	0.24	0.04	0.75	0.36
17	0.00	0.04	0.29	0.30
18	0.00	0.03	0.16	0.29
19	0.00	0.03	0.40	0.25
20	0.00	0.02	0.24	0.17
21	0.00	0.02	0.02	0.13
22	0.00	0.02	0.50	0.12
23	0.00	0.02	0.30	0.11
24	0.00	0.02	0.35	0.09
Coefficiente de Correlación (Pearson)	0.16		0.51	

Tabla 34 Correlación entre datos medidos y simulados: Septiembre 2016. Fuente: Propia del autor.

Octubre 2016

Tabla de Simulaciones con EPW de mediciones.

Correspondencia entre Datos Medidos y Datos Simulados.				
29 Octubre 2016				
Hora	Habitación (HAB)		Hueco Medio (HM)	
	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s
1	0.00	0.02	0.44	0.10
2	0.00	0.02	0.24	0.12
3	0.00	0.02	0.21	0.11
4	0.00	0.01	0.43	0.04
5	0.00	0.02	0.06	0.08
6	0.00	0.03	1.30	0.12
7	0.00	0.02	0.18	0.10
8	0.00	0.02	0.08	0.12
9	0.00	0.02	0.13	0.04
10	0.00	0.17	0.31	0.22
11	0.00	0.03	0.54	0.27
12	0.00	0.05	0.28	0.34
13	0.00	0.05	0.28	0.36
14	0.00	0.05	0.37	0.40
15	0.09	0.05	0.12	0.43
16	0.16	0.04	0.35	0.43
17	0.00	0.04	0.19	0.42
18	0.15	0.04	0.41	0.42
19	0.00	0.04	0.29	0.35
20	0.00	0.04	0.36	0.30
21	0.00	0.08	0.28	0.28
22	0.00	0.11	0.32	0.23
23	0.00	0.08	0.54	0.15
24	0.00	0.01	0.13	0.08
Coefficiente de Correlación (Pearson)		-0.02		-0.04

Tabla 35 Correlación entre datos medidos y simulados: Octubre 2016. Fuente: Propia del autor.

Noviembre 2016

Tabla de Simulaciones con EPW de mediciones.

Correspondencia entre Datos Medidos y Datos Simulados.				
19 Noviembre 2016				
Hora	Habitación (HAB)		Hueco Medio (HM)	
	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s
1	0.00	0.02	0.14	0.02
2	0.17	0.02	0.11	0.06
3	0.00	0.02	0.13	0.07
4	0.00	0.01	0.32	0.05
5	0.00	0.01	0.32	0.06
6	0.00	0.01	0.12	0.04
7	0.00	0.16	0.09	0.27
8	0.00	0.18	0.06	0.35
9	0.00	0.15	0.34	0.38
10	0.23	0.12	0.51	0.40
11	0.11	0.17	0.26	0.45
12	0.12	0.16	0.40	0.47
13	0.09	0.12	0.39	0.47
14	0.00	0.07	0.79	0.42
15	0.10	0.04	0.18	0.37
16	0.11	0.03	0.31	0.31
17	0.00	0.03	0.13	0.28
18	0.00	0.06	0.38	0.26
19	0.00	0.10	0.18	0.21
20	0.00	0.04	0.11	0.17
21	0.00	0.04	0.01	0.15
22	0.00	0.02	0.31	0.13
23	0.12	0.02	0.20	0.11
24	0.00	0.02	0.24	0.11
Coefficiente de Correlación (Pearson)	0.19		0.48	

Tabla 36 Correlación entre datos medidos y simulados: Noviembre 2016. Fuente: Propia del autor.

Diciembre 2016

Tabla de Simulaciones con EPW de mediciones.

Correspondencia entre Datos Medidos y Datos Simulados.				
09 Diciembre 2016				
Hora	Habitación (HAB)		Hueco Medio (HM)	
	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s	Anemómetro Vel. m/s	Sim. EPW Sitio Vel. m/s
1	0.17	0.02	0.14	0.08
2	0.00	0.01	0.19	0.05
3	0.00	0.02	0.52	0.09
4	0.25	0.02	0.12	0.11
5	0.00	0.02	0.12	0.10
6	0.00	0.00	0.12	0.02
7	0.18	0.01	0.24	0.01
8	0.10	0.10	0.02	0.21
9	0.15	0.13	0.13	0.26
10	0.00	0.13	0.23	0.32
11	0.09	0.09	0.38	0.33
12	0.00	0.15	0.66	0.39
13	0.24	0.15	0.74	0.38
14	0.13	0.15	0.90	0.36
15	0.35	0.17	0.55	0.34
16	0.00	0.16	0.27	0.29
17	0.20	0.14	0.94	0.25
18	0.00	0.05	0.15	0.20
19	0.11	0.02	0.08	0.19
20	0.44	0.02	0.43	0.17
21	0.29	0.02	0.55	0.15
22	0.11	0.02	0.36	0.14
23	0.00	0.02	0.66	0.11
24	0.00	0.12	0.04	0.21
Coefficiente de Correlación (Pearson)	0.03		0.46	

Tabla 37 Correlación entre datos medidos y simulados: Diciembre 2016. Fuente: Propia del autor.

Anexo 4: Reporte Fotográfico del experimento



Figura 15 Fabricación de la estructura interior del Modelo Experimental. Fuente: Propia del autor.



Figura 14 Detalle de los perfiles galvanizados de la habitación del Modelo Experimental. Fuente: Propia del autor.



Figura 17 Detalle de construcción del Hueco Medio del Modelo Experimental. Fuente: Propia del autor.



Figura 16 Instalación de los paneles exteriores de GlassRey en el Modelo Experimental. Fuente: Propia del autor.

La estructura interior de los cerramientos se construye con perfiles galvanizados.

En la foto superior se aprecia como el termo-higrómetro se encuentra a 2 metros de altura sobre el nivel de piso terminado, como lo indica su normativa.

Hueco Medio

El material que se utiliza para las superficies exteriores tiene características resistentes a la humedad.

En la fotografía lateral se documenta el proceso constructivo de la abertura inferior de la chimenea solar.



Figura 19 Fabricación de la cubierta de la habitación del Modelo Experimental. Fuente: Propia del autor.



Figura 18 Mástil de fijación de la suite de sensores de la estación meteorológica. Fuente: Propia del autor.

