

# **INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE**

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018,  
publicado en el Diario Oficial de la Federación el 29 de noviembre de 1976.

---

Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano

MAESTRÍA EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES



## **Prototipo de sistema de torre de viento para enfriamiento habitacional híbrido en clima cálido**

Caso de estudio vivienda urbana en Sinaloa, México

Trabajo recepcional que para obtener el grado de  
MAESTRA EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES

Presenta: Ileana Briceño Benard

Tutor: Mtro. Francisco Álvarez Partida

San Pedro Tlaquepaque, Jalisco. mayo de 2018.

## **Agradecimientos**

A Dios,

A mis padres, Cony y José Eduardo,

a Raúl,

a mis profesores y asesores, en especial al Mtro. Francisco Álvarez Partida y al Mtro. Hugo Andrés Testolini Deza,

a mis hermanos Cindy y José Eduardo,

a mis compañeros,

a las instituciones ITESO y CONACYT,

y a todas las personas que me acompañaron, apoyaron, dedicaron su tiempo y compartieron sus conocimientos para que este proyecto fuera posible.

## **Resumen:**

Los sistemas constructivos estandarizados y el diseño convencional de la vivienda en regiones de clima cálido en México no responden a las características bioclimáticas particulares de la región, lo que ocasiona que su comportamiento térmico no sea confortable gran parte del año. Actualmente el proceso principal de enfriamiento de espacios interiores en la vivienda común se basa principalmente en el uso excesivo de aparatos electromecánicos para climatización artificial que requieren grandes cantidades de energía eléctrica para operar, las cuales representan altos costos económicos y ambientales, y se les relaciona con problemas de calidad del aire y salud de los usuarios. A partir de los antecedentes del sistema de enfriamiento de Torre de viento y del análisis bioclimático de la zona de estudio, el presente proyecto propone una alternativa de enfriamiento eólico híbrido para mejorar el confort térmico en la vivienda existente de manera más sustentable mediante el aprovechamiento de la captación del viento y el uso de un intercambiador de calor y la ventilación cruzada, lo que permitiría reducir el uso de los equipos antes mencionados. Se realizaron una serie de simulaciones numéricas CFD con diferentes variables climáticas y físicas que permitieron comprobar el funcionamiento del sistema propuesto, así como analizar la propuesta técnica, ventajas y desventajas, y compararlo con un equipo de aire acondicionado convencional. Se concluye que el prototipo de sistema propuesto tiene un gran potencial de utilización en regiones de clima cálido en México, y, por lo tanto, de ahorros energéticos, económicos y de emisiones de gases que contribuyen al calentamiento global. Se elaboró un Manual CFD con la metodología seguida en la realización de las simulaciones que se adjuntó en los anexos.

***Palabras clave:*** Torre de viento, Enfriamiento pasivo híbrido, CFD (Computational Fluid Dynamics), Clima cálido en México.

## **Abstract:**

The standardized construction systems and the conventional housing design in warm climate regions in Mexico do not respond to the particular bioclimatic characteristics of the region, which causes a not comfortable thermal behavior during a large part of the year. Currently the main process of cooling interior spaces in the common dwelling is mainly based on the excessive use of electromechanical devices for artificial air conditioning that require large amounts of electric power to operate, which represent high economic and environmental costs, and are related to air quality and users' health problems. Based on the background of the Torre de Viento cooling system and the bioclimatic analysis of the study area, this project proposes a hybrid wind cooling alternative to improve thermal comfort in the existing house in a more sustainable way by taking advantage of the capture of the wind, the use of a heat exchanger and cross ventilation, which would reduce the use of the aforementioned equipment. A series of numerical CFD simulations were carried out with different climatic and physical variables that allowed to verify the operation of the proposed system, as well as to analyze the technical proposal, advantages and disadvantages, and compare it with conventional air conditioning equipment. It is concluded that the prototype of the proposed system has a great potential for use in warm climate regions of Mexico, and, therefore, of energy, economic and emissions of gases that contribute to global warming savings. A CFD Manual was prepared with the methodology followed in the realization of the simulations that were attached in the annexes.

**Key words:** *Wind tower, Passive hybrid cooling, Thermal comfort, CFD (Computational Fluid Dynamics), Warm weather in Mexico.*

## Índice:

Resumen.....	2
Abstract.....	3
<b>1. Planteamiento del tema.....</b>	<b>10</b>
1.1. Delimitación del objeto de innovación.....	10
1.2. Definición de términos.....	11
1.3. Descripción de la situación-problema.....	14
1.4. Importancia del proyecto.....	20
<b>2. Marco contextual y encuadre conceptual.....</b>	<b>24</b>
2.1. Antecedentes empíricos del tema.....	24
2.2. Referencias conceptuales del tema.....	47
<b>3. Diseño metodológico.....</b>	<b>52</b>
3.1. Supuestos de trabajo.....	52
3.2. Preguntas generadoras.....	52
3.3. Objetivos.....	53
3.4. Elección metodológica.....	54
3.5. Selección de técnicas y diseño de instrumentos.....	56
<b>4. Análisis, desarrollo de la propuesta y resultados .....</b>	<b>58</b>
4.1. Datos climatológicos de Los Mochis, Sinaloa.....	58
4.2. Análisis climático.....	59
4.4. Análisis bioclimático.....	77
4.4. Hallazgos aprovechables.....	83
4.5. Diseño aplicativo de la solución.....	85
4.6. Factibilidad y validación.....	132

<b>5. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>140</b>
<b>6. Referencias bibliográficas.....</b>	<b>144</b>
<b>7. Anexos.....</b>	<b>151</b>

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1</b>	Generación en México por tipo de energético en 2013. Fuente: Elaboración propia con datos de La Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE, 2015).	15
<b>Gráfica 2</b>	Principales usos finales de la energía eléctrica en una región cálida en México. Fuente: Elaboración propia con datos de Curvas de demanda de energía eléctrica en el sector doméstico de dos regiones de México (Sánchez Viveros & Maqueda Zamora, 2011).	16
<b>Gráfica 3</b>	Temperaturas y umbral de confort térmico. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).	60
<b>Gráfica 4</b>	Temperaturas horarias. Elaboración propia, con datos de las normales climatológicas para la ciudad de Los Mochis y con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).	61
<b>Gráfica 5</b>	Humedad Relativa. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).	61
<b>Gráfica 6</b>	Precipitación y evaporación. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).	63
<b>Gráfica 7</b>	Radiación solar. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).	64
<b>Gráfica 8</b>	Radiación solar total (RSg) horaria. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).	65
<b>Gráfica 9</b>	Radiación solar directa (RSb) horaria. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).	65
<b>Gráfica 10</b>	Días – Grado. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).	66
<b>Gráfica 11</b>	Promedio de velocidad de viento máximo mensual en el periodo de 2012-2016. Fuente: Elaboración propia con datos de Meteored (2017).	68
<b>Gráfica 12</b>	Promedio de vientos máximos mensual en el periodo de 2012-2016. Fuente: Elaboración propia con datos de Meteored (2017).	68
<b>Gráfica 13</b>	Rangos de velocidad del viento. Elaboración. Fuente: Climate Consultant 6.0	70
<b>Gráfica 14</b>	Vientos (primera parte). Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).	71
<b>Gráfica 15</b>	Vientos (segunda parte). Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).	72
<b>Gráfica 16</b>	Viento Anual. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).	73
<b>Gráfica 17</b>	Rosa de los vientos. Fuente: Climate Consultant.	74
<b>Gráfica 18</b>	Fenómenos especiales. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).	75
<b>Gráfica 19</b>	Índice ombrotérmico. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).	76
<b>Gráfica 20</b>	Triángulos de confort. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).	78
<b>Gráfica 21</b>	Estrategias Bioclimáticas. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).	78
<b>Gráfica 22</b>	Diagrama Bioclimático de Olgay (mensual). Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).	81
<b>Gráfica 23</b>	Gráfica psicométrica para el mes de julio en Los Mochis. Fuente: Climate Consultant 6.0 con datos de Los Mochis, MX y el modelo adaptativo de confort ASHRAE 2005.	82
<b>Gráfica 23</b>	Monitoreo de temperatura y humedad relativa en sitio del 23 al 25 de junio del 2017. Fuente: Elaboración propia.	89
<b>Gráfica 24</b>	Promedio mensual de temperaturas máximas en la superficie y el fondo de los tinacos. Fuente: Diego Ayala & Carrillo Baeza (2015, pág. 578).	91
<b>Gráfica 25</b>	Potencial de ahorro energético del consumo anual actual. Fuente: Elaboración propia.	136
<b>Gráfica 26</b>	Comparativo de condiciones climáticas y energéticas anuales. Fuente: Elaboración propia.	137

## ÍNDICE DE IMÁGENES

<b>Imagen 1</b>	Potencial del uso de ventilación natural en México de acuerdo a sus horas de confort higrotérmico, periodo de julio a septiembre. Fuente: Oropeza Pérez & Morillón Galvez (2011, pág. 421 y 422)	21
<b>Imagen 2</b>	Ubicación del estado de Sinaloa con referencia a México. Fuente: Elaboración propia con base a mapa de Deffis Caso (1994, pág. 100).	24
<b>Imagen 3</b>	Ubicación de la ciudad de Los Mochis con referencia al estado de Sinaloa. Fuente: Elaboración propia con base a mapa de Deffis Caso (1994, pág. 100).	24
<b>Imagen 4</b>	Distribución municipal de tarifas eléctricas. Fuente: González Osorio & Beele (2016)	26
<b>Imagen 5</b>	Funcionamiento de las torres de viento. Fuente: (Reyes Herrera, 2016).	28
<b>Imagen 6</b>	Chimenea de enfriamiento evaporativo. Fuente: (Deffis Caso, 1994).	28
<b>Imagen 7</b>	Torre de viento alejada de la casa. Fuente: (Deffis Caso, 1994).	29
<b>Imagen 8</b>	Algunas regiones donde se utilizan las torres de viento son Irán, algunos países vecinos de Medio Oriente y Egipto. Fuente: (Bahadori & Dehghani-sanji, 2014, pág. 9).	30
<b>Imagen 9</b>	Partes principales que componen una torre de viento convencional. Fuente: (Bahadori & Dehghani-sanji, 2014, pág. 79).	31
<b>Imagen 10</b>	Tipos de torres de viento de acuerdo a su número de aperturas y forma. Fuente: (Mourad, Abdel-Rahman, & Ali, 2014).	32
<b>Imagen 11</b>	Torre de viento de forma cilíndrica en Yazd, Irán. Fuente: (Bahadori & Dehghani-sanji, 2014)	32
<b>Imagen 12</b>	Diferentes torres de viento de acuerdo a su ubicación y condición climática. Fuente: (Dehghani-sanji, Soltani, & Raahemifar, 2015, pág. 189).	33
<b>Imagen 13</b>	Captador de viento Chopoghi en Irán. Fuente: (Samadiyan, 2013).	34
<b>Imagen 14</b>	Representación esquemática de la propuesta de torre de viento. Fuente: (Dehghani-sanji, Soltani, & Raahemifar, 2015, pág. 189).	35
<b>Imagen 15</b>	Ventilación BedZed, Londres. Fuente: (Lyon, 2009).	36
<b>Imagen 16</b>	Torre Arizona – Torre de viento a la derecha y chimenea solar a la izquierda. Fuente: (Givoni, 1998).	36
<b>Imagen 17</b>	Casa Modelo. Fuente: (Reyes Herrera, 2016)	37
<b>Imagen 18</b>	Vivienda tradicional en Minahasa. Fuente: (Kristianto, Utama, & Fathoni, 2014)	40
<b>Imagen 19</b>	Condiciones de frontera en el modelo CFD para volumen exterior en el análisis de vivienda en Minahasa. Fuente: (Kristianto, Utama, & Fathoni, 2014)	41
<b>Imagen 20</b>	Resultado de simulación de magnitud de velocidad de una de las variaciones de casa tradicional. Fuente: (Kristianto, Utama, & Fathoni, 2014, pág. 178)	41
<b>Imagen 21</b>	Edificio de caso de estudio de “Mapas de Confort Térmico-CFD para el Diseño Arquitectónico Interior”. Fuente: (Naboni, Lee, & Fabbri, 2017, pág. 113)	42
<b>Imagen 22</b>	Comparación de mapas de simulación térmica de edificio en Copenhague de acuerdo con las diferentes configuraciones de distribución espacial interior en un día de verano. Fuente: (Naboni, Lee, & Fabbri, 2017, pág. 114)	43
<b>Imagen 23</b>	Comparación de mapas de simulación térmica de edificio en Copenhague de acuerdo con las diferentes configuraciones de distribución espacial interior en un día de invierno. Fuente: (Naboni, Lee, & Fabbri, 2017, pág. 115).	44
<b>Imagen 24</b>	Intercambiador de calor: 1-Evaporador, 2-Condensador, 3-Tubo de calor, 4-Serpentín de calentamiento, 5-Parafina RT-20, 6-Placa de separación. 7-Entrada de agua usada, 8-Salida de agua usada, 9-Entrada de agua fría, 10-Salida de agua calentada. Fuente: (Burlacu, y otros, 2018, pág. 725).	45
<b>Imagen 25</b>	Comparación de resultados de simulación de temperatura estática de las diferentes configuraciones en 3D. Fuente: (Burlacu, y otros, 2018, pág. 727).	46
<b>Imagen 26</b>	Ubicación de estaciones meteorológicas más cercanas. Fuente: Elaboración propia con mapa base de Google (2017) [Mapa de la ciudad de Los Mochis].	67
<b>Imagen 27</b>	Ubicación: (a) Predio de la vivienda seleccionada; (b) Habitación de estudio. Fuente: Elaboración propia con mapa base de Google (2017) [Mapa de la ciudad de Los Mochis].	86
<b>Imagen 28</b>	Fachada de la vivienda para el caso de estudio. Fuente: Elaboración propia.	86
<b>Imagen 29</b>	Fotos del interior de la habitación elegida en el estado actual. Fuente: Elaboración propia.	87
<b>Imagen 30</b>	Levantamiento arquitectónico PLANTA. Fuente: Elaboración propia.	87
<b>Imagen 31</b>	Levantamiento arquitectónico SECCIÓN. Fuente: Elaboración propia.	87
<b>Imagen 32</b>	Equipo de monitoreo: (a) HOBO data logger para temperatura; (b) EXTECH RHT10 Data logger para la Humedad relativa.	88

<b>Imagen 33</b>	Tinaco de la vivienda.	90
<b>Imagen 34</b>	Termómetro sumergible de mercurio.	90
<b>Imagen 35</b>	Dimensiones de cisterna existente. Fuente: Elaboración propia.	91
<b>Imagen 36</b>	Tapadera de cisterna.	92
<b>Imagen 37</b>	Esquema de sistema de torre de viento para enfriamiento mixto.	93
<b>Imagen 38</b>	Detalles de funcionamiento de captación.	94
<b>Imagen 39</b>	Prueba #1 de captación de viento en maqueta.	96
<b>Imagen 40</b>	Prueba #2 de captación de viento en maqueta.	97
<b>Imagen 41</b>	Prueba #3 de captación de viento en maqueta.	98
<b>Imagen 42</b>	Modelado 3D de habitación en software Autodesk Revit 2017.	99
<b>Imagen 43</b>	Modelado 3D de habitación en software Autodesk Revit 2017, vista en sección.	99
<b>Imagen 44</b>	Simulación de prueba de magnitud de velocidad con torre de captación de viento con ingreso interior angulado y ventana existente como medio de expulsión de aire.	101
<b>Imagen 45</b>	Simulación de prueba de temperatura con torre de captación de viento de 2 m de altura a nivel interior de lecho inferior de losa y ventana existente como medio de expulsión de aire.	101
<b>Imagen 46</b>	Simulación de prueba de temperatura con torre de captación de viento de 1.2 m de altura a nivel interior de 2.2 m a partir de lecho inferior de losa y torre de 0.60 m de altura para expulsión de aire.	102
<b>Imagen 47</b>	Simulación de prueba de temperatura con torre de captación de viento de 1.2 m de altura con ingreso interior angulado y torre de 0.60 m de altura para expulsión de aire.	102
<b>Imagen 48</b>	Configuraciones de serpentín de enfriamiento vista en planta: (a) Tipo 1; (b) Tipo 2. Fuente: Elaboración propia.	104
<b>Imagen 49</b>	Configuraciones de serpentín de enfriamiento vista en sección: (a) Tipo 1; (b) Tipo 2. Fuente: Elaboración propia.	105
<b>Imagen 50</b>	Simulación #1, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.	109
<b>Imagen 51</b>	Simulación #1, Magnitud de velocidad del aire interior.	110
<b>Imagen 52</b>	Simulación #2, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.	111
<b>Imagen 53</b>	Simulación #2, Magnitud de velocidad del aire interior.	112
<b>Imagen 54</b>	Simulación #3, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.	113
<b>Imagen 55</b>	Simulación #3, Magnitud de velocidad del aire interior.	114
<b>Imagen 56</b>	Simulación #4, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.	115
<b>Imagen 57</b>	Simulación #4, Magnitud de velocidad del aire interior.	116
<b>Imagen 58</b>	Simulación #5, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.	117
<b>Imagen 59</b>	Simulación #5, Magnitud de velocidad del aire interior.	118
<b>Imagen 60</b>	Simulación #6, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.	119
<b>Imagen 61</b>	Simulación #6, Magnitud de velocidad del aire interior.	120
<b>Imagen 62</b>	Simulación #7, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.	121
<b>Imagen 63</b>	Simulación #7, Magnitud de velocidad del aire interior.	122
<b>Imagen 64</b>	Simulación #8, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.	123
<b>Imagen 65</b>	Simulación #8, Magnitud de velocidad del aire interior.	124
<b>Imagen 66</b>	Simulación #9, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.	125
<b>Imagen 67</b>	Simulación #9, Magnitud de velocidad del aire interior.	126
<b>Imagen 68</b>	Simulación #10, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.	127
<b>Imagen 69</b>	Simulación #10, Magnitud de velocidad del aire interior.	128
<b>Imagen 70</b>	Simulación #11, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.	139
<b>Imagen 71</b>	Simulación #11, Magnitud de velocidad del aire interior.	130

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	<b>Tarifa 1F (diciembre 2017-2018). Fuente: Elaboración propia con datos de Comisión Federal de Electricidad (2017).</b>	<b>27</b>
<b>Tabla 2</b>	<b>Datos climatológicos. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).</b>	<b>58</b>
<b>Tabla 3</b>	<b>Vientos. Elaboración propia con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT). Fuente: d. WindFinder, Estadísticas del viento y del tiempo, Topolobampo/Los Mochis</b>	<b>69</b>
<b>Tabla 4</b>	<b>Índice Ombrotérmico. Elaboración propia con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).</b>	<b>76</b>
<b>Tabla 5</b>	<b>Índice Tablas de Mahoney. Elaboración propia con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).</b>	<b>80</b>
<b>Tabla 6</b>	<b>Hallazgos aprovechables preliminares. Fuente: Elaboración propia.</b>	<b>83</b>
<b>Tabla 7</b>	<b>Simulaciones, características y resultados. Fuente: Elaboración propia.</b>	<b>107</b>
<b>Tabla 8</b>	<b>Capacidad de aires acondicionados recomendados de acuerdo a zona climática. Fuente: Granados (2011).</b>	<b>133</b>
<b>Tabla 9</b>	<b>Equivalencias entre toneladas de refrigeración y BTU. Fuente: Granados (2011).</b>	<b>133</b>
<b>Tabla 10</b>	<b>Estados del país de acuerdo a su zona climática para equipos de refrigeración. Fuente: Granados (2011).</b>	<b>133</b>
<b>Tabla 11</b>	<b>Consumo energético de la vivienda de estudio durante el año 2017. Fuente: Elaboración propia.</b>	<b>136</b>

## **1. Planteamiento del tema**

El viento, además de ser indispensable para la subsistencia del hombre satisfaciendo una necesidad vital al proporcionar aire limpio para respirar, ha sido también una herramienta de gran utilidad que este ha utilizado para satisfacer múltiples necesidades y hacer su vida más confortable. Uno de estos satisfactores de los cuales el viento es capaz de proporcionar es el confort ambiental y la renovación del aire fresco y puro.

Este trabajo presenta principalmente la posibilidad de integrar un sistema de enfriamiento interior en la vivienda existente, en climas cálidos de México, mediante la captación del viento para ventilación y enfriamiento interior, que permita mejorar la calidad de vida de los habitantes de estas regiones mediante la reducción del tiempo en el que sus viviendas presentan condiciones térmicas que sobrepasan los rangos de confort previamente establecidos. Se realiza una propuesta de sistema de enfriamiento tomando como antecedente a las torres de viento tanto tradicionales como contemporáneas, su diseño y funcionamiento, así como las condicionantes climáticas y de vivienda existente en la zona de estudio. Se obtiene como resultado una serie de simulaciones mediante un software especializado en dinámica de fluidos (CFD) con las distintas variables a considerar y se analizan los resultados en términos de tiempo de uso efectivo del sistema, temperaturas de confort alcanzadas, ahorros energéticos y económicos que podría representar, así como la posibilidad de su replicabilidad en zonas con condiciones similares.

### **1.1. Delimitación del objeto de innovación**

Para el desarrollo de este proyecto se tomó como base una habitación, que presentara condiciones térmicas fuera de los rangos de confort gran parte del año de una vivienda existente común en una región de clima cálido de México, específicamente en Los Mochis, Sinaloa, ubicada al noroeste del país. Se realizaron algunos registros de temperatura y humedad en el sitio para conocer su comportamiento higrotérmico actual particular, pero la mayoría de los datos climatológicos fueron recopilados de registros históricos de acceso público. La propuesta surge a partir de la existencia de torres de viento como un sistema pasivo utilizado en regiones del mundo que presentan condiciones climáticas similares al caso de estudio y se analiza la posibilidad de adaptación a las condiciones constructivas de las viviendas existentes del mismo, así como a sus condiciones climáticas. Parte de esta adaptación consiste en el aprovechamiento de los vientos dominantes como fuente de ventilación y de la temperatura del depósito subterráneo de agua con

el que cuente la vivienda, con los cuales conformar un intercambiador de calor que permita que el aire que ingrese pierda calor durante su trayecto de entrada. Se realizó la investigación en torno a una sola habitación la cual pudiera llevarse a cabo durante el tiempo disponible por motivos de requerimiento de tiempo y de memoria y procesador de un equipo de cómputo, pero su planteamiento de uso es para cualquier parte de una vivienda o para enfriamiento generalizado.

La innovación del proyecto radica en comprobar la factibilidad y el funcionamiento de una torre de viento en una vivienda existente en una región de clima cálido en México, considerando las diferentes configuraciones posibles, habilitando las más adecuadas para el funcionamiento óptimo de la misma y facilitando su replicabilidad en regiones con características climáticas y constructivas similares. Como herramienta principal para el logro de los objetivos se utiliza un software de simulación computacional de fácil acceso y manejo amigable llamado Autodesk CFD versión 2018.

## 1.2. Definición de términos

A lo largo del desarrollo del trabajo se utilizarán diferentes términos de manera recurrente relacionados a la temática de este, por lo que a continuación se proporciona una definición para mayor claridad.

Definiciones generales:

- **Viento.** - aire que se encuentra en movimiento debido a que la superficie terrestre se calienta de manera no uniforme, lo que genera diferencias de presión y de temperatura atmosféricas. Es uno de los derivados del efecto del sol sobre el planeta.

Los sistemas que permiten la climatización de los espacios interiores en las viviendas se pueden clasificar en activos, pasivos y híbridos.

- **Sistemas activos.** - son aquellos que requieren de la transformación de algún tipo de energía primaria en otro tipo de energía como eléctrica o mecánica para operar.
- **Sistemas pasivos.** - son aquellos que funcionan a partir de energías primarias sin su transformación en otro tipo de energía, y comprenden desde los vanos y ventanas que permiten la ventilación natural y ventilación cruzada, hasta sistemas con diseño más complejo que manipulan el aire para que este adquiera condiciones más favorables para los usuarios, como menor temperatura, mayor

velocidad y/o mayor o menor humedad dependiendo de las características bioclimáticas particulares del sitio y de las necesidades de los usuarios en materia de confort térmico. Pueden utilizar diferentes disipadores naturales de calor para cumplir su propósito, como son el aire ambiental, la atmósfera, el agua y el subsuelo.

- **Confort térmico.** - Relación de temperatura y humedad que de acuerdo a las condiciones climáticas permiten a las personas realizar sus actividades de manera óptima dentro de los espacios sin gastar energía en regular su propia temperatura. El confort que experimenta una persona está en función de múltiples variables como temperatura del aire, temperatura radiante media, humedad del aire, movimiento y velocidad del aire, cantidad y tipo de vestimenta y nivel de actividad física. Se puede determinar por medio de herramientas de análisis como la carta bioclimática, el diagrama bioclimático y el triángulo de confort.
- **Consumo energético.** - Cantidad de energía eléctrica que utilizan las personas en las edificaciones para satisfacer sus necesidades y mantener su calidad de vida.
- **Vivienda sustentable.** - vivienda que hace uso eficiente de la energía, materiales y desechos, aprovechando las energías alternativas, y reduciendo su impacto negativo al ambiente, sin privar a los usuarios de calidad de vida.
- **Subsidio de energía eléctrica.** - Diferencia entre el costo real de la energía eléctrica (producción y distribución) y el precio de venta para que los usuarios realicen pagos menores.
- **Flujo de calor.** - Forma de transferencia de energía que sucede como consecuencia de una diferencia de temperaturas.
- **Intercambiador de calor.** – dispositivo utilizado para transferir calor entre dos entidades mediante un flujo de calor. El término intercambiador de calor se aplica a todos los equipos utilizados para transferir calor entre dos flujos.

Definiciones para la simulación numérica:

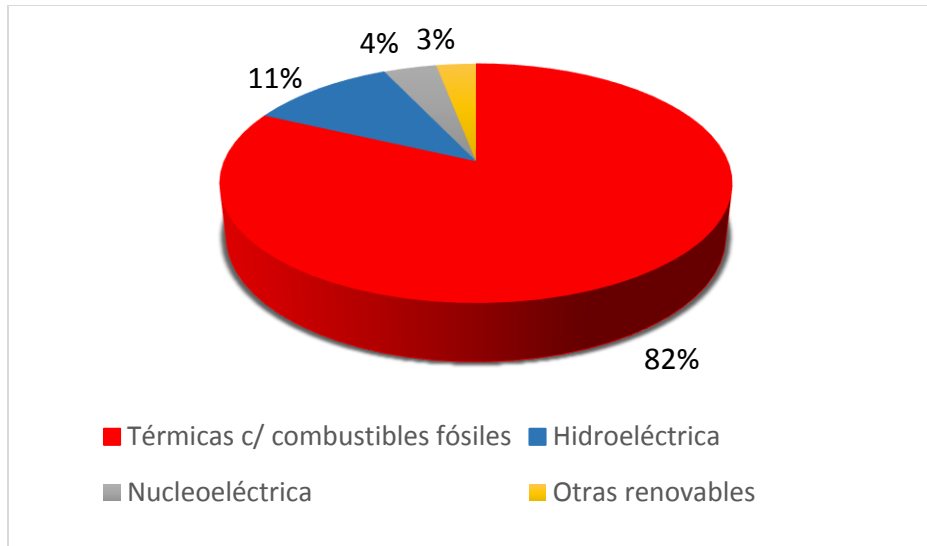
- **CFD (Computational Fluid Dynamics) o Dinámica de Fluidos Computacional.** - rama de la mecánica de fluidos que, con el uso métodos numéricos y algoritmos, resuelve y analiza problemas relacionados con el flujo de fluidos (líquidos y gases) mediante el uso de un ordenador. Tiene la capacidad de predecir con detalle las propiedades de los fluidos, de ayudar al diseño y a dar soluciones rápidas, que, de otro modo, conllevarían realizar experimentos de alto costo. Como resultado proporciona una visualización y animación del proceso de simulación de acuerdo con las variables del fluido.
- **Estado estacionario (Steady state).** - es aquel en el que no existen cambios de variables de proceso, los valores se mantienen constantes.
- **Condiciones de frontera (Boundary conditions).** - condiciones que limitan al sistema en un problema de transferencia de calor.
- **Flujo laminar.** - Cuando las partículas de un flujo se desplazan en forma de capas o láminas, de manera ordenada siguiendo trayectorias definidas, esto sucede cuando el gradiente de velocidad es bajo con baja fricción entre las partículas.
- **Flujo turbulento.** - Cuando las partículas de un flujo se rotan al desplazarse cambiando de trayectorias y chocando entre sí, esto se debe al aumentar el gradiente de velocidad lo que incrementa la fricción entre las partículas.

### 1.3. Descripción de la situación-problema

Una vivienda es más que cuatro paredes y un techo que brindan refugio y descanso, los requerimientos mínimos de una vivienda para que sea habitable y confortable abarcan muchos más aspectos que no se pueden generalizar de esa manera. Esta definición de vivienda que abarca el confort no es nueva, la revista A.C. publicada por el G.A.T.E.P.A.C. (Grupo de Artistas y Técnicos Españoles para el Progreso de la Arquitectura Contemporánea) en 1932 publicó un artículo titulado “Lo que entendemos por vivienda mínima”, donde se exponen un conjunto de condiciones que se necesitan para crear la vivienda con el mínimo de confort material y espiritual que necesitan las personas, entre algunas de estas condiciones materiales se encuentran el satisfacer la necesidad de aire y su renovación, luz, sol, higiene, mobiliario, una distribución interior que facilite su vida y el poder estar aislado de agentes exteriores como temperatura y ruido; a pesar de ser una definición con bastante antigüedad, por lo menos lo que nos muestra la revista, es probable que haya surgido a partir de que las viviendas dejaron de satisfacer las necesidades de los usuarios y de responder a su entorno, al parecer cada vez estamos más lejos de cumplir con esas condiciones antes mencionadas y más cerca de las “cuatro paredes y un techo”, lo que es bastante preocupante ya que las viviendas son cada vez con mayor frecuencia el centro de operación de nuestras vidas y desarrollo personal, cada vez pasamos más tiempo en ellas, ya sea para trabajar desde casa o para realizar actividades de esparcimiento que, gracias a la tecnología contemporánea, ya no es necesario salir de nuestra vivienda para realizarlas como el hacer compras o ver una película. Según Escrivá De Balaguer Mira (2017) hoy en días las personas pasan más tiempo dentro de sus viviendas que fuera de ellas, y, además, las nuevas generaciones presentan una tendencia de preferir pasar el tiempo libre en sus casas que salir.

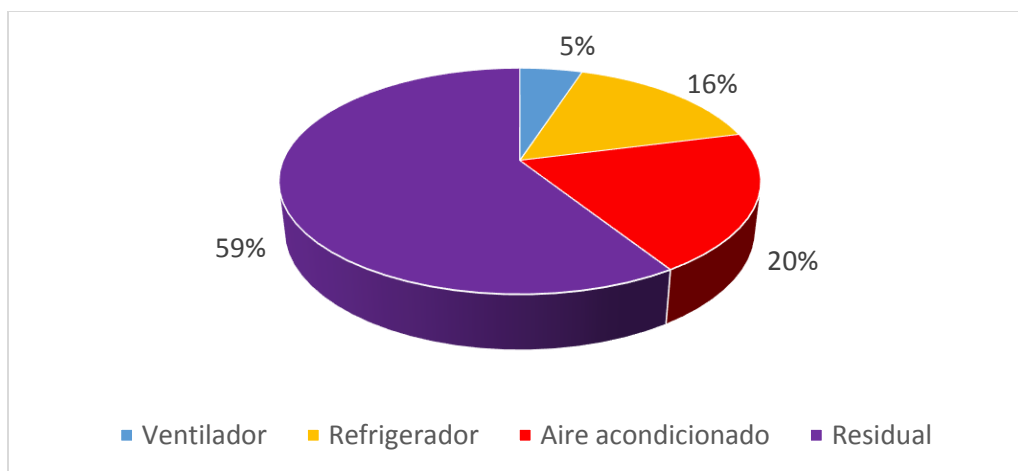
El sector residencial en México, según datos de la SENER (2017), para el año 2016 consumía el 22.68% de la energía eléctrica, siendo el sector que tiene mayor número de usuarios lo que lo posiciona como el sector donde se puede impactar a un mayor número de personas ya que la mayoría cuentan con una vivienda a donde regresan comúnmente cada día.

México es un país que depende principalmente de combustibles fósiles (como lo muestra la *Gráfica 1*) para generar la energía eléctrica demandada por el sector residencial junto con el resto de los sectores, esta alta dependencia nos sitúa en un alto nivel de vulnerabilidad ante la crisis energética que se vive de manera global, además de las implicaciones ambientales que el uso de este tipo de energéticos representa.



**Gráfica 1.** Generación en México por tipo de energético en 2013. Fuente: Elaboración propia con datos de La Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE, 2015).

El uso de energía eléctrica en las viviendas tiene distintas finalidades, como el hacer funcionar los aparatos eléctricos que usamos diariamente para diferentes actividades como entretenimiento, cocinar, preparar y mantener alimentos, calentar y bombear agua, iluminar, higiene personal y espacial, así como para climatizar los interiores. De acuerdo a Sánchez Viveros & Maqueda Zamora (2011) uno de los electrodomésticos que más se utiliza en México de manera general sin importar las condiciones climáticas y que representa gran parte de los consumos de energía eléctrica es el refrigerador, el cual nos ayuda a conservar los alimentos por más tiempo, no obstante, en las regiones cálidas del país, el aire acondicionado utilizado para alcanzar temperaturas confortables en el interior de las edificaciones representa un gasto energético aún mayor que el refrigerador, este dato nos da una idea de los niveles de consumo energético de los aires acondicionados y de la importancia que tiene su uso en gran parte del territorio. En la *Gráfica 2* se puede identificar el porcentaje de energía eléctrica que utiliza el aire acondicionado en las regiones cálidas de México, situándose sólo por debajo del uso “Residual” que corresponde a la iluminación junto con el resto de los electrodomésticos y equipos electrónicos que se utilizan en la vivienda. Específicamente en estas regiones de clima cálido, de acuerdo a Echeverría Aguilar (2015) viven cerca del 45% de los usuarios del sector residencial, el equivalente a más de 13 millones de personas y aunque representan poco menos de la mitad del total de usuarios, las viviendas en este tipo de clima representan el 72% del total del consumo de energía del sector.



**Gráfica 2.** Principales usos finales de la energía eléctrica en una región cálida en México. Fuente: Elaboración propia con datos de Curvas de demanda de energía eléctrica en el sector doméstico de dos regiones de México (Sánchez Viveros & Maqueda Zamora, 2011).

Actualmente es cada vez más común contar con equipos de climatización de alto consumo energético para combatir el calor en el interior de las viviendas en este tipo de clima ya que el diseño de estas no está pensado para que sea energéticamente eficiente, lo que afecta de manera significativa al medio ambiente, así como a la economía de los habitantes y la salud.