Cubierta de habitación

La cubierta se resolvió utilizando un doble sistema de perfil para obtener una superficie nivelada y rectangular en el interior y por el exterior una ligera pendiente para los escurrimientos naturales de la precipitación pluvial.

Estación Meteorológica Davis

En la foto del lado izquierdo es posible apreciar el mástil que soporta la suite de sensores de medición de la estación meteorológica.

En la foto debajo, el detalle del piranómetro.



Figura 20 Sensor de radiación sola de la estación meteorológica Davis. Fuente: Propia del autor.

Figura 22 Fijación de los paneles de malla cemento en el interior de la torre de la chimenea solar. Fuente: Propia del autor.



Figura 21 Vista del hueco medio (HM) desde el interior de la chimenea solar (CHS). Fuente: Propia del autor.



Chimenea Solar

Foto superior: instalación de paneles aislantes en el interior de los cerramientos de la torre de la chimenea.

Foto inferior: las superficies interiores de la torre se fabrican con paneles de mortero ligero a base de cemento portland.

Figura 25 Aplicación de pasta Basecoat en el interior de la chimenea solar (CHS). Fuente: Propia del autor.



Figura 23 Colocación de los vidrios transparentes en la fachada sur de la chimenea solar (CHS). Fuente: Propia del autor.



Figura 24 Aplicación de acabados de color selectivo en el interior de la chimenea solar (CHS). Fuente: Propia del autor.

Figura 26 Detalle de la fachada sur de la chimenea solar (CHS). Fuente: Propia del autor.



Instrumentación

Foto superior detalle del hueco de salida en la parte superior de la chimenea solar.

Foto intermedia: instalación de equipos de medición: anemómetro y monitor de estrés térmico.

Foto inferior 1: limpieza del anemómetro de la estación meteorológica.

Foto inferior 2: detalle del hueco de entrada en la habitación y colocación de goteros exteriores.

Figura 27 Etapa de pruebas de los instrumentos de medición. Fuente: Propia del autor.



Figura 28 Limpieza del anemómetro de la estación meteorológica Davis. Fuente: Propia del autor.

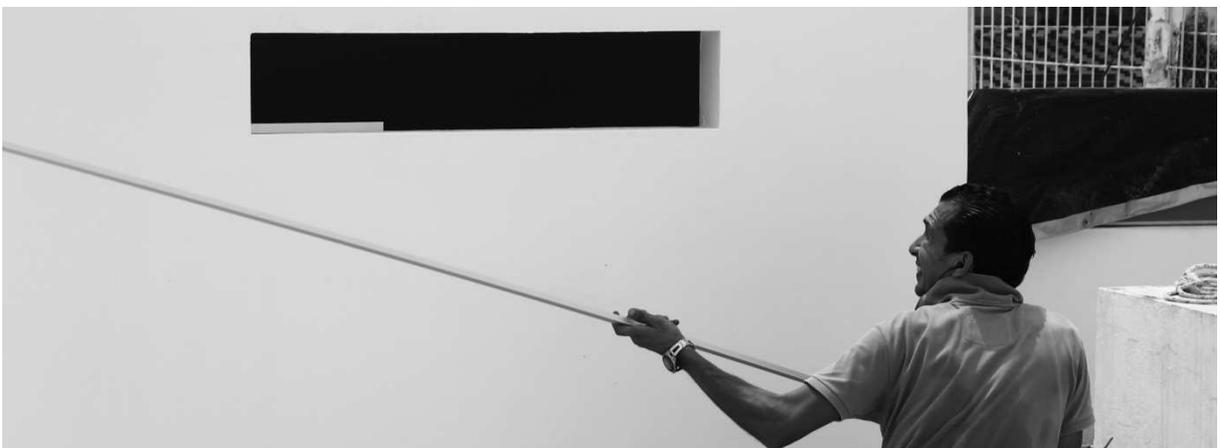
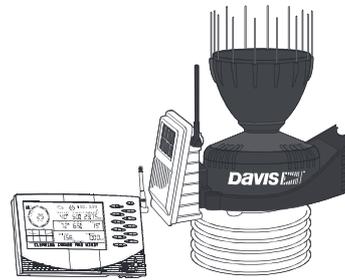


Figura 29 Colocación de goteros en diferentes puntos del Modelo Experimental. Fuente: Propia del autor.

Anexo 5: Fichas técnicas equipos de medición

Wireless Vantage Pro2™ & Vantage Pro2™ Plus Stations

(Including Fan-Aspirated Models)



6152 6162
6153 6163

Vantage Pro2™ (6152, 6153) and Vantage Pro2™ Plus (6162, 6163) Wireless Weather Stations include two components: the Integrated Sensor Suite (ISS) which houses and manages the external sensor array, and the console which provides the user interface, data display, and calculations. The ISS and Vantage Pro2 console communicate via an FCC-certified, license-free, spread-spectrum frequency-hopping (FHSS) transmitter and receiver. User-selectable transmitter ID codes allow up to eight stations to coexist in the same geographic area. The frequency hopping spread spectrum technology provides greater communication strength over longer distances and areas of weaker reception. The Wireless Vantage Pro2 Plus weather station includes two additional sensors that are optional on the Vantage Pro2: the UV sensor and the solar radiation sensor.

The console may be powered by batteries or by the included AC-power adapter. The wireless ISS is solar powered with a battery backup. Use WeatherLink® for Vantage Pro2 and Vantage Vue® to let your weather station interface with a computer, to log weather data, and to upload weather information to the internet.

The 6152 and 6162 rely on passive shielding to reduce solar-radiation induced temperature errors in the outside temperature sensor readings. The Fan-aspirated 6153 and 6163 combine passive shielding with a solar-powered fan that draws outside air in over the temperature and humidity sensors, providing a much more accurate temperature reading than that available using passive shielding alone.

Integrated Sensor Suite (ISS)

(Includes product numbers: 6152, 6153, 6162, 6163, 6322, 6323, 6327 & 6328)

Operating Temperature	.....-40° to +150°F (-40° to +65°C)
Non-operating Temperature	.....-40° to +158°F (-40° to +70°C)
Current Draw (ISS SIM only)	.....0.14 mA (average), 30 mA (peak) at 4 to 6 VDC
Solar Power Panel	.....0.5 Watts (ISS SIM), plus 0.75 Watts (Fan-Aspirated)
Battery (ISS SIM /Fan-Aspirated)	.....CR-123 3-Volt Lithium cell / 2 - 1.2 Volt NiMH C-cells
Battery Life (3-Volt Lithium cell)	.....8 months without sunlight - greater than 2 years depending on solar charging
Battery Life (NiMH C-cells, Fan-Aspirated)	.....Up to 2 years
Fan Aspiration Rate (Fan-Aspirated only)	
Intake Flow Rate, full sun	.....190 feet/min. (0.9 m/s)
Intake Flow Rate, battery only	.....80 feet/min. (0.4 m/s)
Sensor Chamber Flow Rate, full sun	.....500 feet/min. (2.5 m/s)
Sensor Chamber Flow Rate, battery only	.....180 feet/min. (0.9 m/s)
Connectors, Sensor	.....Modular RJ-11
Cable Type	.....4-conductor, 26 AWG
Cable Length, Anemometer	.....40 feet (12 m) (included) 240 feet (73 m) (maximum recommended)

Note: Maximum displayable wind decreases as the length of cable increases. At 140' (42 m) of cable, the maximum wind speed displayed is 135 mph (60 m/s); at 240' (73 m), the maximum wind speed displayed is 100 mph (34 m/s).

Wind Speed Sensor	.....Solid state magnetic sensor
Wind Direction Sensor	.....Wind vane with potentiometer
Rain Collector Type	.....Tipping bucket, 0.01" per tip (0.2 mm with metric rain adapter), 33.2 in ² (214 cm ²) collection area
Temperature Sensor Type	.....PN Junction Silicon Diode
Relative Humidity Sensor Type	.....Film capacitor element
Housing Material	.....UV-resistant ABS, polypropylene

ISS Dimensions (not including anemometer or bird spikes):

Wireless Vantage Pro2™

Vantage Pro2 with Standard Rad Shield	14.0" x 9.4" x 14.5" (356 mm x 239 mm x 368 mm)
Vantage Pro2 with Fan-Aspirated Rad Shield	20.8" x 9.4" x 16.0" (528 mm x 239 mm x 406 mm)
Vantage Pro2 Plus with Standard Rad Shield	14.3" x 9.7" x 14.5" (363 mm x 246 mm x 368 mm)
Vantage Pro2 Plus with Fan-Aspirated Rad Shield	21.1" x 9.7" x 16.0" (536 mm x 246 mm x 406 mm)

Console*(Includes product number 6312)*

Console Operating Temperature	+32° to +140°F (0° to +60°C)
Non-Operating (Storage) Temperature	+14° to +158°F (-10° to +70°C)
Current Draw	0.9 mA average, 30 mA peak, (add 120 mA for display lamps, add 0.125 mA for each optional wireless transmitter received by the console) at 4 - 6 VDC
AC Power Adapter	5 VDC, 300 mA, regulated
Batteries	3 C-cells
Battery Life	up to 9 months
Connectors	Modular RJ-11
Housing Material	UV-resistant ABS plastic
Console Display Type	LCD Transflective
Display Backlight	LEDs
Console Dimensions	
Console with antenna down (L x H x D)	10.625" x 6.125" x 1.625" (270 mm x 156 mm x 41 mm)
Console with antenna extended up (L x H x D)	10.625" x 9.625" x 1.625" (270 mm x 245 mm x 41 mm)
Display (L x H)	5.94" x 3.375" (151 mm x 86 mm)
Weight (with batteries)	1.88 lbs. (.85 kg)

Data Displayed on Console

Data display categories are listed with General first, then in alphabetical order.

General

Historical Data	Includes the past 24 values listed unless otherwise noted; all can be cleared and all totals reset
Daily Data	Includes the earliest time of occurrence of highs and lows; period begins/ends at 12:00 am
Monthly Data	Period begins/ends at 12:00 am on the first of the month
Yearly Data	Period begins/ends at 12:00 am on the first of January unless otherwise noted
Current Display Data	Current display data describes the current reading for each weather variable. In most cases, the variable lists the most recently updated reading or calculation. Some current variable displays can be adjusted so there is an offset for the reading
Current Graph Data	Current graph data appears in the right-most column in the console graph and represents the latest value within the last period on the graph; totals can be set or reset. Display intervals vary. Examples include: Instant, 15-min., and Hourly Reading; Daily, Monthly, High and Low
Graph Time Interval	1 min., 10 min., 15 min., 1 hour, 1 day, 1 month, 1 year (user-selectable, availability depends upon variable selected)
Graph Time Span	24 Intervals + Current Interval (see Graph Intervals to determine time span)
Graph Variable Span (Vertical Scale)	Automatic (varies depending upon data range); Maximum and Minimum value in range appear in ticker
Alarm Indication	Alarms sound for only 2 minutes (time alarm is always 1 minute) if operating on battery power. Alarm message is displayed in ticker as long as threshold is met or exceeded. Alarms can be silenced (but not cleared) by pressing the DONE key.
Transmission Interval	Varies with transmitter ID code from 2.25 seconds (#1=shortest), to 3 seconds (#8=longest)
Update Interval	Varies with sensor - see individual sensor specs

Barometric Pressure

Resolution and Units	0.01" Hg, 0.1 mm Hg, 0.1 hPa/mb (user-selectable)
Range	16.00" to 32.50" Hg, 410 to 820 mm Hg, 540 to 1100 hPa/mb
Elevation Range	-999' to +15,000' (-600 m to 4570 m) (Note that console screen limits entry of lower elevation to -999' when using feet as elevation unit.)
Uncorrected Reading Accuracy	±0.03" Hg (±0.8 mm Hg, ±1.0 hPa/mb) (at room temperature)
Sea-Level Reduction Equation Used	United States Method employed prior to use of current "R Factor" method
Equation Source	Smithsonian Meteorological Tables
Equation Accuracy	±0.01" Hg (±0.3 mm Hg, ±0.3 hPa/mb)
Elevation Accuracy Required	±10' (3m) to meet equation accuracy specification
Overall Accuracy	±0.03" Hg (±0.8 mm Hg, ±1.0 hPa/mb)
Trend (change in 3 hours)	Change 0.06" (2 hPa/mb, 1.5 mm Hg) = Rapidly Change 0.02" (0.7hPa/mb, 0.5 mm Hg)= Slowly
Trend Indication	5 position arrow: Rising (rapidly or slowly), Steady, or Falling (rapidly or slowly)
Update Interval	1 minute or when console BAR key is pressed twice
Current Display	Instant
Current Graph Data	Instant, 15-min., and Hourly Reading; Daily, Monthly, High and Low
Historical Graph Data	15-min. and Hourly Reading; Daily, Monthly Highs and Lows
Alarms	High Threshold from Current Trend for Storm Clearing (Rising Trend) Low Threshold from Current Trend for Storm Warning (Falling Trend)
Range for Rising and Falling Trend Alarms	0.01 to 0.25" Hg (0.1 to 6.4 mm Hg, 0.1 to 8.5 hPa/mb)