El uso de los diferentes tipos de aire acondicionado va en constante crecimiento, incluso dejando de ser exclusivo de las zonas cálidas, se ha comenzado a expandir a regiones del país clasificadas como templadas, esto nos muestra que la tendencia se dirige hacia el uso generalizado y que las temperaturas globales están aumentando, así como la disponibilidad de este tipo de tecnología en el mercado. Davis & Gertler (2015) estiman que para el año 2040 el aumento significativo del uso de aires acondicionados en las zonas de climas cálidos redundará en un incremento de 64% en el consumo de electricidad de los hogares, lo que también implicaría un aumento en las emisiones de dióxido de carbono de más de 23 millones de toneladas.

El utilizar este tipo de tecnología de tipo activa para mejorar el confort térmico implica también un gasto público significativo, ya que las tarifas de electricidad, actualmente, se encuentran altamente subsidiadas para ayudar a los usuarios a pagar su consumo cada mes, de otra manera los costos de la energía estarían fuera del alcance de gran parte de la población y se comprometería su bienestar; entre más elevada es la temperatura de una región mayor es el subsidio otorgado. De acuerdo con la Secretaría de Energía (2016) el sector residencial de México durante el año 2011 fue subsidiado con un monto cercano a los 52,585

millones de pesos Aún con este subsidio el pago promedio anual por persona en estados como Sinaloa, donde se cuenta con la tarifa de mayor subsidio (tarifa 1F), alcanza los 3 mil 121 pesos de acuerdo con datos de CODESIN (2013), lo que para algunas familias representa destinar gran parte de sus ingresos solamente en enfriar sus viviendas, mientras que a su vez tienen otras necesidades básicas por cubrir para subsistir como la alimentación diaria.

Además de lo económico, según Santamouris (2005) existen diferentes problemas asociados con el uso de este tipo de equipos de climatización, como son el aumento de la carga máxima de electricidad, los problemas ambientales asociados con el agotamiento del ozono y el calentamiento global, así como problemas de calidad del aire interior. La calidad del aire se ve afectada cuando los contaminantes del exterior ingresan al interior a través de este tipo de ventilación y es peor aun cuando no se les da el mantenimiento adecuado lo que puede afectar la salud de los usuarios principalmente con problemas respiratorios. Los aires acondicionados comunes nos permiten alcanzar temperaturas que no son naturales para la época del año y/o la región que se habita, y su uso, que es a criterio de los usuarios, puede no ser siempre el más favorable para la salud, como cuando se programa un equipo para enfriar a temperaturas por debajo de 20 °C mientras el exterior de la habitación rebasa los 35°C sometemos a nuestros cuerpos a cambios bruscos de temperatura que se pueden derivar en otros problemas de salud como contracturas musculares, y, según Jiménez (2011), ante estos cambios de temperatura pueden generar o empeorar patologías respiratorias al reducir las defensas pulmonares.

Por otro lado, la generación de la energía que estos equipos de climatización requieren, según Wassouf (2014), es la responsable principal de las emisiones de CO<sub>2</sub> de las edificaciones durante las diferentes etapas de su vida, siendo el CO<sub>2</sub> uno de los principales gases que contribuyen al fenómeno del calentamiento global, este tipo de consumo energético sobrepasa la cantidad de energía requerida para el proceso de edificación mismo, lo que aleja aún más a las edificaciones de alcanzar la sustentabilidad.

Una de las mayores preocupaciones del calentamiento global es que en un futuro no muy lejano las temperaturas aumentarán de tal modo que los interiores de las viviendas se vuelvan inhabitables. De acuerdo a Aryan et al. (2010) con el invento del aire acondicionado se tuvo la ilusión de que resolvería este problema y que conforme todos tuvieran acceso a él se acabarían los problemas de incomodidad térmica, sin embargo, el uso de estos equipos sólo ha empeorado la situación ya que contribuye al calentamiento global, no sólo con la generación de la energía que requieren para operar sino también con algunos de los gases que se utilizan como enfriadores. En México, gran parte del territorio cálido del país

se encuentra ubicado al norte, colindando con Estados Unidos, y con los equipos de aire acondicionado sucede un fenómeno que pasa con muchos otros equipos y tecnología, donde los aparatos que se van desechando de los hogares estadounidenses son adquiridos por usuarios mexicanos a bajos precios pero también con baja eficiencia al ser equipos antiguos, que incluso muchos de ellos aún contienen refrigerantes de fluorocarbonos, que actualmente están prohibidos por su efecto destructor de la capa de ozono. También es importante considerar que, aunque los equipos de aires acondicionados más nuevos utilizan gases refrigerantes mucho menos dañinos que los de los equipos antiguos, estos siguen teniendo potencial de efecto invernadero.

Otra preocupación relacionada es el creciente aumento de los precios de los combustibles fósiles y su escasez, que pronostican que próximamente sólo las personas adineradas podrán tener acceso a la refrigeración de interiores mediante estos equipos mecánicos, mientras que gran parte de las edificaciones contemporáneas fueron diseñadas y construidas en base a la utilización de estos. Por lo general, una vivienda es construida con la intención de que dure por varias décadas y para que varias generaciones la puedan utilizar, es decir, se suelen mantener en pie y en uso por mucho tiempo, sin embargo, la mayoría de ellas son diseñadas y construidas para la época que se esté viviendo en ese momento donde lo máximo que se llega a planear es el crecimiento de la familia y poco se toman en cuenta los cambios climáticos y ambientales que se puedan presentar en los siguientes años.

Actualmente las soluciones que se han implementado por parte del gobierno para reducir los efectos negativos que genera la utilización de aires acondicionados han sido programas de apoyo para sustituir los equipos de alto consumo por unos más eficientes como el “Programa de Sustitución de Equipos Electrodomésticos para Refrigerador y Aire Acondicionado” que por medio de la Secretaría de Energía, Nacional Financiera, Comisión Federal de Electricidad y el Fide se ha buscado cambiar estos tipos de equipos de refrigeración, con por lo menos 10 años de antigüedad, por equipos nuevos más eficientes en su consumo de energía al entregar los viejos a cuenta de los nuevos. Sin embargo, este tipo de programas han sido solamente temporales o intermitentes y no solucionan el problema de raíz, ya que, aunque sí representan un ahorro en comparación de los equipos de tecnología más antigua, el gasto que generan sigue siendo significativo, y al presentarse como ahorradores las personas los utilizan con mayor libertad y los consumos se pueden equiparar a los de los equipos menos eficientes. La eficiencia de esta tecnología, en parte, depende del criterio y manejo de las personas que muchas veces puede no ser el más responsable o adecuado. Actualmente de acuerdo a una consulta con el Ing. Leobardo Briceño Ayala, especialista en

aires acondicionados, la tecnología más eficiente para este tipo de equipos es la del sistema *inverter*, el cual trabaja evitando los picos de arranque, que son los responsables de consumir gran cantidad de energía, al mantener el compresor a una velocidad constante sin estar encendiendo y deteniendo constantemente el funcionamiento del mismo para mantener la temperatura deseada, alcanzando a ahorrar entre un 20-25% en comparación de la tecnología anterior siempre y cuando su uso sea el adecuado.

En México, la mayoría de las viviendas no se pueden considerar bioclimáticas ni sustentables, ya que su diseño, materiales y construcción generan impactos negativos en el medio ambiente, en la economía y en la salud y comodidad de los usuarios, al no considerar las características específicas de su entorno local, utilizando prácticamente los mismos sistemas constructivos y diseños similares en cualquier región sin importar las condiciones climáticas ni los materiales particulares del sitio. Por lo general las viviendas convencionales hacen un uso ineficiente de los recursos, lo que genera un gasto de energía eléctrica, gas y agua que podría ser mucho menor en una vivienda con principios bioclimáticos y diseño pensado en el ahorro energético, con consideraciones mínimas como la orientación y asoleamientos, o una configuración que permita la ventilación cruzada, por mencionar algunas.

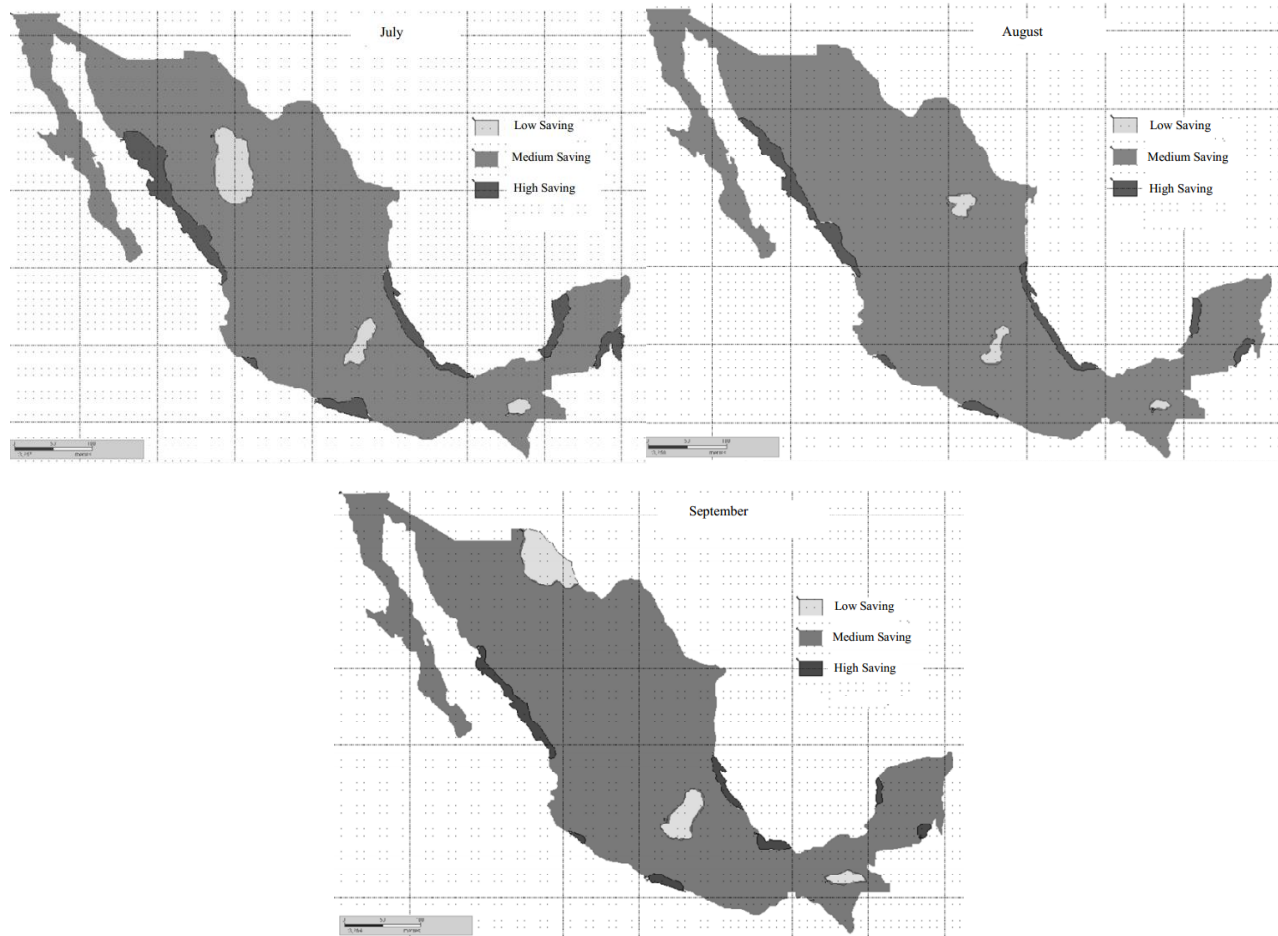
Ante esta problemática se entiende el interés y la necesidad de recurrir a los sistemas de enfriamiento pasivo, ya que representan un alto potencial de ahorro energético.

#### 1.4. Importancia del proyecto

La vivienda es uno de los espacios donde pasamos por lo menos la mitad de nuestro tiempo la mayoría de las personas es nuestro refugio y su principal función es protegernos de lo que pueda pasar en el entorno, por lo tanto, debe de acercarse lo más posible a las condiciones óptimas de habitabilidad. La arquitectura, según Espinosa Cancino & Cortés Fuentes (2015), debe ser capaz de apropiarse del territorio e incorporar las condiciones del clima ya que es la encargada de proporcionar las condiciones para que el usuario pueda relacionarse con su entorno de manera óptima, y lograr al confort ambiental.

##### 1.4.1. Potencial de ahorro energético en México

El sistema pasivo en el que se enfoca este trabajo es la torre de viento, que básicamente, en apariencia, es un tiro similar al de una chimenea común, pero en su caso capta el viento exterior para introducirlo a los espacios interiores, ganando velocidad y perdiendo temperatura durante su trayecto de ingreso gracias a una diferencia de presiones o de temperaturas, con esto se genera una corriente de aire renovado más fresco que puede beneficiar a los usuarios de la edificación. Este tipo de sistema tiene una aplicación muy escasa en México pero representa un gran potencial de ahorro energético relacionado a los problemas térmicos de las zonas cálidas del país ya que la mayor parte del territorio presenta condiciones climáticas y atmosféricas que posibilitan éste tipo de ahorro, mediante el uso de ventilación natural, para mejorar las condiciones de confort en edificaciones; de acuerdo al estudio realizado por Oropeza Pérez & Morillón Galvez (2011) por lo menos la mitad del territorio del país tiene potencial del uso de ventilación natural para la reducción de temperaturas interiores durante todo el año, y por consecuencia, la reducción del uso de equipos de aire acondicionado, en especial de los meses de julio a septiembre, que forman parte de la temporada más calurosa del año por lo menos en el norte del país. Prácticamente todo el territorio presenta potencial de ahorros energéticos de medianos a altos en por lo menos alguna temporada del año; el potencial de ahorros altos se identifica principalmente en algunas zonas costeras de climas cálidos como en Sonora, Sinaloa, Colima, Guerrero, Veracruz, Campeche, Quintana Roo.



**Imagen 1.** Potencial del uso de ventilación natural en México de acuerdo a sus horas de confort higrotérmico, periodo de julio a septiembre. Fuente: Oropeza Pérez & Morillón Galvez (2011, pág. 421 y 422)

#### 1.4.2. Potencial de evitar la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Ante la preocupación que existe por el cambio climático inminente, en diciembre del 2015, se llevó a cabo el Acuerdo de París con el fin de definir acciones colectivas para enfrentar el calentamiento del planeta, en este tratado 195 países se comprometieron a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a través de la mitigación, adaptación y resiliencia. De acuerdo a IMCO (2016) los elementos claves de este acuerdo fueron: mantener la temperatura del planeta por debajo de los 2 °C hacia finales del siglo; cada 5 años los países deben revisar y fortalecer las contribuciones nacionales a partir del 2020; a partir del 2025 dotar de \$100,000 millones de dólares en financiamiento climático para los países en desarrollo; contar con mecanismos de rendición de cuentas para asegurar el cumplimiento de las metas; la adaptación para los países más vulnerables; entre las principales. México es uno de los países que forman parte de

este acuerdo y que presenta gran vulnerabilidad principalmente ante eventos hidrometeorológicos, y sus principales compromisos establecidos son el reducir por lo menos un 22% de sus emisiones de GEI en los sectores de transporte, generación eléctrica, residencial y comercial, petróleo y gas, industria, agricultura y ganadería, residuos y uso de suelo; y 51% de carbono negro para el año 2030.

El uso de un sistema de enfriamiento híbrido que reduzca el requerimiento de energía eléctrica para su funcionamiento presenta, en comparación de un equipo de aire acondicionado convencional, gran potencial de disminuir la generación de gases de efecto invernadero en la producción de esa energía que se deja de consumir contribuyendo a los compromisos hechos por México en el Acuerdo de París principalmente en el sector residencial.

#### 1.4.3. Importancia del desarrollo del prototipo

Actualmente nos enfrentamos a una situación y preocupación energética sin precedentes, cada vez es más difícil disponer de recursos naturales no renovables y los efectos del cambio climático ya son perceptibles y difíciles de predecir, pero todo apunta a condiciones climáticas futuras difíciles y extremas de no hacer cambios radicales en nuestras formas de vida y de consumo.

Ante la búsqueda desesperada de soluciones para la disminución del consumo energético, es necesario desarrollar estrategias y técnicas, bajo los principios de conservación de energía y cuidado al medio ambiente, que favorezcan el diseño arquitectónico. Una de las contribuciones de este proyecto es ofrecer una alternativa de climatización de la vivienda más amigable con el medio ambiente y al mismo tiempo más económica a los habitantes de climas y condiciones medio ambientales de regiones cálidas.

De obtener resultados significativamente favorables a partir del desarrollo del proyecto, podría representar un potencial de aplicabilidad en la mayoría de las viviendas de las regiones cálidas de México, y en una escala mayor, en otros sectores de edificación como el comercio, oficinas, hospitalidad, entre otros.

Otra de las intenciones de este trabajo, es la generación de información para futuros trabajos e investigaciones relacionadas a este tema y principalmente acerca de esta zona en la que poco se ha realizado al respecto, y la cual tiene muchas necesidades en cuestión de confort térmico y gastos energéticos.

Existe el temor recurrente de los habitantes ante los constantes rumores y a veces amenazas acerca de la desaparición de los subsidios de electricidad, lo cual los obligará a padecer el calor o destinar parte significativa de sus ingresos a pagar las cuentas de energía eléctrica. De acuerdo a un artículo de Meana (2016), los subsidios a la energía eléctrica están en peligro de extinción a partir de la entrada del Mercado Eléctrico Mayorista, cuando CFE deje de ser un monopolio y la iniciativa privada pueda competirle, esto se debe principalmente a que los subsidios distorsionan el precio real de la electricidad y dificultan el mercado competitivo, de acuerdo a datos de la Secretaría de Hacienda, citada en éste mismo artículo, los usuarios domésticos pagan menos de 39% del precio real de la energía eléctrica y el 98% del total de usuarios recibe algún tipo de subsidio por parte del gobierno.