Clock

Resolution	1 minute
Units	Time: 12 or 24 hour format (user-selectable)
Date	US or International format (user-selectable)
Accuracy	±8 seconds/month
Adjustments	Time: Automatic Daylight Savings Time (for users in North America and Europe that observe it in AUTO mode, MANUAL setting available for all other areas) Date: Automatic Leap Year
Alarms	Once per day at set time when active

Dewpoint (calculated)

Resolution and Units	1°F or 1°C (user-selectable) °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C
Range	-105° to +130°F (-76° to +54°C)
Accuracy	±2°F (±1°C) (typical)
Update Interval	10 to 12 seconds
Source	World Meteorological Organization (WMO)
Equation Used	WMO Equation with respect to saturation of moist air over water
Variables Used	Instant Outside Temperature and Instant Outside Relative Humidity
Current Display Data	Instant Calculation
Current Graph Data	Instant Calculation; Daily, Monthly High and Low
Historical Graph Data	Hourly Calculations; Daily, Monthly Highs and Lows
Alarms	High and Low Threshold from Instant Calculation

Evapotranspiration (calculated, requires solar radiation sensor)

Resolution and Units	0.01" or 0.1 mm (user-selectable)
Range	Daily to 32.67" (832.1 mm); Monthly & Yearly to 199.99" (1999.9 mm)
Accuracy	Greater of 0.01" (0.25 mm) or ±5%, Reference: side-by-side comparison against a CIMIS ET weather station
Update Interval	1 hour
Calculation and Source	Modified Penman Equation as implemented by CIMIS (California Irrigation Management Information System) including Net Radiation calculation
Current Display Data	Latest Hourly Total Calculation
Current Graph Data	Latest Hourly Total Calculation, Daily, Monthly, Yearly Total
Historical Graph Data	Hourly, Daily, Monthly, Yearly Totals
Alarm	High Threshold from Latest Daily Total Calculation

Wireless Vantage Pro2™**Forecast**

Variables Used	Barometric Reading & Trend, Wind Speed & Direction, Rainfall, Temperature, Humidity, Latitude & Longitude, Time of Year
Update Interval	1 hour
Display Format	Icons on top center of display; detailed message in ticker at bottom
Variables Predicted	Sky Condition, Precipitation, Temperature Changes, Wind Direction and Speed

Heat Index (calculated)

Resolution and Units	1°F or 1°C (user-selectable) °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C
Range	-40° to +165°F (-40° to +74°C)
Accuracy	±2°F (±1°C) (typical)
Update Interval	10 to 12 seconds
Source	United States National Weather Service (NWS)/NOAA
Formulation Used	Steadman (1979) modified by US NWS/NOAA and Davis Instruments to increase range of use
Variables Used	Instant Outside Temperature and Instant Outside Relative Humidity
Current Display Data	Instant Calculation
Current Graph Data	Instant Calculation; Daily, Monthly High
Historical Graph Data	Hourly Calculations; Daily, Monthly Highs
Alarm	High Threshold from Instant Calculation

Humidity

Inside Relative Humidity (sensor located in console)

Resolution and Units	1%
Range	1 to 100% RH
Accuracy	±3%
Update Interval	1 minute
Current Display Data	Instant (user-adjustable offset available)
Current Graph Data	Instant; Hourly Reading; Daily, Monthly High and Low
Historical Graph Data	Hourly Readings; Daily, Monthly Highs and Lows
Alarms	High and Low Threshold from Instant Reading

Outside Relative Humidity (sensor located in ISS)

Resolution and Units	1%
Range	1 to 100% RH
Accuracy	±2%
Drift	<0.25% per year
Update Interval	50 seconds to 1 minute
Current Display Data	Instant (user-adjustable offset available)
Current Graph Data	Instant; Hourly Reading; Daily, Monthly High and Low
Historical Graph Data	Hourly Readings; Daily, Monthly Highs and Lows
Alarms	High and Low Threshold from Instant Reading

Extra Outside Relative Humidity (sensor located inside Temperature/Humidity Station)

Resolution and Units	1%
Range	1 to 100% RH
Accuracy	±2%
Drift	<0.25% per year
Update Interval	50 seconds to 1 minute
Current Display Data	Instant Reading (user adjustable)
Alarms	High and Low Threshold from Instant Reading

Leaf Wetness (requires leaf wetness sensor)

Resolution	1
Range.	0 to 15
Dry/Wet Threshold	User-selectable
Accuracy	±0.5
Update Interval	46 to 54 seconds
Current Graph Data	Instant Reading; Daily High and Low; Monthly High
Historical Graph Data	Hourly Readings; Daily Highs and Lows; Monthly Highs
Alarms	High and Low Thresholds from Instant Reading

Moon Phase

Console Resolution.	1/8 (12.5%) of a lunar cycle, 1/4 (25%) of lighted face on console
WeatherLink Resolution	0.09% of a lunar cycle, 0.18% of lighted face maximum (depends on screen resolution)
Range.	New Moon, Waxing Crescent, First Quarter, Waxing Gibbous, Full Moon, Waning Gibbous, Last Quarter, Waning Crescent
Accuracy	±38 minutes

Rainfall

Resolution and Units.	0.01" or 0.2 mm (user-selectable) (1 mm at totals ≥ 2000 mm)
Daily/Storm Rainfall Range	0 to 99.99" (0 to 999.8 mm)
Monthly/Yearly/Total Rainfall Range	0 to 199.99" (0 to 6553 mm)
Accuracy	For rain rates up to 4"/hr (100 mm/hr): ±4% of total or ± one tip of the bucket (0.01"/0.2mm), whichever is greater.
Update Interval	20 to 24 seconds
Storm Determination Method	0.02" (0.5 mm) begins a storm event, 24 hours without further accumulation ends a storm event
Current Display Data	Totals for Past 15-min
Current Graph Data	Totals for Past 15-min, Past 24-hour, Daily, Monthly, Yearly (start date user-selectable) and Storm (with begin date); Umbrella is displayed when 15-minute total exceeds zero
Historical Graph Data	Totals for 15-min, Daily, Monthly, Yearly (start date user-selectable) and Storm (with begin and end dates)
Alarms	High Threshold from Latest Flash Flood (15-min. total, default is 0.50", 12.7 mm), 24-Hour Total, Storm Total,
Range for Rain Alarms	0 to 99.99" (0 to 999.7 mm)

Rain Rate

Resolution and Units.	0.01" or 0.1 mm (user-selectable) at typical rates (see Fig. 4 and 5)
Range.	0, 0.04"/hr (1 mm/hr) to 96"/hr (0 to 2438 mm/hr)
Accuracy	±5% for rates less than 5" per hour (127 mm/hr)
Update Interval	20 to 24 seconds
Calculation Method.	Measures time between successive tips of tipping bucket. Elapsed time greater than 15 minutes or only one tip of the rain collector constitutes a rain rate of zero.
Current Display Data	Instant
Current Graph Data	Instant and 1-min. Reading; Hourly, Daily, Monthly and Yearly High
Historical Graph Data	1-min Reading; Hourly, Daily, Monthly and Yearly Highs
Alarm	High Threshold from Instant Reading

Soil Moisture (requires soil moisture sensor)

Resolution	1 cb
Range.	0 to 200 cb
Update Interval	77 to 90 seconds
Current Graph Data	Instant Reading; Daily and Monthly High and Low
Historical Graph Data	Hourly Readings; Daily and Monthly Highs and Lows
Alarms	High and Low Thresholds from Instant Reading

Wireless Vantage Pro2™**Solar Radiation (requires solar radiation sensor)**

Resolution and Units	1 W/m ²
Range	0 to 1800 W/m ²
Accuracy	±5% of full scale (Reference: Eppley PSP at 1000 W/m ²)
Drift	up to ±2% per year
Cosine Response	±3% for angle of incidence from 0° to 75°
Temperature Coefficient	-0.067% per °F (-0.12% per °C); reference temperature = 77°F (25 °C)
Update Interval	50 seconds to 1 minute (5 minutes when dark)
Current Graph Data	Instant Reading and Hourly Average; Daily, Monthly High
Historical Graph Data	Hourly Average, Daily, Monthly Highs
Alarm	High Threshold from Instant Reading

Sunrise and Sunset

Resolution	1 minute
Accuracy	±1 minute
Reference	United States Naval Observatory

Temperature

Inside Temperature (sensor located in console)

Resolution and Units	Current Data: 0.1°F or 1°F or 0.1°C or 1°C (user-selectable) °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C Historical Data and Alarms: 1°F or 1°C (user-selectable)
Range	+32° to +140°F (0° to +60°C)
Sensor Accuracy	±1°F (±0.5°C) (typical) See Fig. 2
Update Interval	1 minute
Current Display Data	Instant (user-adjustable offset available)
Current Graph Data	Instant Reading; Daily and Monthly High and Low
Historical Graph Data	Hourly Readings; Daily and Monthly Highs and Lows
Alarms	High and Low Thresholds from Instant Reading

Outside Temperature (sensor located in ISS)

Resolution and Units	Current Data: 0.1°F or 1°F or 0.1°C or 1°C (user-selectable) nominal °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C Historical Data and Alarms: 1°F or 1°C (user-selectable)
Range	-40° to +150°F (-40° to +65°C)
Sensor Accuracy	±0.5°F (±0.3°C) See Fig. 1
Radiation Induced Error (Passive Shield)	+4°F (2°C) at solar noon (insolation = 1040 W/m ² , avg. wind speed ≤ 2 mph (1 ms)) (reference: RM Young Model 43408 Fan-Aspirated Radiation Shield)
Radiation Induced Error (Fan-Aspirated Shield)	+0.6°F (0.3°C) at solar noon (insolation = 1040 W/m ² , avg. wind speed ≤ 2 mph (1 m/s)) (reference: RM Young Model 43408 Fan-Aspirated Radiation Shield)
Update Interval	10 to 12 seconds
Current Display Data	Instant (user-adjustable offset available)
Current Graph Data	Instant Reading; Daily, Monthly, Yearly High and Low
Historical Graph Data	Hourly Readings; Daily, Monthly, Yearly Highs and Lows
Alarms	High and Low Thresholds from Instant Reading

Extra Temperature Probes

Resolution and Units	Current Data: 1°F or 1°C (user-selectable) °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C Historical Data and Alarms: 1°F or 1°C (user-selectable)
Range	-40° to +150°F (-40° to +65°C)
Sensor Accuracy	±1°F (±0.5°C) (typical) See Fig. 3
Update Interval	10 to 12 seconds (77 to 90 seconds for Leaf Wetness/Temperature and Soil Moisture/Temperature Stations)
Current Display Data	Instant Reading (user-adjustable offset available)
Alarms	High and Low Thresholds from Instant Reading

Temperature Humidity Sun Wind Index (requires solar radiation sensor)

Resolution and Units	1°F or 1°C (user-selectable) °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C
Range	-90° to +165°F (-68° to +74°C)
Accuracy	±4°F (±2°C) (typical)
Update Interval	10 to 12 seconds
Sources and Formulation Used	United States National Weather Service (NWS)/NOAA Steadman (1979) modified by US NWS/NOAA and Davis Instruments to increase range of use and allow for cold weather use
Variables Used	Instant Outside Temperature, Instant Outside Relative Humidity, 10-minute Average Wind Speed, 10-minute Average Solar Radiation
Formulation Description	Uses Heat Index as base temperature, affects of wind and solar radiation are either added or subtracted from this base to give an overall effective temperature
Current Graph Data	Instant and Hourly Calculation; Daily, Monthly High
Historical Graph Data	Hourly Calculation; Daily, Monthly Highs
Alarm	High Threshold from Instant Reading