Para fines de la investigación se eligió la ciudad de Los Mochis, Sinaloa, ubicada al noreste del país, como base para el desarrollo del prototipo de torre de viento, la principal razón de su elección es que presenta condiciones climáticas extremas, como temperaturas y porcentajes de humedad altos, y velocidades de viento considerables, principalmente en verano, lo que representa un reto que una vez alcanzado será más fácil de adaptar y replicar en zonas con características similares y en zonas con condiciones menos extremas; además se cuenta con acceso y posibilidad de obtención de información e intervención de una edificación residencial específica.

## 2. Marco contextual y Encuadre Conceptual

### 2.1. Antecedentes empíricos del tema

#### 2.1.1. Los Mochis, Ahome, Sinaloa

La zona elegida para el desarrollo del trabajo es la ciudad de Los Mochis, ubicada en el municipio de Ahome al noroeste del estado de Sinaloa, en las coordenadas geográficas latitud: 25.793611 y longitud: -108.996944 a una mediana altura de 10 metros sobre el nivel del mar (msnm).



**Imagen 2.** Ubicación del estado de Sinaloa con referencia a México. Fuente: Elaboración propia con base a mapa de Deffis Caso (1994, pág. 100).



**Imagen 3.** Ubicación de la ciudad de Los Mochis con referencia al estado de Sinaloa. Fuente: Elaboración propia con base a mapa de Deffis Caso (1994, pág. 100).

Sus condiciones climáticas y patrones de consumo de energía ofrecen una oportunidad para las energías alternativas y los sistemas de enfriamiento pasivo como las torres de viento para mejorar las condiciones térmicas interiores en las viviendas.

Según datos del Ayuntamiento de Ahome (s.f.) en el municipio de Ahome predomina el clima cálido seco apenas modificado por precipitaciones pluviales, presenta una temperatura media anual de 33°C y en los últimos 28 años se han registrado temperaturas mínimas de 5°C y máximas de 43°C, siendo los meses más calurosos de julio a octubre y las temperaturas más bajas registradas de noviembre a febrero. En el período de referencia la precipitación pluvial promedió 302.2 milímetros anuales, siendo los meses más lluviosos de julio a octubre. Los vientos dominantes de la región se orientan principalmente en dirección sudoeste y existe una humedad relativa promedio del 65 al 75%.

De acuerdo a las normales climatológicas proporcionadas por CONAGUA, con datos del periodo 1981-2010, y con la herramienta de clasificación climática según el sistema modificado KÖPPEN-GARCÍA, el resultado de Los Mochis es Seco extremoso  $BS0(h')w(x')(e)$ , donde **BS** corresponde a seco o árido, **h'** a muy cálido, **w(x')** a clima seco con algunas lluvias en verano y pocas lluvias en invierno y **e** a extremoso; aunque se clasifica como seco por la baja precipitación pluvial, es importante considerar que se percibe humedad en el ambiente por la cercanía al mar que se encuentra aproximadamente a 20 km del centro de la ciudad.

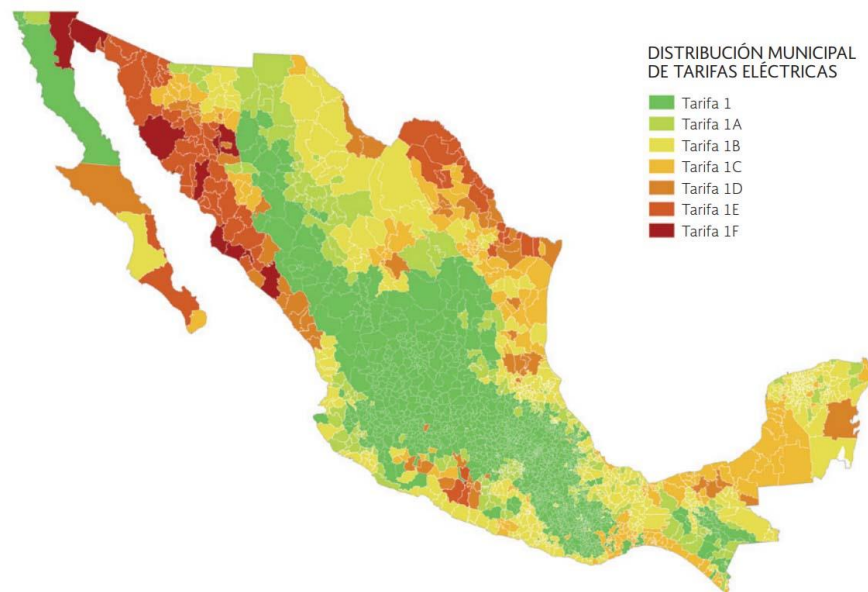
Para tener una idea más clara de lo que estos datos climáticos representan Yetman y Van Devender (2002) en el siguiente fragmento nos describen, desde su percepción, el clima de la región: "...las temperaturas alcanzan los 38°C diariamente durante los meses de mayo a septiembre. Algunas veces pueden ser tan altas que alcanzan los 45°C, ocasionalmente más altas...Durante los meses de verano (finales de abril a mediados de octubre) el calor pasa de caliente a opresivamente debilitante" (pág. 10).

En la ciudad hay un predominio de la vivienda unifamiliar y poca variación de otras tipologías de vivienda. Según datos de SEDESOL (2015) la localidad tiene un grado de marginación muy bajo, de acuerdo a INEGI para el año 2010 el total de viviendas particulares habitadas existentes en la ciudad llegó a 69,761 de las cuales el 99.5% contaban con energía eléctrica y para el año 2015 sólo el 0.6% de las viviendas no contaban con energía eléctrica. Al igual que en otras ciudades de México, la provisión de energía eléctrica de Los Mochis se encuentra bajo las facultades de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

La tarifa de CFE para Los Mochis es 1F la cual es para servicio doméstico para localidades con temperatura media mínima en verano de 33 grados centígrados. Las diferentes tarifas de CFE son asignadas a las diferentes regiones de acuerdo a las temperaturas que logran alcanzar, entre más altas son las temperaturas en verano mayor es el subsidio, la tarifa 1F es la que cuenta con el subsidio más alto.

La ciudad de Los Mochis se encuentra en una de las regiones cálidas del país donde el aire acondicionado es una necesidad y se está convirtiendo en parte de su cultura, ya que el diseño de la vivienda no responde a las características bioclimáticas de la zona, y se resuelven los problemas de confort térmico, principalmente, mediante la climatización artificial.

El consumo de energía eléctrica en esta región es elevado. Mientras que el consumo energético medio anual nacional es de 137 kWh/usuario, en Sinaloa es de 258 kWh/usuario (Sánchez Viveros & Maqueda Zamora, 2011). Esta ciudad tiene consumos cada vez más altos, corriendo el riesgo de sobrepasar el límite de la tarifa 1F de CFE, con la que cuenta actualmente, en las temporadas más críticas de calor (SENER, 2016).



**Imagen 4.** Distribución municipal de tarifas eléctricas. Fuente: González Osorio & Beele (2016)

Como podemos observar en la *Tabla 1* la diferencia en el subsidio entre la temporada de verano y la de fuera de verano de la tarifa 1F es muy significativa, durante la temporada de verano los kWh de consumo básico e intermedio bajo siguen siendo más baratos que el consumo básico de temporada fuera de verano y en cantidad son 16 veces más kWh, lo que nos permite deducir que el gasto energético en verano, debido a las altas temperaturas, puede elevarse alrededor de 16 veces más que el resto del año o que durante verano podemos consumir 16 veces más energía eléctrica por prácticamente el mismo precio.

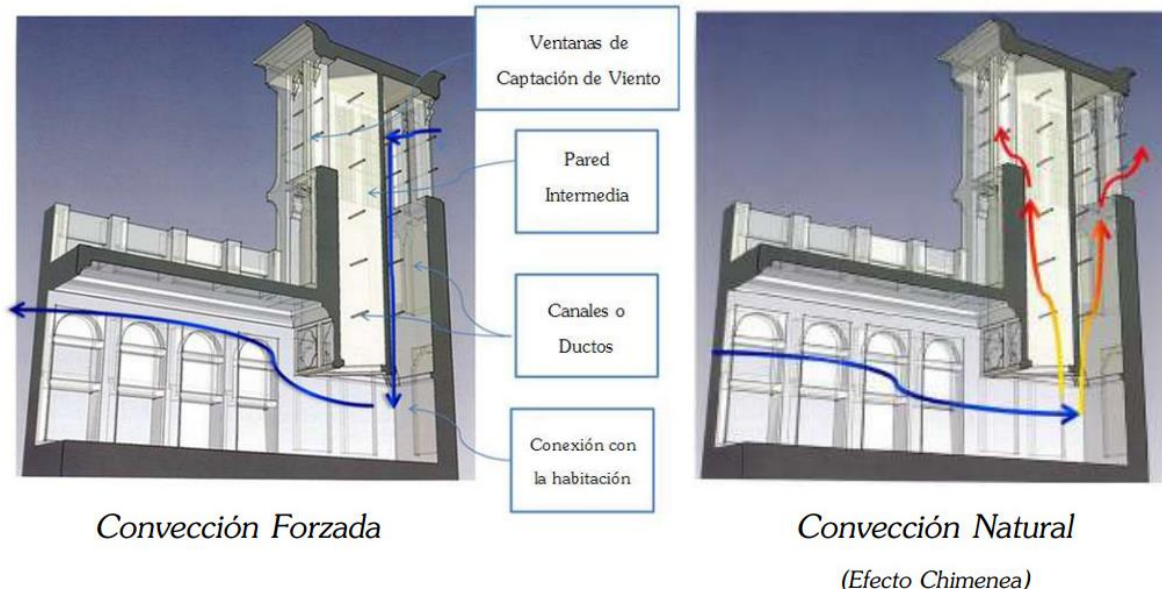
<b>Tarifa 1F (diciembre 2017-2018) para temporada fuera de verano (de noviembre a abril)</b>		
<b>Tipo de consumo</b>	<b>Precio</b>	<b>Cantidad</b>
Consumo básico	\$ 0.793	Por cada uno de los primeros 75 kWh
Consumo intermedio	\$ 0.956	Por cada uno de los siguientes 125 kWh
Consumo excedente	\$ 2.802	Por cada kWh adicional a los anteriores
<b>Tarifa 1F (diciembre 2017-2018) para temporada de verano (de mayo a octubre)</b>		
Consumo básico	\$ 0.583	Por cada uno de los primeros 300 kWh
Consumo intermedio bajo	\$ 0.726	Por cada uno de los siguientes 900 kWh
Consumo intermedio alto	\$ 1.768	Por cada uno de los siguientes 1300 kWh
Consumo excedente	\$ 2.802	Por cada kWh adicional a los anteriores

**Tabla 1.** Tarifa 1F (diciembre 2017-2018). Fuente: Elaboración propia con datos de Comisión Federal de Electricidad (2017).

### 2.1.2. Torres de viento

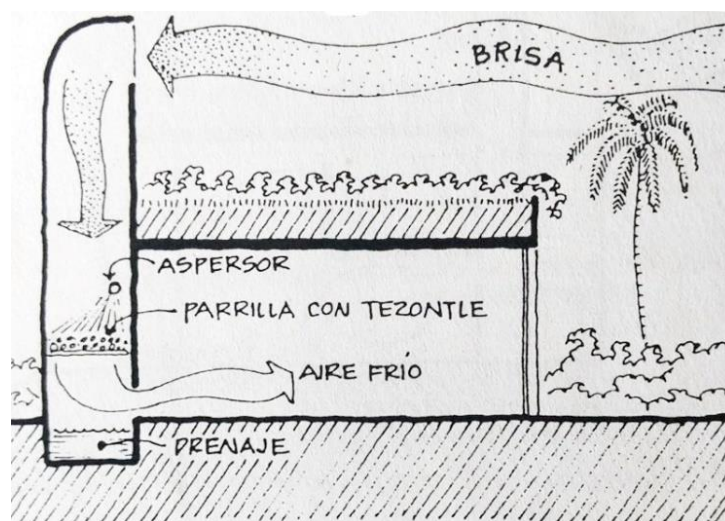
La principal función de las torres de viento es el mantener la circulación de aire fresco y enfriar los interiores de las edificaciones. Funcionan en base a la convección, que puede ser forzada o natural, se denomina forzada cuando el viento se ve obligado a entrar por la torre captadora, y natural cuando el viento no sopla, el aire caliente que se generó en el interior se ve obligado a salir por diferencia de densidades por las mismas aberturas de la torre por donde entra cuando el aire sopla. También, de acuerdo con Deffis Caso (1994), durante la noche cuando el viento no sopla funciona como chimenea ya que, al haberse calentado la envolvente de la torre durante el día, expulsa el aire caliente por convección natural refrescando el interior con la circulación de aire que se genera. “La torre de viento es una estructura masiva hecha de materiales de alto calor específico con el propósito de minimizar la transferencia de calor hacia el ambiente interior del edificio” (Reyes, Moya, Morales, & Sierra-Espinosa, 2013, pág. 211).

En la *Imagen 5* se explica el funcionamiento de las torres y se pueden identificar las distintas partes de las torres tradicionales que permiten que esto suceda.



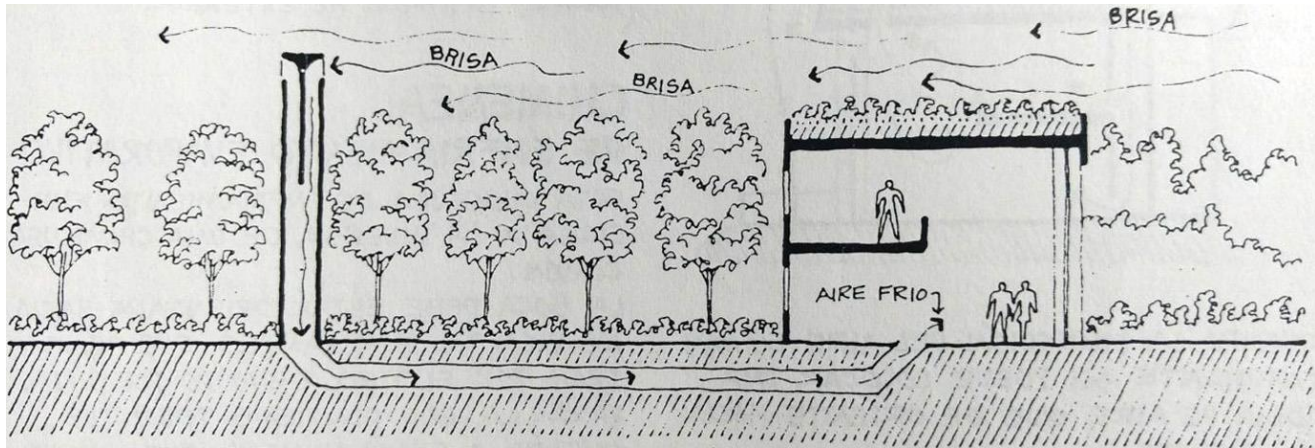
**Imagen 5.** Funcionamiento de las torres de viento. Fuente: (Reyes Herrera, 2016).

El principio de funcionamiento de las torres de viento se ha utilizado en otras variaciones del sistema combinándolo con otros elementos difusores naturales del calor. Un ejemplo es la “Chimenea de enfriamiento evaporativo” la cual se orienta hacia los vientos dominantes al igual que la torre de viento convencional, y el viento al pasar por la columna o tiro se humedece por medio de aspersores y antes de introducirse al espacio deseado pasa por un filtro que contiene tezontle, carbón, o grava húmeda que limpia las impurezas del aire y lo enfría (*Imagen 6*).



**Imagen 6.** Chimenea de enfriamiento evaporativo. Fuente: (Deffis Caso, 1994).

Otra de las configuraciones de torre de viento existentes, es la torre de viento alejada, esta configuración se puede aplicar cuando se cuenta con el espacio necesario, ya que se aleja la torre de la edificación y se conecta a ella por medio de un ducto enterrado en el suelo, esto permite que el suelo baje la temperatura del aire que entra por las aberturas de la torre durante su trayecto, además si el contexto lo permite, se rodea la torre de viento con árboles y vegetación, para evitar las ganancias de calor en su interior.



*Imagen 7.* Torre de viento alejada de la casa. Fuente: (Deffis Caso, 1994).

No se conoce con detalle la antigüedad e historia de las torres de viento, pero de acuerdo a investigaciones realizadas por Mazidi, Dehghani-sanji & Aghanajafi (2007) dedujeron que fueron inventadas por los persas hace cerca de 1000 años y de ahí se fueron esparciendo a diferentes países de Medio Oriente. De acuerdo a Bahadori & Dehghani-sanji (2014) las torres de viento aparecen mencionadas en antigua literatura iraní que data de alrededor de 1500 años, también son descritas por algunos extranjeros viajeros de la historia cuando plasmaron por escrito acerca de sus aventuras por el mundo, como Marco Polo o Jean Baptiste Tavernier, por mencionar a algunos, y es de estos registros de donde se ha podido conocer un poco más de la historia de estas construcciones. Actualmente, se encuentran presentes y en uso, principalmente, en algunas regiones de clima cálido-seco y cálido-húmedo de Medio Oriente y Egipto.