Ultra Violet (UV) Radiation Dose (requires UV sensor)

Resolution and Units	0.1 MEDs to 19.9 MEDs; 1 MED above 19.9 MEDS
Range	0 to 199 MEDs
Accuracy	±5% of daily total
Drift	up to ±2% per year
Update Interval	50 seconds to 1 minute (5 minutes when dark)
Current Graph Data	Latest Daily Total (user resettable at any time from Current Screen)
Historical Graph Data	Hourly, Daily Totals (user reset from Current Screen does not affect these values)
Alarm	High Threshold from Daily Total
Alarm Range	0 to 19.9 MEDs

Ultra Violet (UV) Radiation Index (requires UV sensor)

Resolution and Units	0.1 Index
Range	0 to 16 Index
Accuracy	±5% of full scale (Reference: Yankee UVB-1 at UV index 10 (Extremely High))
Cosine Response	±4% FS (0° to 90° zenith angle)
Update Interval	50 seconds to 1 minute (5 minutes when dark)
Current Graph Data	Instant Reading and Hourly Average; Daily, Monthly High
Historical Graph Data	Hourly Average, Daily, Monthly Highs
Alarm	High Threshold from Instant Calculation

Wind

Wind Chill (Calculated)

Resolution and Units	1°F or 1°C (user-selectable) °C is converted from °F rounded to the nearest 1°C
Range	-110° to +135°F (-79° to +57°C)
Accuracy	±2°F (±1°C) (typical)
Update Interval	10 to 12 seconds
Source	United States National Weather Service (NWS)/NOAA
Equation Used	Osczevski (1995) (adopted by US NWS in 2001)
Variables Used	Instant Outside Temperature and 10-min. Avg. Wind Speed
Current Display Data	Instant Calculation
Current Graph Data	Instant Calculation; Hourly, Daily and Monthly Low
Historical Graph Data	Hourly, Daily and Monthly Lows
Alarm	Low Threshold from Instant Calculation

Wind Direction

Range	0 - 360°
Display Resolution	16 points (22.5°) on compass rose, 1° in numeric display
Accuracy	±3°
Update Interval	2.5 to 3 seconds
Current Display Data	Instant (user-adjustable offset available)
Current Graph Data	Instant; 10-min. Dominant; Hourly, Daily, Monthly Dominant
Historical Graph Data	Past 6 10-min. Dominants on compass rose only; Hourly, Daily, Monthly Dominants

Wind Speed

Resolution and Units	1 mph, 1 km/h, 0.4 m/s, or 1 knot (user-selectable). Measured in mph, other units are converted from mph and rounded to nearest 1 km/hr, 0.1 m/s, or 1 knot.
Range	0 to 200 mph, 0 to 173 knots, 0 to 89 m/s, 0 to 322 km/h
Update Interval	Instant Reading: 2.5 to 3 seconds, 10-minute Average: 1 minute
Accuracy	±1 mph (1 kts, 1.5 km/h, 0.5 m/s) or ±5%, whichever is greater
Maximum Cable Length	240 feet (73 m) (See note on page 1)
Current Display Data	Instant
Current Graph Data	Instant; 10-minute and Hourly Average; Hourly High; Daily, Monthly and Yearly High with Direction of High
Historical Graph Data	10-min. and Hourly Averages; Hourly Highs; Daily, Monthly and Yearly Highs with Direction of Highs
Alarms	High Thresholds from Instant Reading and 10-minute Average

Wireless Communications

Transmit/Receive Frequency

US Models	902 - 928 MHz FHSS,
EU Models	868.0 - 868.6 MHz FHSS
Japan Models	928.15 - 929.65 MHz FHSS
NZ Models	921 - 928 MHz FHSS
India Models	865.0 - 867.0 MHz FHSS

ID Codes Available.....8

Output Power

US Models	902 - 928 MHz FHSS: FCC-certified low power, less than 8 mW, no license required
EU Models	868.0 - 868.6 MHz FHSS. CE-certified, less than 8 mW, no license required.
Japan Models	928.15 - 929.65 MHz FHSS, less than 1 mW, no license required.
NZ Models	921 - 928 MHz FHSS, less than 10mW, no license required.
India Models	865.0 - 867.0 MHz, less than 10mW, no license required.

Range: All models except Japan

Line of Sight	up to 1000 feet (300 m)
Through Walls	200 to 400 feet (60 to 120 m)

Range: Japan models

Line of Sight	up to 300 feet (100 m)
Through Walls	50 to 200 feet (15 to 60m)

Sensor Inputs

RF Filtering	RC low-pass filter on each signal line
--------------	--

Sensor Charts

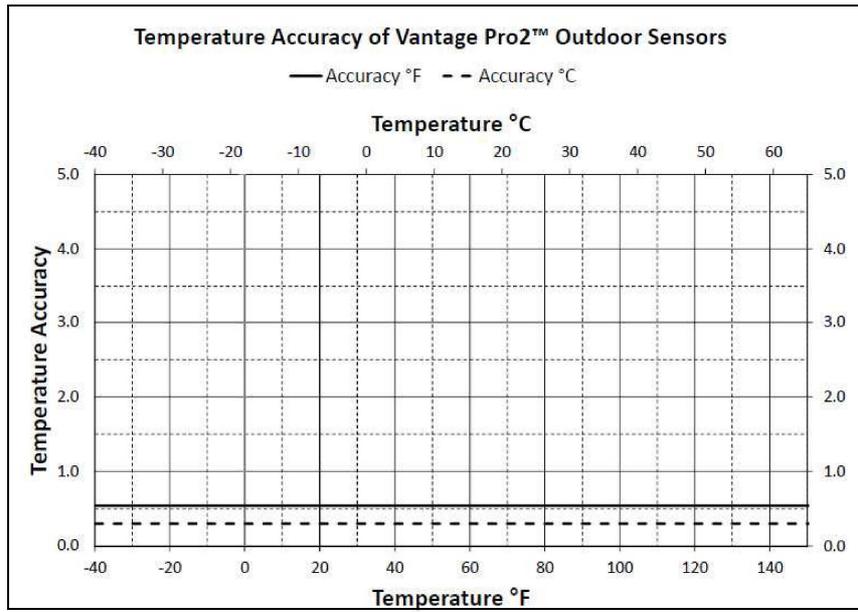


Figure 1. Temperature Accuracy of Vantage Pro2 ISS Sensors

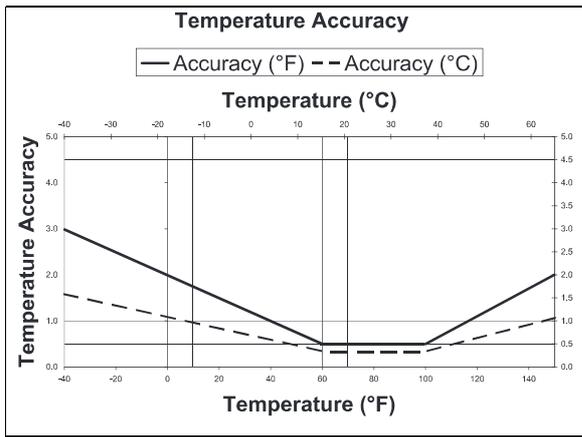


Figure 2. Inside Temperature Accuracy

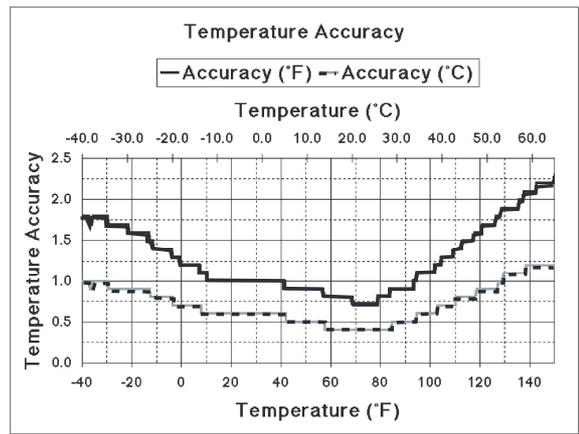


Figure 3. External Temperature Probe Accuracy

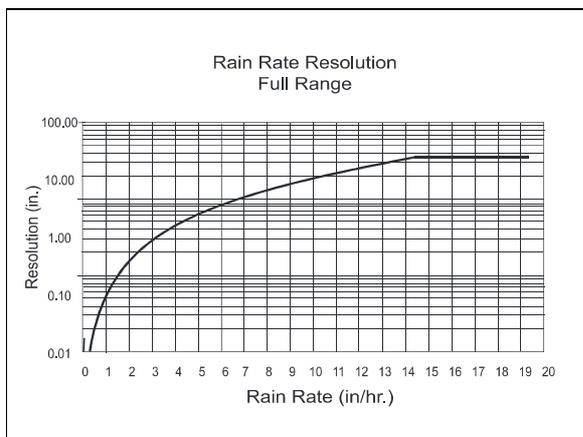


Figure 4. Low Range Rain Rate Resolution

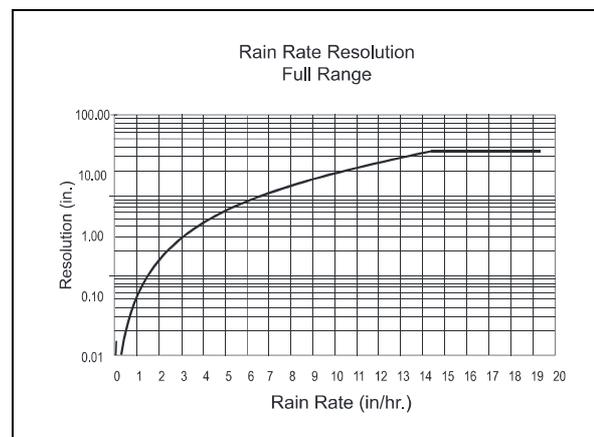


Figure 5. Full Range Rain Rate Resolution



**DATA LOGGING
HOT WIRE ANEMOMETER with
CFM/CMM and 8:1 IR THERMOMETER
USER'S MANUAL**



CIH20DL

Please read this manual carefully and thoroughly before using this product.

TABLE OF CONTENTS

Introduction	3 – 4
Key Features	4
Safety Instructions	5
What’s in the Case	5
Product Overview	5 – 7
Setup Instructions	8
Install Battery	8
Operating Instructions	8 – 21
Getting Started	8 – 9
Measuring Air Speed and Temperature	9
Measuring Airflow Volume	9
Measuring Surface Temperature	10
Holding and Storing Measurements	10
Displaying Maximum, Minimum and Average Values	10 – 11
Recalling and Erasing Stored Measurements	11 – 12
Using the Advanced Settings Menu	12 – 13
Data Logging with a Computer	14 – 21
Install Software and Drivers	14 – 15
Connecting the Meter to Your Computer	15
Viewing Real-Time Measurements on the Dashboard	15 – 17
Using the Meter to Log Data	17 – 18
Uploading Record Data	18
Viewing Record Data Graphically	19 – 20
Uploading and Viewing Data Logs	20 – 21
Specifications	22
Maintenance Tips	23
Warranty Information	23
Return for Repair Policy	23
Appendix	24 – 25

INTRODUCTION

Thank you for purchasing General Tools & Instruments' CIH20DL Data Logging Hot Wire Anemometer with CFM/CMM and 8:1 IR Thermometer. Please read this user's manual carefully and thoroughly before using the instrument.

The CIH20DL is a professional-grade, handheld hot wire anemometer that can not only measure the speed of air exiting the grille or register of an HVAC/R system or blower or fan, but also convert those readings to airflow volume measurements in units of CFM (cubic feet per minute or ft³/min) or CMM (cubic meters per minute or m³/min). The conversions are possible because the meter allows the user to enter the free area dimensions of grilles and output ductwork.

The instrument can also measure the temperature of cooling or heating air, as well as surface temperatures. Air temperatures from 32° to 158°F (0° to 70°C) are measured by a thermistor located next to the hot wire sensor at the end of a 6 ft. (1.8m) long telescoping metal probe and cable. Surface temperatures from -25° to 999°F (-32° to 538°C) are measured by an integral infrared (IR) thermometer with a distance-to-spot (D:S) ratio of 8:1.

A hot wire anemometer measures air speed in the following way. When the instrument is powered on, direct current is passed through its hot wire sensor for about 15 seconds. After the sensor has been warmed to a constant temperature, the instrument detects how much current is required to maintain that temperature as wind passing across the sensor acts to cool it. The amount of current required is directly proportional to the square of the wind speed.