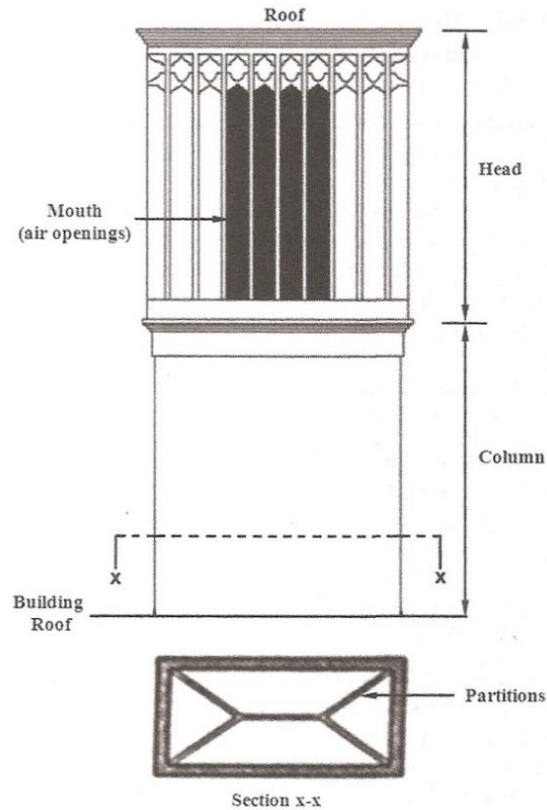
*Imagen 8.* Algunas regiones donde se utilizan las torres de viento son Irán, algunos países vecinos de Medio Oriente y Egipto. Fuente: (Bahadori & Dehghani-sanji, 2014, pág. 9).

Este sistema de enfriamiento pasivo surgió como respuesta a las condiciones de clima extremo en estas regiones del mundo, al igual que el uso de determinados materiales y sistemas constructivos propios de la región.

*“La construcción de Baudgeers (Torres de viento) es considerado uno de los emprendimientos más significativos de la ingeniería creativa y arquitectura iraní” (Bahadori & Dehghani-sanji, 2014, pág. 5).*

Además de encargarse de la circulación de aire al interior de los edificios sin la necesidad del uso de combustibles fósiles para operar, antiguamente, las torres de viento también cumplían una función decorativa, por lo que ahora forman parte de la arquitectura tradicional y representativa de las regiones anteriormente mencionadas.

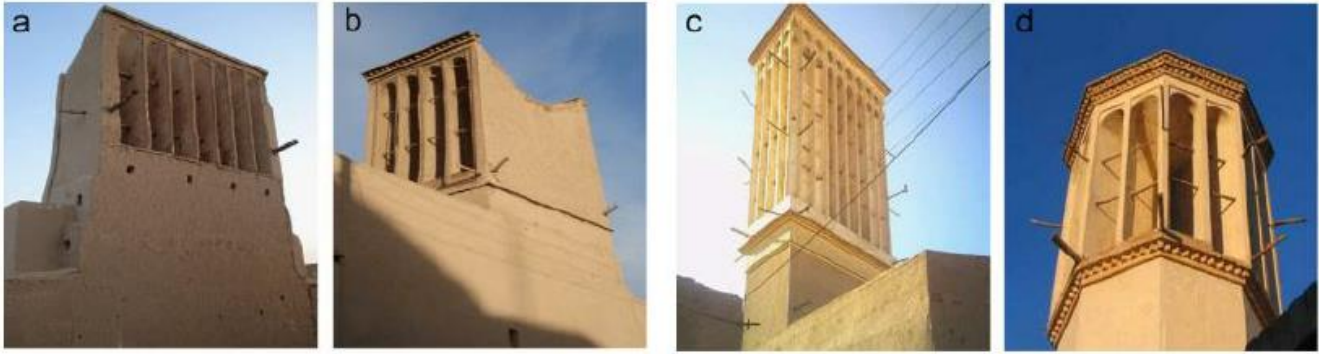
Las torres de viento convencionales están compuestas por distintas partes, las principales son la cabeza, columna, boca (apertura), techo y particiones interiores, como se ilustra en la *Imagen 9*.



**Imagen 9.** Partes principales que componen una torre de viento convencional. Fuente: (Bahadori & Dehghani-sanji, 2014, pág. 79).

Estas torres se pueden encontrar en diferentes tipos y, de acuerdo a Bahadori & Dehghani-sanji (2014), se pueden categorizar en 4 grupos principales de acuerdo al número de sus aperturas:

- *De apertura a una sola cara (a).*
- *De apertura a dos caras (b).*
- *De apertura de cuatro a ocho caras (c y d).*
- *De forma cilíndrica (e).*









**Imagen 10.** Tipos de torres de viento de acuerdo a su número de aperturas y forma. Fuente: (Mourad, Abdel-Rahman, & Ali, 2014).



**Imagen 11.** Torre de viento de forma cilíndrica en Yazd, Irán. Fuente: (Bahadori & Dehghani-sanji, 2014).

Según la región donde hayan sido construidas y las condiciones climáticas particulares, las dimensiones, el diseño y construcción también presentan diferencias distinguibles que responden a estos factores.

	 Iran's arid zone	 Persian gulf	 Iraq	 Egypt	 Pakistan	 Afghanistan
<b>Climatic zone</b>	Hot and dry	Hot and humid	Hot and dry	Hot and dry	Hot and humid	Dry and semi hot
<b>Air direction</b>	North-east	Breeze	North-west	North-west	South-west	North
<b>Shape of cross-section</b>	Square/rectangle hexagon, octagon	Square	Rectangle	Rectangle	Square	Square
<b>Average dimensions (m)</b>	0.5 × 0.8 0.7 × 1.1	1 × 1	0.5 × 0.15 1.20 × 0.60	-	1 × 1	1 × 1
<b>Height (m)</b>	3-5	3-5	1.80-2.10	One story above roof	5 And above	1.5 From roof
<b>Direction according to the airflow</b>	Diagonal	Diagonal	Ordinary	Ordinary	Diagonal	Ordinary
<b>Ceiling of the Wind tower</b>	45° Slope	30° Slope	45° Slope	30° Slope	45° Slope	30° Slope
<b>Ventilated area</b>	Dining room and basement	Dinning plus others	Only basement	Dinning plus one room	All rooms	All rooms
<b>Airflow</b>	Multi-side	Multi-side	One, two-side	One-side	One-side	One-side
<b>Evaporative cooling</b>	Sometimes	Never	Sometimes	Sometimes	Never	Never

**Imagen 12.** Diferentes torres de viento de acuerdo a su ubicación y condición climática. Fuente: (Dehghani-sanij, Soltani, & Raahemifar, 2015, pág. 189).

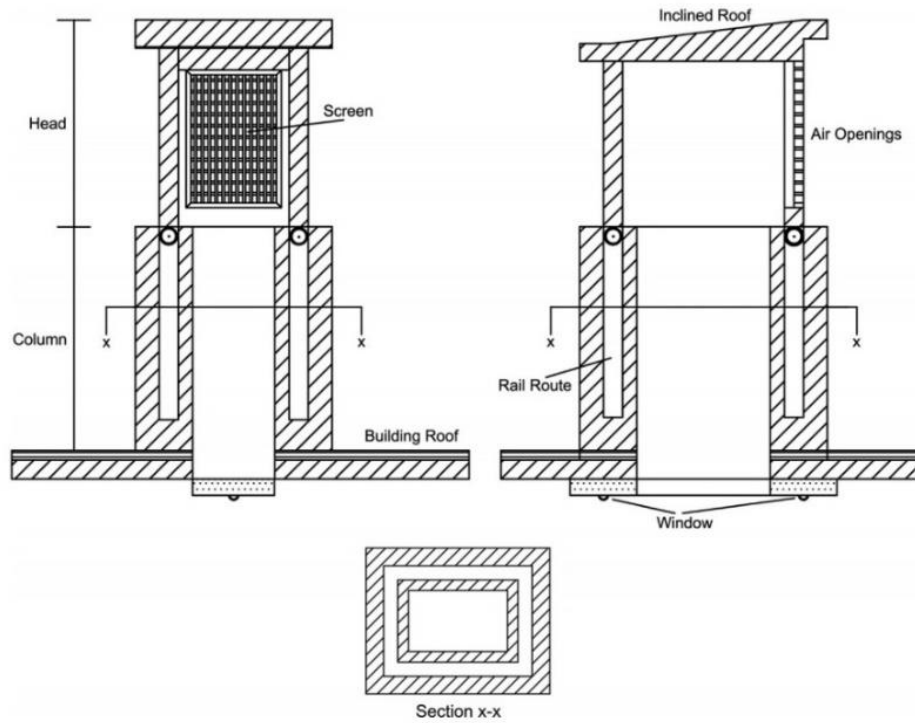
Aunque las configuraciones anteriores son las más tradicionales la realidad es que no existe un diseño específico que se tenga que respetar estrictamente para obtener los resultados de climatización interior deseados, lo importante es que se cumpla con los principios físicos y termodinámicos que puedan generar esas condiciones y esto se puede lograr de distintas formas, con distintas combinaciones de materiales, dimensiones y condiciones climáticas. El sistema captador de viento que se muestra a continuación es una muestra de las diferentes configuraciones de torres de viento que se han diseñado a lo largo de la historia, en este caso pertenece a una casa vieja en Sirjan (Irán), no se cuenta con su fecha exacta de construcción pero se sabe que pertenece a la época del periodo Pahlaví (dinastía que duró entre 1925 y 1979), de acuerdo a Bahadori & Dehghani-sanji (2014) el objetivo de esta singular estructura era combinar la cultura y el arte regional con la arquitectura y el ingenio industrial, tomando de inspiración los embudos de ventilación de los barcos antiguos.



**Imagen 13.** Captador de viento Chopoghi en Irán. Fuente: (Samadiyan, 2013).

Dehghani-sanij, Soltani, & Raahemifar (2015) reconocen a Mehdi N. Bahadori como uno de los pioneros en el estudio de las torres de viento, que ha puesto especial interés en su operación y eficiencia, el cual comenzó a estudiarlas hace ya más de 40 años y realizó algunas propuestas de nuevos diseños de torres de viento, sus dos principales diseños son la torre de viento con columnas húmedas y la torre de viento con superficie húmeda. Con estos nuevos dos diseños obtuvo desempeños más favorables que las torres de viento convencionales y su aplicación es ideal para lugares donde la velocidad del viento es baja. Los nuevos diseños consistieron en agregar cerámica o telas gruesas en el interior de la columna para poder rociar agua sobre sus superficies y conseguir un enfriamiento evaporativo.

Basados en los estudios de Bahadori, y sus nuevos diseños de torre de viento, Dehghani-sanji, Soltani & Raahemifar (2015), propusieron un nuevo diseño de torre de viento para ventilación pasiva, donde se lograron superar algunas de las limitaciones de las torres de viento tradicionales. Esta propuesta de diseño (*Imagen 14*) cuenta con una cabeza movable y operable para aprovechar mejor la corriente principal de aire; tiene una pantalla para limitar la entrada del polvo, los insectos y animales pequeños; y el techo tiene una pendiente para que el agua no se estanque. Dentro de la columna tiene unos rieles para poder ajustar la altura y posición de la cabeza, y la ventana también es operable para abrirla o cerrarla según convenga, esto puede ser de manera manual o electrónica. En este caso las torres son construidas in situ con los mismos materiales del resto del edificio y las dimensiones dependen de algunos parámetros como las dimensiones y materiales del edificio, la velocidad del viento en la región de aplicación, la seguridad y las necesidades de enfriamiento del edificio.



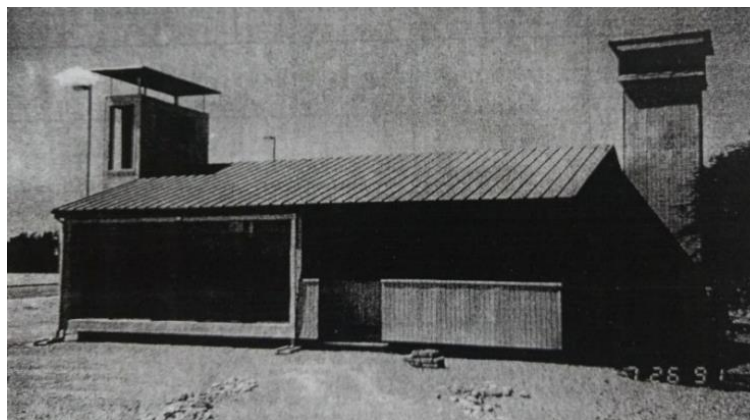
**Imagen 14.** Representación esquemática de la propuesta de torre de viento. Fuente: (Dehghani-sanij, Soltani, & Raahemifar, 2015, pág. 189).

El desarrollo habitacional de energía cero BedZED ubicado en los suburbios de Londres, Inglaterra, utiliza una ventilación pasiva por medio de una especie de chimeneas que recuerda al captador de viento Chopoghi en Irán ya que la configuración de sus “torres” es similar, además que también forma parte del diseño estético de la edificación siendo un detalle que permite fácilmente su identificación, en este caso no es necesario tener un captador hacia cada orientación ya que su diseño permite que el ingreso de aire sea giratorio orientándose hacia los viento más fuertes en todo momento.



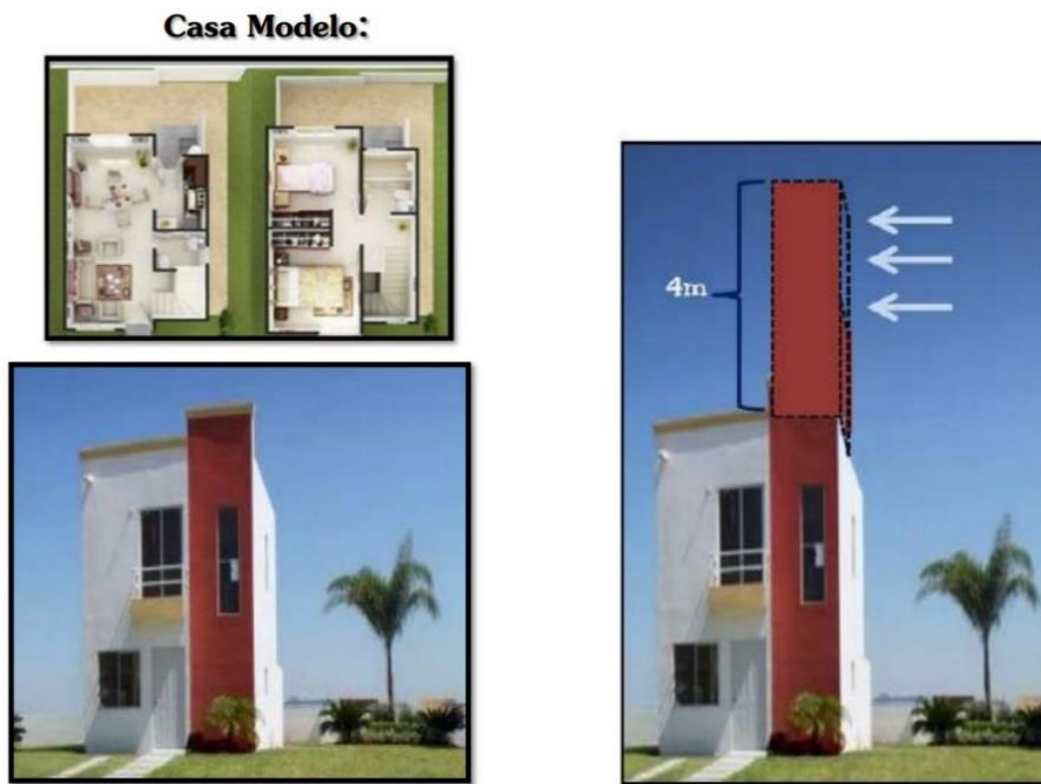
**Imagen 15.** Ventilación BedZed, Londres. Fuente: (Lyon, 2009).

De acuerdo a Givoni (1998) Cunningham & Thompson desarrollaron un tipo de torre de viento llamada la torre “Arizona” en honor a su ubicación en Tucson, Arizona. Esta torre tenía algunas peculiaridades como unas almohadillas humedecidas en las paredes interiores de la torre para humedecer el aire, el agua caía al fondo de la torre, y por medio de una bomba era recirculada para reutilizarse en el ciclo. El diseño del sistema completo contemplaba, además de la torre de viento, una chimenea solar para favorecer la circulación del aire.



**Imagen 16.** Torre Arizona – Torre de viento a la derecha y chimenea solar a la izquierda. Fuente: (Givoni, 1998).

En México son pocos los estudios y experimentos que se han realizado o de los que se tiene registro. Reyes, Moya, Morales & Sierra-Espinosa (2013) realizaron un estudio para demostrar la factibilidad de aplicación de las torres de viento como sistema de enfriamiento pasivo en la vivienda popular en climas áridos y semi-áridos del norte de México, especialmente en la ciudad de Monterrey, Nuevo León. Para este estudio se tomó una casa modelo (*Imagen 17*), una vivienda de interés social que contara con características comunes en este tipo de viviendas en la región, y en base a ella se desarrolló el proyecto. Se estudiaron las características que necesitaría tener una torre de viento y la ubicación ideal para que pudiera ayudar a alcanzar el confort térmico en el interior de la vivienda.



*Imagen 17.* Casa Modelo. Fuente: (Reyes Herrera, 2016)

Este proyecto de acuerdo a Moya Acosta (2013) abarcó, básicamente, 2 etapas: 1) Experimental y 2) Simulación numérica. La primera etapa consistió en probar prototipos a escala en túnel de viento para medir perfiles de velocidad y definir patrones de flujo para diferentes configuraciones de torres de viento; la segunda etapa se elaboró con el apoyo de Fluent CFD, y por medio de estudios de Velocimetría por

Imagen de partículas (PIV), la cual es una es una técnica de medición que permite obtener campos instantáneos de velocidades de flujo y líneas de corriente por medio de imágenes. Para la simulación se tomaron en cuenta distintos factores que pueden afectar los flujos de viento interiores como son el efecto de los ocupantes como fuentes de calor y el efecto del mobiliario.

Algunas de las conclusiones a las que se llegó fueron que la ventilación que aporta el abrir puertas y ventanas en una casa no es suficiente para alcanzar el confort térmico interior ya que no se alcanzan las velocidades requeridas; la integración de la torre de viento en la vivienda incrementó la velocidad del viento de 3 a 4 veces y mejoró la distribución del mismo en el interior; el área de las escaleras es una de las zonas a considerar para la incorporación de la torre de viento para mejorar el confort térmico, principalmente, en planta alta; entre otras.

Se planeaba construirla para ver su funcionamiento real; monitorear la vivienda, después incorporarle el prototipo de torre y finalmente volver a monitorearla, con el fin de que fuera el primer prototipo demostrativo a nivel nacional, pero en palabras de la Dra. Sara Lilia Moya “la empresa tuvo problemas de toda índole” y no se ha podido llevar a cabo.

### 2.1.3. Desventajas del modelo tradicional de torre de viento

A diferencia de México, las torres de viento han tenido una gran implementación en países de Medio Oriente, en especial en Irán, donde las condiciones climáticas son extremadamente calurosas y secas. La construcción de este tipo de torres se planea desde la primera concepción de la edificación, basando la distribución espacial en torno al funcionamiento de la torre, ya que son indispensables para la habitabilidad de las edificaciones por las altas temperaturas que se presentan. Las Torres de viento tradicionales son de gran tamaño y altura, de construcción masiva al igual que el resto de la edificación, y de gran diversidad de formas y diseños que responden a las condiciones particulares tanto de la edificación como de la climatología y cultura local. Estas características de las torres de viento tradicionales dificultan en gran medida su integración a algunos tipos de viviendas comunes ya existentes como en el caso de México, ya que estas no están diseñadas ni construidas para contar con un sistema de este tipo. Para lograr adaptar una torre de viento tradicional sería necesario cambiar distribuciones interiores, reforzar la estructura, cambiar materiales y acabados, entre otras acciones que podrían hacer inviable económica y estructuralmente el proyecto.

Actualmente existe mínima información acerca de torres de viento o captadores de viento que hayan sido probados en México y es difícil encontrar ejemplos de su aplicación en el país. La mayoría de los estudios a lo largo del tiempo, y especialmente en la actualidad, se han realizado en Medio Oriente con las condiciones específicas que estos países presentan. Los estudios más abundantes y recientes han sido realizados por investigadores y científicos iraníes que han propuesto adaptaciones a las torres de viento tradicionales así como nuevos diseños de las mismas, de tal manera que se puedan adaptar a las tipologías de vivienda contemporáneas, de tamaños reducidos, diseños más sencillos y fácil mantenimiento, pero de acuerdo a Dehghani-sanij, Soltani, & Raahemifar (2015) aún falta más trabajo para el desarrollo de estas nuevas torres de viento y analizar los nuevos diseños para poder mejorar su funcionamiento y operación. Los nuevos desarrollos y estudios acerca de las torres de viento también pueden enfocarse en otras regiones del mundo con potencial de aplicabilidad en las que poco se ha contemplado su uso.

El diseño tradicional de las torres de viento también presenta algunas desventajas técnicas que es necesario concientizar para poderles dar una solución, de acuerdo a Bahadori & Dehghani-sanji (2014) las principales desventajas son que por la apertura o aperturas por las que ingresa el viento también puede entrar polvo, insectos, aves u otros animales pequeños; si la torre cuenta con más de una apertura, parte del viento se puede perder entre ellas disminuyendo su eficiencia; dependiendo del material del que esté construida podría no alcanzar las necesidades térmicas de una edificación en un día caluroso; la velocidad del viento en la región es determinante, de tener una velocidad baja su efectividad no sería muy buena. Todos los aspectos antes mencionados podrían determinar el éxito o fracaso de nuevas propuestas y prototipos de torres de viento pensadas para la arquitectura contemporánea y regional, desde que afecte el modo de vida actual de los usuarios, su salud o simplemente no cumpla con las funciones esperadas.

#### 2.1.4. Software Autodesk CFD

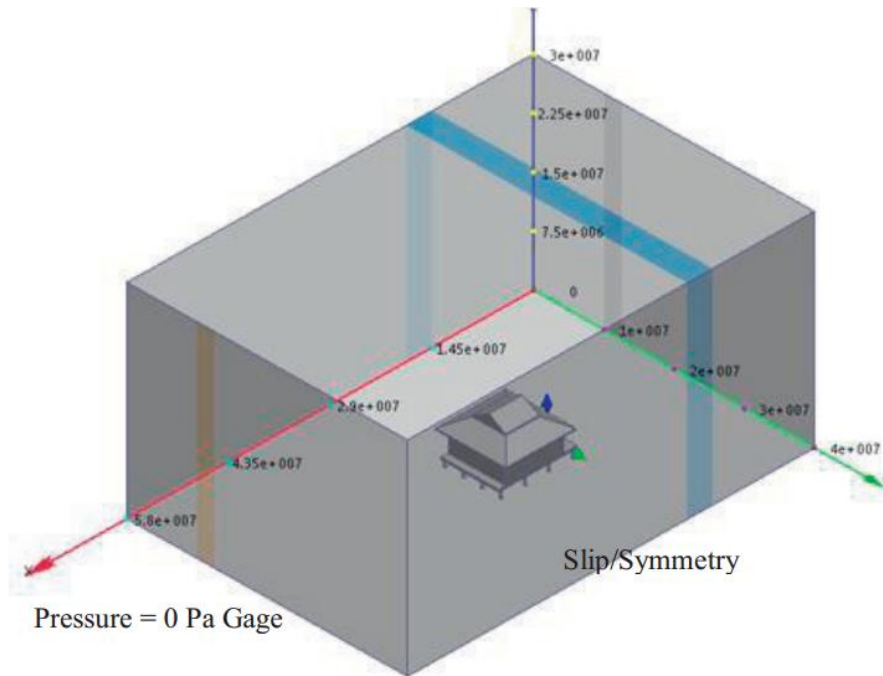
Existen diversos softwares para simulación CFD en el mercado que permite el análisis de elementos finitos para predecir, mediante ecuaciones matemáticas realizadas por una computadora, cómo se comportará un producto ante distintas variables de efectos físicos del mundo real como el calor y el flujo de fluidos.

El desarrollador de software para diseño, ingeniería y entretenimiento Autodesk tiene disponible el software Autodesk CFD que fue el utilizado durante la elaboración del presente trabajo. Durante la revisión documental se encontraron algunas otras investigaciones donde este programa en particular fue

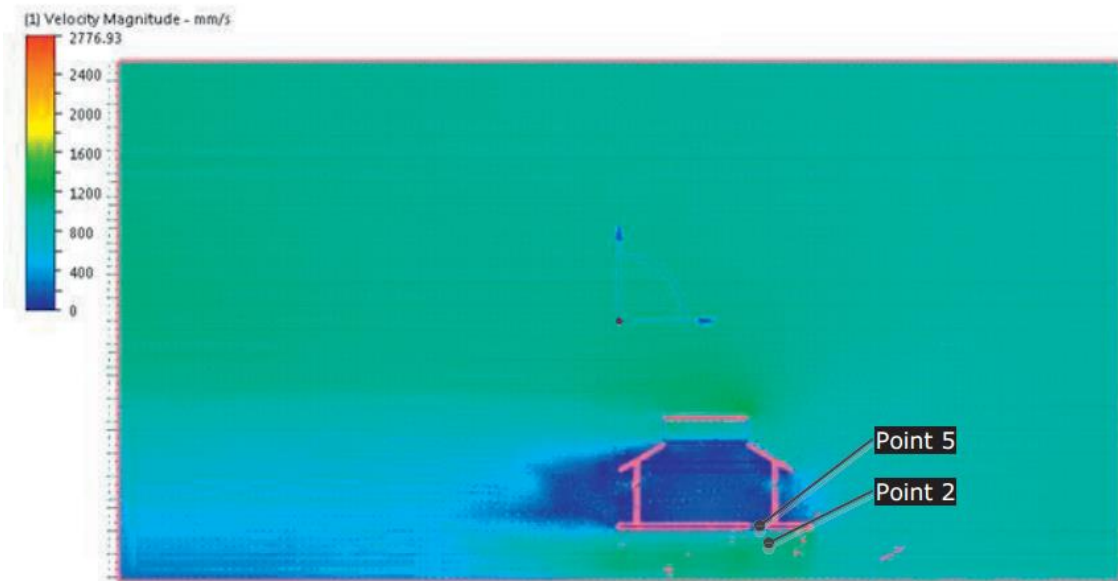
utilizado, como la realizada por Kristianto et. al (2014) que analizaron las condiciones de confort térmico y de velocidad del viento dentro de una vivienda tradicional de Minahasa en Indonesia con clima tropical, con el objetivo principal de encontrar características de diseño bioclimático en la arquitectura vernácula que puedan ser incorporadas en la arquitectura contemporánea. Durante la investigación se consideraron 12 variaciones de casa de acuerdo a los vanos y altura de la casa elevada, que fueron modelados en el programa Autodesk Revit y luego exportadas a Autodesk CFD para su correspondiente simulación. Para la simulación se creó un volumen circundante para representar el ambiente exterior y se utilizaron 3 diferentes condiciones de frontera para este volumen: velocidad del viento, presión y deslizamiento del viento.



**Imagen 18.** Vivienda tradicional en Minahasa. Fuente: (Kristianto, Utama, & Fathoni, 2014, pág. 173)



**Imagen 19.** Condiciones de frontera en el modelo CFD para volumen exterior en el análisis de vivienda en Minahasa. Fuente: (Kristianto, Utama, & Fathoni, 2014, pág. 175)



**Imagen 20.** Resultado de simulación de magnitud de velocidad de una de las variaciones de casa tradicional. Fuente: (Kristianto, Utama, & Fathoni, 2014, pág. 178)

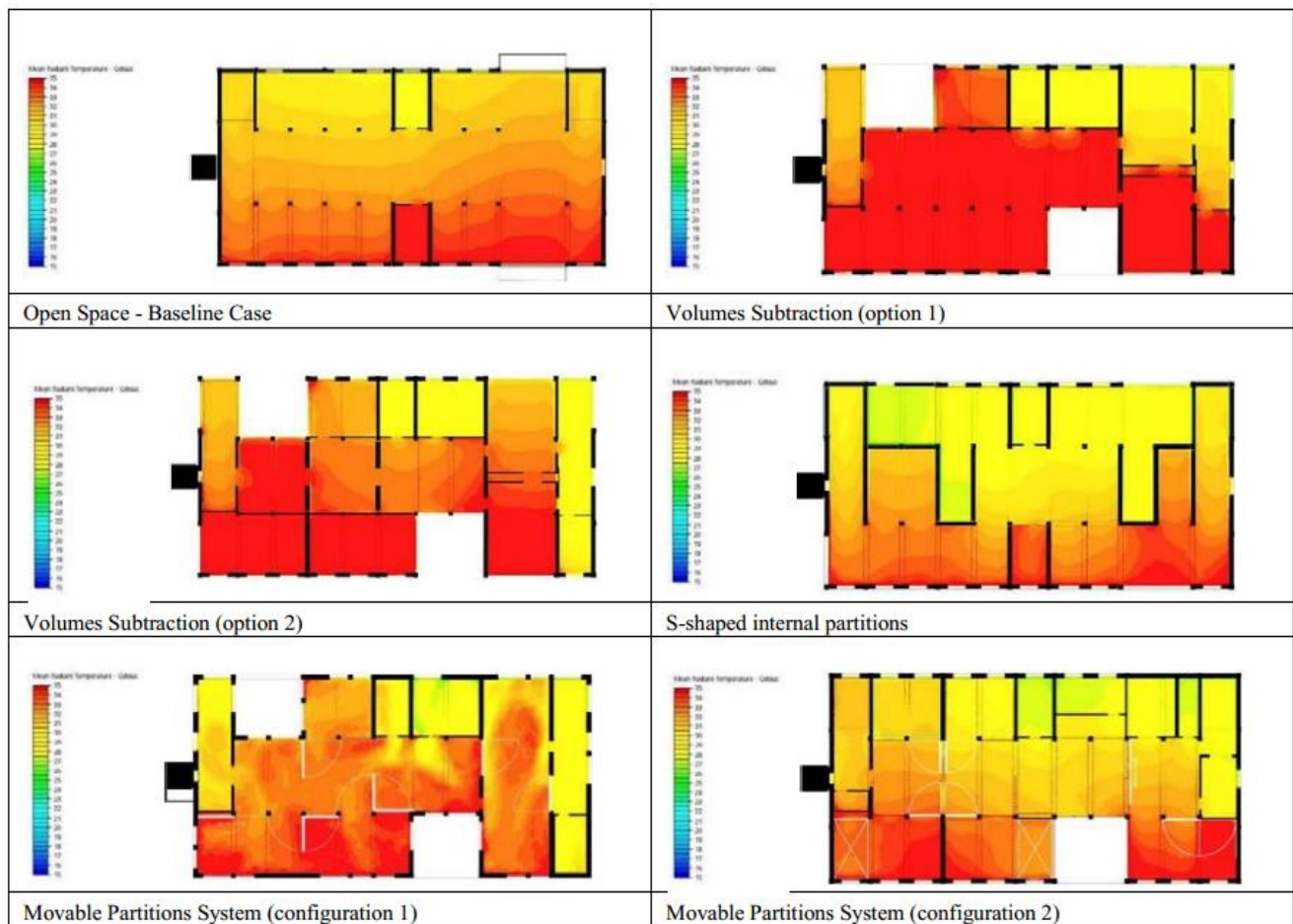
Las conclusiones a las que llegaron fueron que la simulación CFD puede proporcionar información con antelación acerca del confort térmico en las edificaciones al diseñador. En el caso de la vivienda tradicional de Minahasa obtuvieron resultados como que la altura de los pilotes sobre los cuales se encuentra elevada la vivienda y la altura de los vanos contribuye a lograr un mejor confort térmico, logrando mayor velocidad interna del viento; la aplicación de una chimenea solar en la casa de piso elevado mejora potencialmente la velocidad del viento dentro de la casa; el área sombreada debajo de la casa durante el día hará que la temperatura del aire en esta área sea más baja y adecuada para la entrada de aire, entre otras.

Otra de las investigaciones utilizando el software Autodesk CFD fue la realizada por Naboni et. al. (2017) en su trabajo titulado y traducido como “Mapas de Confort Térmico-CFD para el Diseño Arquitectónico Interior”, analizan la opción de utilizar un software de CFD para crear mapas visualizables de confort térmico espacial de las edificaciones para que los diseñadores puedan comprender el flujo de calor a través de las partes del edificio y sus espacios y poder tomar decisiones de diseño cualitativo en una fase conceptual del diseño. Los mapas de temperatura radiante promedio se utilizaron para diseñar la remodelación de un pequeño edificio educativo en Copenhague.

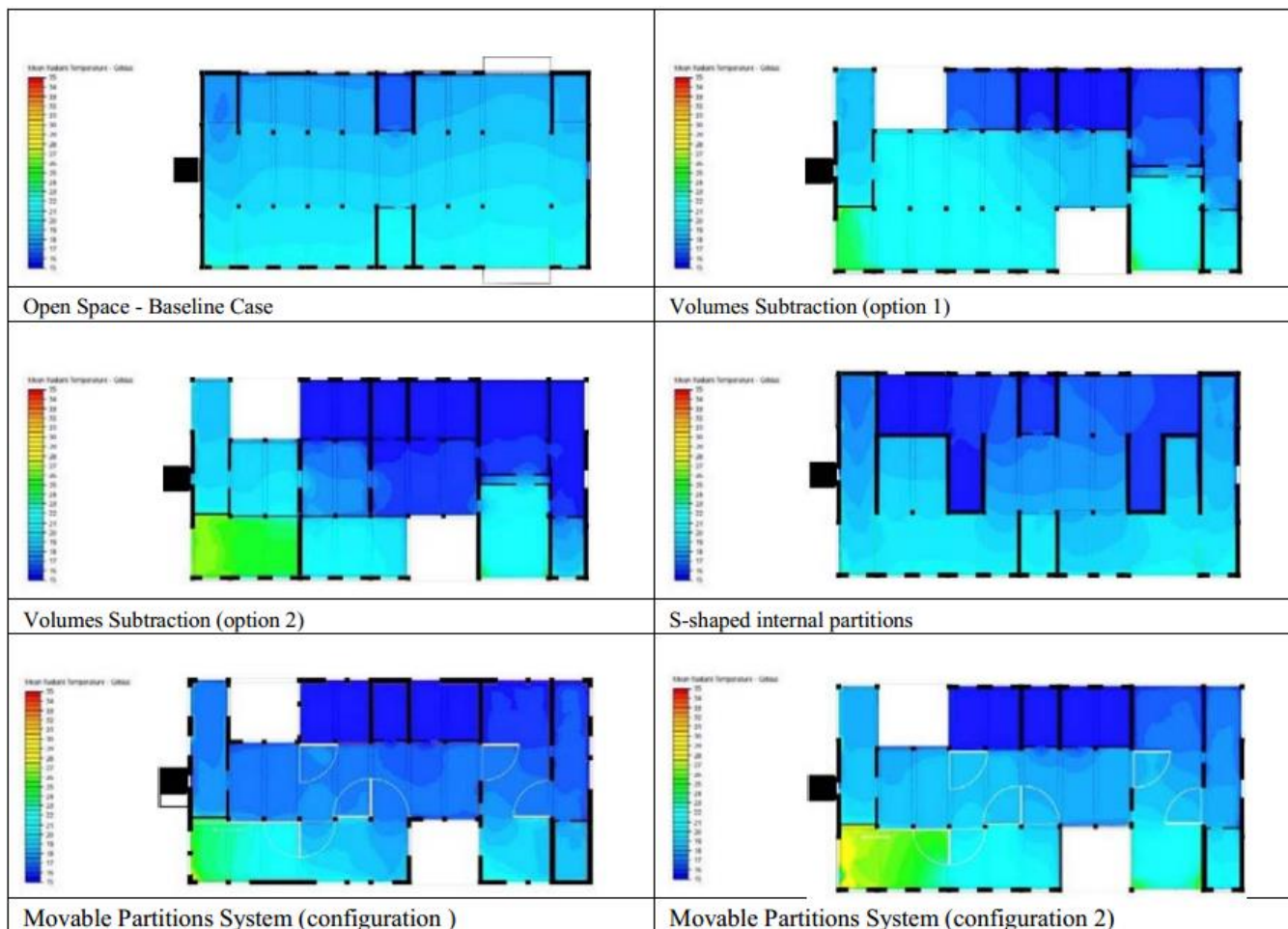


**Imagen 21.** Edificio de caso de estudio de “Mapas de Confort Térmico-CFD para el Diseño Arquitectónico Interior”. Fuente: (Naboni, Lee, & Fabbri, 2017, pág. 113)

El edificio tiene un uso flexible por lo cual se consideraron particiones móviles, para los diferentes usos que puede tener, creando distintas configuraciones interiores que pueden generar variedad en las condiciones térmicas. Para realizar las simulaciones primero modelaron las distintas configuraciones del edificio en el programa de cómputo *Rhino* y posteriormente fueron importados al programa *Autodesk CFD*. Las simulaciones se consideraron para un día típico de verano y para un día típico de invierno ambos a mediodía.