Hot wire anemometers are as accurate as vane anemometers, but hot wire units are better able to measure very slow air currents because they have no moving parts and therefore no inertia. For example, the CIH20DL can measure air speeds as low as 2 ft/min. A typical vane anemometer of comparable quality and accuracy cannot measure air speeds lower than 80 ft/min.

The CIH20DL has a large backlit display with three readouts: one shows air speed or airflow volume, another is for IR temperature, and the third is dedicated to air temperature. Normally, each of these readouts shows real-time measurements, which can be held (frozen) and read later to enable work in dark areas. End users can opt to have the readouts show maximum, minimum or average measurements instead. End users also can store up to nine sets of the three readings (air speed or airflow volume, air temperature and IR temperature) in an internal nonvolatile memory and recall them at any time in chronological order.

In addition to storing the nine sets of readings, the CIH20DL also can capture—over long periods of time—and time-stamp up to 20,000 air speed/airflow volume, air temperature and surface temperature measurements at a user-selected sampling rate from 5 seconds to 1 hour. These time-stamped readings, called data logs, can be copied to a PC running Windows® 7, Windows® Vista or Windows® XP via an included USB cable. Once in the computer, the logs can be displayed as graphs or tables, formats that make it easy to spot trends or unexpected excursions in readings.

The CIH20DL can be configured to display air speed in any of five Imperial or metric units, airflow volume in CFM or CMM, and temperature in degrees Fahrenheit or Celsius. The instrument's IR thermometer, which can be precisely aimed by a low-power laser pointer, assumes by default that its target has an emissivity of 0.95, which is true for 90% of applications.

The meter is normally powered by one "9V" battery (included). To enable long-term data logging, the meter also can be powered by a 110V or 220V AC supply. When the meter is powered by the battery, it automatically shuts off after 10 minutes of inactivity to extend battery life. When running on AC power, the auto power off period is extended to 30 minutes when the meter is not in data logging mode. When the meter is running on AC power in data logging mode, the auto power off function is disabled to enable logging sessions longer than 30 minutes. When the meter is connected to a computer via the included USB cable, the meter is powered through the computer's USB port. In this mode, the Auto Power Off function is disabled. This prevents unexpected meter shutoffs from interrupting data uploads.

KEY FEATURES

- Measures and displays air speed or airflow volume in several Imperial or metric units
- Simultaneously measures and displays ambient temperature from 32° to 158°F (0° to 70°C) in °F or °C with $\pm 2\%$ accuracy
- Measures air speeds from 2 ft/min to 7874 ft/min (20 mm/sec to 40 m/sec) with $\pm 3\%$ accuracy
- Measures airflow volumes from 0 to 2.5 million CFM (0 to 72,000 CMM) with $\pm 3\%$ accuracy
- Displays maximum, minimum or maximum air speed plus temperature
- Also has 8:1 infrared thermometer for remote, non-contact measurement of surface temperatures from -25° to 999°F (-32° to 538°C) with $\pm 3\%$ accuracy
- Telescoping probe and cable extend reach of hot wire sensor and thermistor to up to 6 ft. (1.8m)
- Jumbo backlit LCD with three readouts
- Stores/recalls up to nine sets of three readings in nonvolatile memory
- Time-stamps and saves up to 20,000 data points at user-selected sampling rate from 5 seconds to 1 hour
- Included USB cable and interface/data logging software enable transfer of stored data logs from the meter's internal memory to a PC for tabular or graphic display and analysis
- Data hold and auto power off functions
- CE and RoHS approved

SPECIFICATIONS

Air Speed Measurement Range	2 ft/min to 7874 ft/min (20 mm/sec to 40 m/sec)
Air Speed Measurement Basic Accuracy	±3% of reading
Air Speed Measurement Resolution	0.1 ft/min; 0.01 m/s; 0.01 km/h; 0.01 mph; 0.01 knots
Airflow Volume Measurement Range	0 to 2.5 million CFM (0 to 72,000 CMM)
Airflow Volume Measurement Basic Accuracy	±3% of reading
Airflow Volume Measurement Resolution	1 CMM; 1 CFM from 0 to 99,999 CFM; 10 CFM from 100,000 to 999,999 CFM; 100 CFM from 1,000,000 to 2,500,000 CFM
Air Temperature Measurement Range	32° to 158°F (0° to 70°C)
Air Temperature Measurement Basic Accuracy	±3% of reading
Air Temperature Measurement Resolution	0.1°F (0.1°C)
IR (Surface) Temperature Measurement Range	-25° to 999°F (-32° to 538°C)
IR Temperature Measurement Accuracy	±5.4°F (3°C) from -25° to -4°F (-32° to 20°C); ±3.6°F (2°C) from -4° to 212°F (-20° to 100°C); 2% of reading from 212° to 999°F (100° to 538°C)
IR Temperature Measurement Resolution	0.1°F (0.1°C)
IR Thermometer Emissivity	0.95 (fixed)
IR Thermometer Distance-to-Spot Ratio	8:1
Airflow Register Area Range	0.01 to 322.92 ft ² in increments of 0.01 ft ² , or 0.001 to 30m ² in increments of 0.001 m ²
Sampling Time Range	5 seconds to 59 minutes, 59 seconds
Internal Measurement Storage Capacity	9 sets of 3 readings
Internal Data Log Storage Capacity	20,000 points
Auto Power Off	After 10 minutes of inactivity on battery power; after 30 minutes of inactivity on AC power; disabled when meter is running on AC power in Data Logging mode
Backlight Duration	15 seconds
Display Size	1.69 x 2.4 in. (33 x 51mm)
Operating Temperature	32° to 122°F (0° to 50°C) @ 10 to 90% RH
Storage Temperature	14° to 140°F (-10° to 60°C)
Dimensions of Instrument	7.24 x 2.75 x 1.57 in. (184 x 70 x 40mm)
Weight of Instrument	11.3 oz. (320g)
Extended Length of Telescoping Probe and Cable	70.8 in. (1.8m)
Power Source	1 "9V" battery (included)
Dimensions of Protective Carrying Case	10.88 x 10.50 x 2.88 in. (276 x 267 x 73mm)
Weight of Instrument, Accessories and Case	44.5 oz. (1.26kg)