**Imagen 22.** Comparación de mapas de simulación térmica de edificio en Copenhague de acuerdo con las diferentes configuraciones de distribución espacial interior en un día de verano. Fuente: (Naboni, Lee, & Fabbri, 2017, pág. 114).

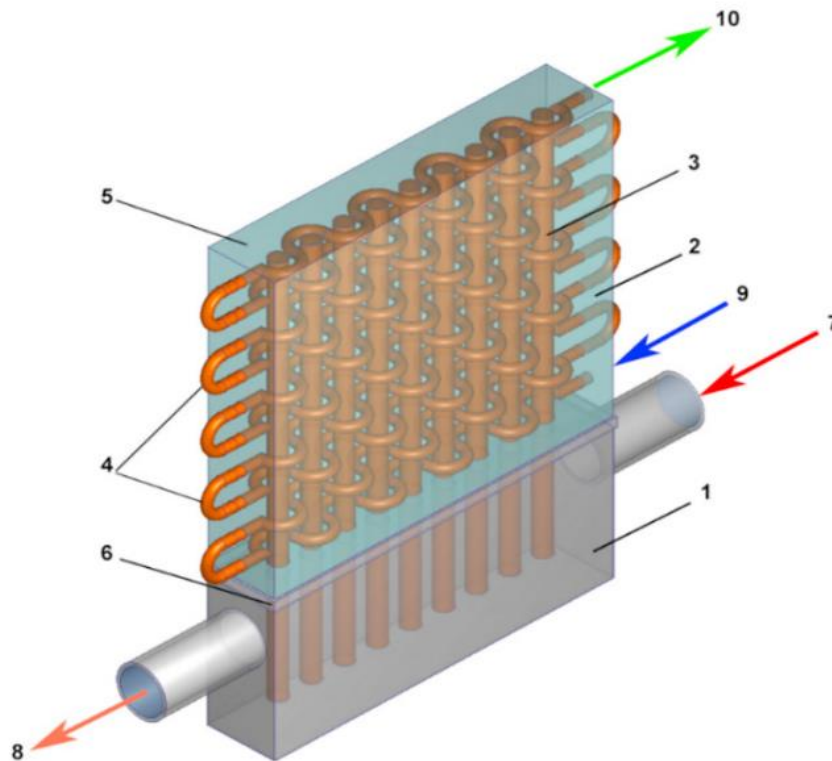


**Imagen 23.** Comparación de mapas de simulación térmica de edificio en Copenhague de acuerdo con las diferentes configuraciones de distribución espacial interior en un día de invierno. Fuente: (Naboni, Lee, & Fabbri, 2017, pág. 115).

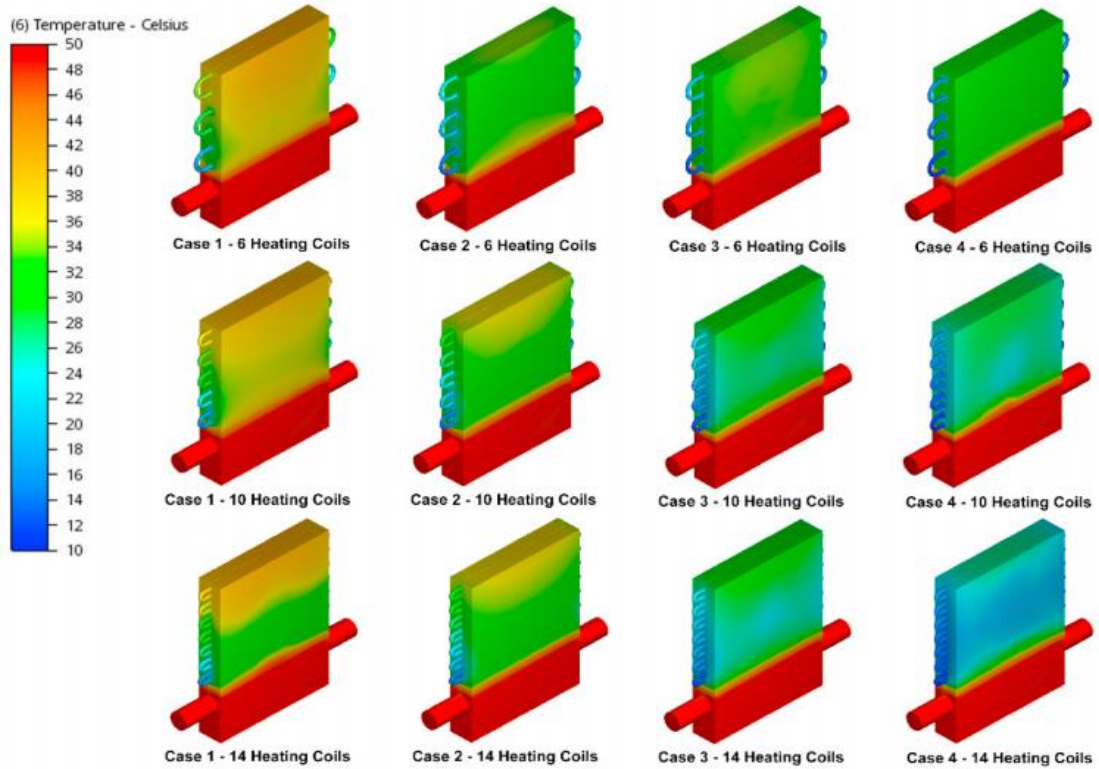
Las simulaciones proporcionaron una visualización completa de las condiciones térmicas que pueden relacionarse fácilmente con las configuraciones espaciales, resaltando cómo las particiones internas son una oportunidad para diseñar condiciones térmicas. En esta investigación concluyen que para lograr una comprensión centrada en el usuario de los espacios es clave contar con herramientas que permitan modelar las condiciones térmicas mostrando información visual para ayudar al diseño de edificios cómodos y respetuosos con el medio ambiente.

El programa Autodesk CFD también se ha utilizado en otras investigaciones de transferencia de calor a menor escala que también está relacionado con el trabajo que se presenta en este documento. Burlacu et. al. (2018) realizaron un análisis de transferencia de calor con el apoyo de Autodesk CFD titulado y

traducido como “Sistema innovador para la recuperación de calor del agua usada en el sector de la edificación” donde simulan un intercambiador de calor modelado en 3D en el software Autodesk Inventor e importado posteriormente en Autodesk CFD para simular su comportamiento en diferentes escenarios hipotéticos para determinar el comportamiento de la energía en el sistema propuesto. Se utilizó un rango de temperaturas en el agua de entre y 60 °C cubriendo las temperaturas usuales del agua usada en las edificaciones y diferentes configuraciones de serpentín de calentamiento.



**Imagen 24.** Intercambiador de calor: 1-Evaporador, 2-Condensador, 3-Tubo de calor, 4-Serpentín de calentamiento, 5-Parafina RT-20, 6-Placa de separación. 7-Entrada de agua usada, 8-Salida de agua usada, 9-Entrada de agua fría, 10-Salida de agua calentada. Fuente: (Burlacu, y otros, 2018, pág. 725).



**Imagen 25.** Comparación de resultados de simulación de temperatura estática de las diferentes configuraciones en 3D.

Fuente: (Burlacu, y otros, 2018, pág. 727).

Los resultados de las simulaciones numéricas demostraron la viabilidad del sistema propuesto para utilizar el agua calentada previamente utilizada para precalentar o calentar el agua doméstica demandada dentro del edificio.

## 2.2. Referencias conceptuales del tema

A lo largo de la historia del ser humano, la preocupación por la sustentabilidad ha estado presente de un modo o de otro, desde racionalizar los alimentos, las semillas, el dinero, esto generado por el simple hecho de la incertidumbre, de no saber si en el futuro lo necesitaremos y no será tan fácil de conseguir. Algunas catástrofes ambientales sucedieron siglos atrás por la explotación desmedida de los recursos naturales, sin embargo, el término de sustentabilidad no fue definido hasta más adelante en el tiempo.

Principalmente en los años 70 fue cuando una preocupación real por el medio ambiente se hizo consciente y se empezaron a desarrollar los términos y conceptos relacionados al desarrollo y crecimiento desde el equilibrio ecológico. No fue hasta 1987, que se definió y se dio a conocer el término Desarrollo Sustentable, en el Informe Brundtland de la Comisión Mundial para el Medio Ambiente y el Desarrollo, de las Naciones Unidas, como el tipo de desarrollo que permite satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias, basándose en tres ámbitos: ambiental, económico y social, donde no se aísla a los problemas ambientales de otros problemas como la pobreza y la desintegración social. A raíz de esto podemos entender por sustentabilidad el proceso que hace posible la existencia de la humanidad indefinidamente, con una vida sana y segura, pudiendo satisfacer sus necesidades, en armonía con la naturaleza. De acuerdo con López López (2003) la sustentabilidad trata de la obligación moral que tenemos las generaciones actuales con las generaciones futuras, para que tengan un mundo por lo menos igual de diverso, limpio y productivo como en el que nosotros vivimos.

Con el paso del tiempo, los seres humanos, a medida que los avances tecnológicos son mayores en menor tiempo basamos nuestras necesidades en la transformación de distintos tipos de energía a energía calorífica y energía eléctrica, principalmente. para nuestras actividades cotidianas como calentar agua, la cocción, preparación y conservación de alimentos, climatización artificial, entretenimiento, etc. La forma más común de generar estos tipos de energía depende mayormente de los hidrocarburos, que además de ser un recurso no renovable, en su proceso de transformación, produce grandes cantidades de contaminación al medio ambiente.

Existen procesos que ocurren en la sociedad humana que, en mayor o menor medida, causan impactos en la calidad del ambiente, según Limón Rodríguez et. al. (2014), estos procesos son el crecimiento demográfico, los patrones de consumo y de producción; la demanda económica, los mercados y el

comercio; la aplicación de políticas de desarrollo urbano y rural; el fomento de la educación, la capacitación y la toma de conciencia. En realidad, todas nuestras acciones y actividades tienen algún tipo de impacto en el medio ambiente, la climatización artificial es uno de los actos humanos y tecnologías que generan contaminación. Se ha vuelto una necesidad poder alcanzar una temperatura interior diferente a la del exterior en gran parte del mundo y del país, principalmente en regiones donde el clima puede llegar a temperaturas muy bajas o muy altas. Generar la energía que estos equipos requieren es el principal responsable de las emisiones de CO<sub>2</sub> de las edificaciones durante las diferentes etapas de su vida, siendo el CO<sub>2</sub> uno de los principales gases que contribuyen al fenómeno del calentamiento global. Por esto del interés y la necesidad de recurrir a soluciones que representen un alto potencial de ahorro energético y poder mejorar la eficiencia energética de las edificaciones.

De acuerdo a datos de la Secretaría de Energía citados por Echeverría Aguilar (2016), la eficiencia energética son todas las acciones que llevan a la reducción de la cantidad de energía que se necesita para satisfacer las necesidades energéticas que requiere la sociedad de una manera económicamente viable, donde se asegure que el nivel de calidad será mínimamente igual al convencional, y que los impactos negativos provenientes de la generación, distribución y consumo de energía serán menos.

### *Sistemas de enfriamiento pasivos*

Los sistemas de enfriamiento pasivos, al no requerir de energía eléctrica para operar, representan un alto potencial de ahorro energético debido a la escasez y a los elevados precios de los combustibles fósiles actuales, sin olvidar las emisiones de gases que contribuyen al calentamiento global que generan en sus procesos, los sistemas de enfriamiento pasivos toman gran importancia como solución a los grandes problemas ambientales, económicos y sociales que estamos enfrentando, y ante los pronósticos poco alentadores del cambio climático, donde podrían representar de alta utilidad para la adaptación de las edificaciones a las condiciones extremas esperadas para las próximas décadas. A continuación, se presentan algunas de las definiciones de sistemas pasivos expuestas por autores reconocidos en el tema:

Fuentes Freixanet (2004) define a los sistemas pasivos como aquellos que, sin la intervención de ninguna fuente de energía, permitan captar, controlar, almacenar, distribuir o emitir aportes de la energía natural.

Según Morillón Gálvez “Los sistemas pasivos se caracterizan por formar parte de la estructura misma de la edificación que como parte de la cubierta arquitectónica, dan ventajas térmicas al funcionamiento

eficiente del edificio y lo mantienen dentro de un rango de temperaturas confortables para el cuerpo humano”. (2004, pág. 6 y 7)

De acuerdo a Givoni (1998), en el caso de los sistemas de enfriamiento pasivos, pueden utilizarse diferentes disipadores naturales de calor para cumplir su propósito, como son el aire ambiental, la atmósfera, y el suelo bajo la superficie. Según este autor los sistemas de refrigeración pasiva incluyen:

- Ventilación de confort: Proporcionar confort humano directo por la ventilación natural, sobre todo durante las horas diurnas.
- El enfriamiento por ventilación nocturna: Bajar la temperatura diurna del interior, ventilando el edificio por la noche.
- El enfriamiento radiante: Utilizando el proceso de la radiación de onda larga hacia el cielo nocturno.
- Enfriamiento directo, sin elementos mecánicos: enfriamiento evaporativo del aire de ventilación.
- Enfriamiento indirecto: La refrigeración por evaporación del edificio por techos-estanques y paredes húmedas conductoras impermeables.
- El suelo de refrigeración: La utilización del suelo como fuente de refrigeración para edificios.

La factibilidad de aplicar un sistema de refrigeración pasiva depende del tipo de edificio y el clima. Algunos de estos sistemas sólo se pueden aplicar en determinados tipos de edificios o en condiciones climáticas específicas. También dependen de las expectativas de confort que tengan los usuarios, que como se mencionó anteriormente, variarán dependiendo de la sociedad, la región o el país en el que se encuentren.

### *Sistemas de enfriamiento híbridos*

En el caso de esta investigación se trabaja con un sistema híbrido el cuál se basa en los principios del enfriamiento pasivo, utilizando disipadores de calor naturales para enfriar el aire, pero requiere de un mínimo de energía eléctrica (en comparación de los aires acondicionados convencionales) para operar una máquina de fluido y poder lograr su objetivo.

De acuerdo a Heras “una máquina de fluido es un sistema mecánico que intercambia energía con el fluido que está contenido o que circula a través de ella” (2011, pág. 121). Esta energía se plantea que sea utilizada en una máquina de fluidos para la circulación de agua dentro del sistema como intercambiador de calor. Existen distintos tipos de máquinas de fluidos y las bombas hidráulicas de uso doméstico son una de ellas,

las cuales dentro de sus usos tienen la finalidad de elevar o mover el fluido que circula por ellas de un punto a otro. Las bombas de agua más comunes para usos domésticos se engloban dentro de la categoría de electrobombas centrífugas, esto quiere decir que su motor se activa por medio de energía eléctrica y que utiliza una fuerza centrífuga para propulsar el agua que entra a su sistema.

### Confort térmico

El concepto de “Confort térmico” es un término que tiene un componente subjetivo, ya que se manifiesta a través de la sensación térmica, y que depende de cada individuo, lo que a una persona le puede parecer agradable, cómodo, confortable, puede que a otra no le parezca así. Existen diversos factores que ocasionan que esto suceda, desde los antecedentes espaciales y climáticos personales hasta la herencia genética, la edad y género de las personas. Según Mayorga Cervantes (2012) cada grupo humano puede tener diferencias en los umbrales que delimitan su zona de confort térmico, dependiendo del espacio natural y edificado, el tiempo histórico donde se encuentre, y la forma en que habite el espacio. Una persona que habite en una zona cálida sentirá calor y frío a temperaturas más altas de lo que lo hará una persona que habite una zona fría. Es muy común que al concentrar a un grupo de personas en un mismo espacio algunas expresen que tienen frío o calor mientras que al mismo tiempo otras no experimentan esas sensaciones.

Fuentes Freixanet (2004) define al confort térmico como la percepción que tienen las personas del entorno, principalmente por medio de la piel, donde los pulmones también juegan un papel importante en el intercambio de temperatura que se da entre el cuerpo y el ambiente. La humedad es otro de los factores que afectan la percepción de las personas, siendo protagonista de la sudoración, la evaporación, y el intercambio térmico a través de la respiración.

Los factores climáticos afectan directamente en la energía, la fuerza física, actividad mental y salud del ser humano. Cuando las temperaturas son muy elevadas las personas nos podemos sentir agobiadas, cansadas, nuestro rendimiento es menor, esto se debe a que cuando las condiciones ambientales se encuentran por encima de los parámetros del confort, nuestro cuerpo utiliza energía para compensar las condiciones desfavorables y que nuestra salud no se vea afectada, permitiendo que nuestros órganos y cuerpo no sufran daños que los afecten de manera irreversible. Es por eso por lo que se han establecido índices de confort (temperatura operativa) en las que el ser humano puede desarrollarse de manera óptima.

Victor Olgyay (1998) define “zona de confort” como la condición en la que el hombre en su esfuerzo para adaptarse a su entorno le requiera solamente un mínimo de energía y la energía que se utilice sea principalmente para llevar a cabo actividades productivas.

Para obtener los rangos o límites de confort térmico se utilizan herramientas de análisis como la carta bioclimática, el diagrama bioclimático, el triángulo de confort, entre otras, en relación con los requerimientos funcionales y espaciales del proyecto arquitectónico, como el programa arquitectónico, horarios y usos del espacio; así como tablas de confort. Para fines de esta investigación se tomaron como base los parámetros proporcionados por la herramienta de análisis bioclimático BAT, la cual considera como límite de confort superior de temperatura interior 28°C y como límite inferior 23°C, además de considerar un rango de confort para la humedad relativa entre el 30% y el 70%.

### *Transferencia de calor por conducción*

La transferencia de calor se da cuando existen dos cuerpos con distintas temperaturas en contacto térmico, el cuerpo más caliente disminuye su temperatura y el más frío gana calor. Si se mantienen en este tipo de contacto el tiempo necesario alcanzarán una temperatura de equilibrio común. La conducción es una forma de transferencia de calor para la cual se necesita un medio conductor y una diferencia de temperaturas entre dos partes del medio conductor.

### **3. Diseño metodológico**

#### **3.1. Supuestos de trabajo**

La propuesta de sistema de torre de viento para el enfriamiento híbrido de la vivienda existente en climas cálidos comprobada mediante un modelado digital y simulación numérica por medio de un software especializado en CFD, puede mejorar su comportamiento térmico interior, logrando confort y disminuyendo el consumo energético doméstico y las emisiones de GEI anuales.

Al reducir el uso de equipos de enfriamiento de alto consumo energético en la vivienda se estará contribuyendo a la sustentabilidad ya que se requiere de menos generación de energía eléctrica para operarlos la cual produce contaminantes y emite gases que contribuyen al calentamiento global en su proceso de generación además de representar altos costos económicos para los usuarios.

#### **3.2. Preguntas generadoras**

##### **Pregunta de investigación principal:**

- ¿Cómo debe ser el diseño de un sistema de torre de viento para enfriamiento híbrido para que su empleo pueda generalizarse en viviendas existentes en ciudades ubicadas en climas cálidos de México, de forma que se mejore el confort térmico, se reduzcan los consumos eléctricos domésticos por sistemas de climatización artificial y se evite emitir los correspondientes gases de efecto invernadero?

##### **Preguntas de investigación secundarias:**

###### **Vivienda existente**

- ¿Cuáles son las características bioclimáticas de Los Mochis que influyen en la operación efectiva del sistema de torre de viento?
- ¿Cuál es el comportamiento higro-térmico de la vivienda de estudio en la actualidad, y cuáles son las implicaciones del usuario en materia de confort y consumo energético?
- ¿Qué aspectos constructivos y características físicas de la vivienda común existente se pueden aprovechar para el funcionamiento y adaptación del sistema?

### Fabricación del prototipo de torre de viento

- ¿Cuáles son los diferentes tipos de torre de viento existentes, y cuáles responden de manera más eficiente a las condiciones bioclimáticas de Los Mochis?
- ¿Qué materiales son factibles para la construcción del sistema de torre de viento?

### Aplicación generalizada del prototipo

- ¿Qué gasto energético representaría el uso del sistema de prototipo de torre de viento con relación a un sistema de enfriamiento activo y cuántos GEIS se dejarían de emitir?
- ¿Cuál es su factibilidad de aplicación técnica y financiera?

## 3.3. Objetivos

### **Objetivo principal:**

Por medio del diseño de un sistema de torre de viento para enfriamiento pasivo para una habitación de una vivienda común existente lograr captar el viento exterior y reducir su temperatura para alcanzar los rangos de confort de tal manera que se logre reducir el tiempo en el que se requiere el uso de aire acondicionado a lo largo del año.

Proponer y comprobar el funcionamiento de un prototipo, cuyo diseño permita la fácil instalación, poco invasiva en la vivienda ya construida; que sea de bajo mantenimiento y fácil operación, y que la fabricación de la misma represente un bajo costo, con el fin de disminuir el consumo energético y la emisión de gases de efecto invernadero, y así mejorar las condiciones de habitabilidad y elevar la calidad de vida de los habitantes acercando a las viviendas a la sustentabilidad.

### **Objetivos particulares:**

#### Vivienda existente

- Realizar un análisis bioclimático de sitio.
- Identificar características de la vivienda elegida para caso de estudio, su comportamiento térmico, y las necesidades de sus usuarios en materia de confort y consumo energético.

- Identificar las características de la vivienda común existente que pueden ser aprovechadas para el funcionamiento y adaptación del sistema de torre de viento.

#### Diseño del prototipo de torre de viento

- Identificar y analizar los diferentes tipos de Torre de viento que, de acuerdo a las características bioclimáticas y del medio físico y natural de la ciudad de Los Mochis, pueden ser efectivos para lograr el confort térmico.
- Realizar una propuesta de materiales factibles para la construcción del sistema de torre de viento.

#### Aplicación generalizada del prototipo

- Analizar el gasto energético y las emisiones de GEI que representaría con relación a un sistema de enfriamiento activo.
- Analizar su factibilidad técnica y financiera.

### 3.4. Elección metodológica

La elección metodológica para este TOG es un modelo híbrido de enfoques hipotético-deductivo de base cuantitativa con procedimientos inductivos de corte cualitativo ya que se analizará el comportamiento térmico de la vivienda de acuerdo a sus características físicas y las actividades que se realicen en ella. Para la investigación se hará uso de datos estadísticos climáticos y cifras, como las normales climatológicas proporcionadas por la Comisión Nacional del Agua, la radiación solar calculada por medio del algoritmo de Zayas (Fernández Zayas & Estrada-Cajigal, 1983), y la temperatura y humedad, los cuales serán monitoreados y analizados para poder dar solución a la problemática existente, aplicándolos a modelos a escala y modelos digitales para sus respectivas simulaciones. Se tomará como base los estudios y propuestas de diseño de torres de viento recientes, para tomarlos como punto de partida.

El planteamiento metodológico queda redactado de la siguiente manera:

#### *1.-Recopilación de datos climáticos de la ciudad de Los Mochis*

Recopilar y analizar información climatológica de la ciudad de Los Mochis, como: agrupación bioclimática y registros climáticos. Estos datos son obtenidos

mediante el Servicio Meteorológico Nacional, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y Meteonorm.

### *2.-Análisis bioclimático*

Con base en la recopilación de información climatológica de la ciudad de Los Mochis, mediante el software BAT (Bioclimatic Analysis Tool), el programa de análisis Climate Consultant, realizar un análisis bioclimático para determinar requisitos y estrategias de climatización que permitan generar bienestar en las viviendas por medio de un prototipo de torre de viento.

### *3.-Elección y análisis de habitación de vivienda existente*

Después de seleccionar la vivienda de caso de estudio para el proyecto elegir una habitación que presente condiciones favorables para su estudio. Realizar levantamiento arquitectónico y fotográfico con el fin de reconocer las características de la habitación, así como los posibles puntos de instalación del prototipo. Elaborar un modelado de esta para, por medio del software Revit, Autodesk CFD y la información climática, reconocer el comportamiento térmico que enfrenta.

### *4.-Monitoreo climático de la vivienda*

Obtener datos del comportamiento térmico de la vivienda en sus diferentes espacios, por medio de sensores de temperatura y humedad.

### *5.- Recopilación y análisis de propuestas de torres de viento recientes y sistemas de captación de viento pasivos.*

Por medio de revisión documental recopilar y analizar la información de proyectos existentes relacionados con las torres de viento para tomarlos como base, y así poder adoptar las características que pueden funcionar en la zona de estudio, así como aplicar las adaptaciones necesarias para el diseño y funcionamiento óptimo del prototipo deseado.

### *6.- Elaboración de maqueta a escala.*

Construir una maqueta a escala 1:10 para comprobar físicamente la capacidad de captación de viento de la configuración base de torre de viento a las diferentes velocidades promedio registradas en los datos climáticos.

### *7.-Modelado digital de la propuesta de sistema de torre de viento.*

Por medio del software de modelado Revit y Autocad digitalizar el diseño de las propuestas de configuraciones del sistema de enfriamiento para agregarlo al modelo digital de la habitación de estudio y su posterior análisis de comportamiento térmico y de flujos de viento por medio de Autodesk CFD.

### *8.- Simulación CFD.*

A partir de las propuestas de configuraciones de sistema de enfriamiento de torre de viento surgidas de los antecedentes empíricos, de los resultados de los datos climáticos y el análisis bioclimático, llevar a cabo las simulaciones con las distintas variables y condiciones de frontera.

### *9.- Análisis de resultados*

Analizar los resultados de las simulaciones realizadas en CFD en términos de comportamiento térmico, velocidad del viento interior, gasto energético de operación, gasto económico de implementación y operación.

Analizar los resultados de la propuesta del sistema de torre de viento en términos de factibilidad técnica y económica de construcción, factibilidad técnica y económica de instalación.

## *3.5. Selección de técnicas y diseño de instrumentos*

Para facilitar el cumplimiento de los objetivos de este trabajo y la obtención de datos necesarios, se seleccionaron algunas técnicas y diseños de instrumentos que se presentan a continuación.

### *3.5.1. Observación directa*

Se utilizó la metodología de observación directa ordinaria estructurada, la cual tiene como principal objetivo el registro de información detallada directamente en sitio, como observador externo.

Los observables de los cuales se obtuvo información mediante esta técnica son las características físicas y naturales de la zona de estudio; características de la vivienda común, el comportamiento térmico de la vivienda y el comportamiento de los habitantes.

Una vez seleccionada la vivienda, se efectuó un levantamiento arquitectónico y fotográfico para reconocer materiales, sistema constructivo y distribución, así como identificar posibles áreas y puntos de instalación del prototipo de torre de viento.

### 3.5.2. Diseño de entrevista

El método de diseño de entrevista tiene como objetivo obtener información previa al proyecto para enriquecer los antecedentes empíricos del trabajo, así como expandir el conocimiento para su posible aplicación en el proyecto.

El diseño de entrevista se enfocó en expertos acerca del tema: la primera entrevista se realizó al Mtro. Arq. Hugo Testolini Deza el día 10 de abril de 2017 experto en el tema de sistemas de enfriamiento pasivo y con amplios conocimientos acerca de la ciudad de Los Mochis, su climatología y cultura; la segunda entrevista se realizó vía Skype a la Dra. Sarah Lilia Moya Acosta y el Dr. Vladimir Arturo Reyes Herrera, el día 31 de mayo de 2017, expertos en termodinámica y en diseño y simulación de torres de viento para enfriamiento en México.

### 3.5.3. Diseño de experimento

El diseño de experimento tiene como objetivo lograr un acercamiento al funcionamiento real del sistema de torre de viento propuesto mediante la utilización de una maqueta a escala y un software de CFD para utilizar distintas variables tanto para el sistema como para las condiciones climáticas presentadas y comparar los resultados para poder tomar las consideraciones necesarias y realizar las modificaciones que se requieran antes de realizar el proyecto en una escala mayor en futuras etapas.

## 4. Análisis, desarrollo de la propuesta y resultados.

### 4.1. Datos climatológicos de Los Mochis, Sinaloa

A continuación, se presentan los datos de los elementos meteorológicos de la ciudad de Los Mochis, Sinaloa, que permiten el posterior análisis para la toma de decisiones y consideraciones para el diseño del proyecto propuesto.

#### 4.1.1. Normales climatológicas

COORDENADAS		LATITUD: 25° 48' 38" N	25.81	CIUDAD													
		LONGIT: 109° 1' 6" W	-109.02	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <b>LOS MOCHIS, SIN</b> </div>													
		ALTITUD: 11 msnm	11														
PERIODO	1981-2010			CLIMA:	BS0(h)w(x)( e) (Seco, extremoso, no es tipo ganges, no hay canicula)												
				BIOCLIMA:	Cálido Seco												
FUENTE	VARIABLES CLIMATOLÓGICAS	UNIDAD	AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	
a	TEMPERATURA	MAXIMA EXTREMA	°C	30	36.0	38.5	40.0	40.0	41.5	44.0	45.0	47.5	48.0	43.0	40.0	36.0	48.0
a		FECHA	dd/aaaa	n/d	24/2008	09/1999	21/2004	29/1992	30/2008	21/2002	23/2008	30/1988	16/2005	12/1995	01/11/2001	09/2008	16-sep-2005
a		PROMEDIO MÁXIMA	°C	30	26.5	28.1	30.3	33.0	35.7	37.7	38.2	38.1	37.1	35.8	31.0	26.6	33.2
a		MEDIA	°C	30	19.3	20.3	22.0	24.5	27.4	30.6	31.9	31.7	31.1	28.9	23.7	19.7	25.9
a		PROMEDIO MÍNIMA	°C	30	12.1	12.5	13.7	16.1	19.0	23.5	25.5	25.4	25.0	22.1	16.5	12.8	18.7
a		MÍNIMA EXTREMA	°C	30	4.5	6.5	8.0	9.0	12.5	16.0	20.0	21.0	20.0	14.0	7.5	4.0	4.0
a		FECHA	dd/aaaa	n/d	14/1989	02/1985	04/2004	02/1999	07/2008	01/2003	12/1986	17/1984	30/1989	24/2009	29/2001	27/2007	27-dic-2007
e	OSCILACIÓN	°C	30	14.4	15.6	16.6	16.9	16.7	14.2	12.7	12.7	12.1	13.7	14.5	13.8	14.5	
b	RADIACIÓN SOLAR	INSOLACIÓN TOTAL	h														
b		TOTAL (Global)	W/m <sup>2</sup>		575.0	650.0	750.0	850.0	800.0	775.0	700.0	700.0	775.0	725.0	725.0	600.0	718.8
b		DIFUSA	W/m <sup>2</sup>		450.0	500.0	550.0	600.0	600.0	600.0	500.0	500.0	600.0	600.0	550.0	475.0	543.8
c	HUMEDAD	TENSION MEDIA DE VAPOR	mb	n/d													
c		RELATIVA MÁXIMA	%	26	83.1	80.7	74.7	71.1	63.3	63.9	69.5	75.9	84.3	83.1	82.5	85.0	76.4
c		RELATIVA MEDIA	%	26	64.7	60.9	54.8	50.2	44.7	48.4	54.3	57.4	64.6	62.9	63.0	66.0	57.7
c		RELATIVA MÍNIMA	%	26	45.7	41.5	35.9	32.5	29.6	35.6	41.5	41.0	46.3	43.9	42.6	45.6	40.1
c		EVAPORACIÓN TOTAL	mm	26	92.8	117.1	176.4	209.3	255.6	261.9	241.3	210.5	183.3	170.0	116.0	89.1	2,123.3
c	TEMP. DE BULBO HÚMEDO	°C															
a	PRECIPITACIÓN	TOTAL	mm	25	30.1	10.2	3.9	3.8	0.6	7.8	63.3	106.2	107.7	25.0	30.2	40.5	429.3
a		MAXIMA	mm	25	174.0	110.0	45.5	80.0	12.0	120.0	300.0	420.0	410.0	79.6	258.0	242.0	420.0
a		FECHA	aaaa	n/d	1997	1998	1983	1997	1997	1999	1998	1999	1994	2004	1997	1997	AGO-1999
a		MAXIMA EN 24 h	mm	25	114.0	65.0	36.0	80.0	12.0	90.0	175.0	160.0	161.0	60.0	148.0	130.0	175.0
a		FECHA	dd/aaaa	n/d	14/2004	17/1998	01/1983	25/1997	20/1997	26/1999	15/1998	25/1999	01/1998	21/2002	01/1997	22/1997	15/1998
a		MAXIMA EN 1 h	mm														
a		FECHA	dd/aaaa	n/d	00/1900	00/1900	00/1900	00/1900	00/1900	00/1900	00/1900	00/1900	00/1900	00/1900	00/1900	00/1900	
a	FRECUENCIA DE FENÓMENOS ESPECIALES	LLUVIA APRECIABLE	Días	30	2.2	1.4	0.6	0.4	0.1	0.8	5.9	8.5	5.8	2.1	1.6	1.9	31.3
a		LLUVIA INAPRECIABLE	Días														
a		DÍAS DESPEJADOS	Días														
a		DÍAS MEDIO NUBLADOS	Días														
a		DÍAS NUBLADO / CERRADO	Días														
a		DÍAS CON ROCÍO	Días														
a		GRANIZO	Días	30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
a		HELADAS	Días														
a		TORMENTA ELÉCTRICA	Días	30	0.0	0.0	0.1	0.4	0.0	0.2	1.2	1.7	1.3	0.2	0.1	0.0	5.2
a		NIEBLA	Días	30	5.8	5.2	4.1	3.4	3.5	1.3	0.1	0.2	0.4	2.6	4.4	4.7	35.7
a	NEVADA	Días	30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
a	VISIBILIDAD DOMINANTE	km															

Tabla 2. Datos climatológicos. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

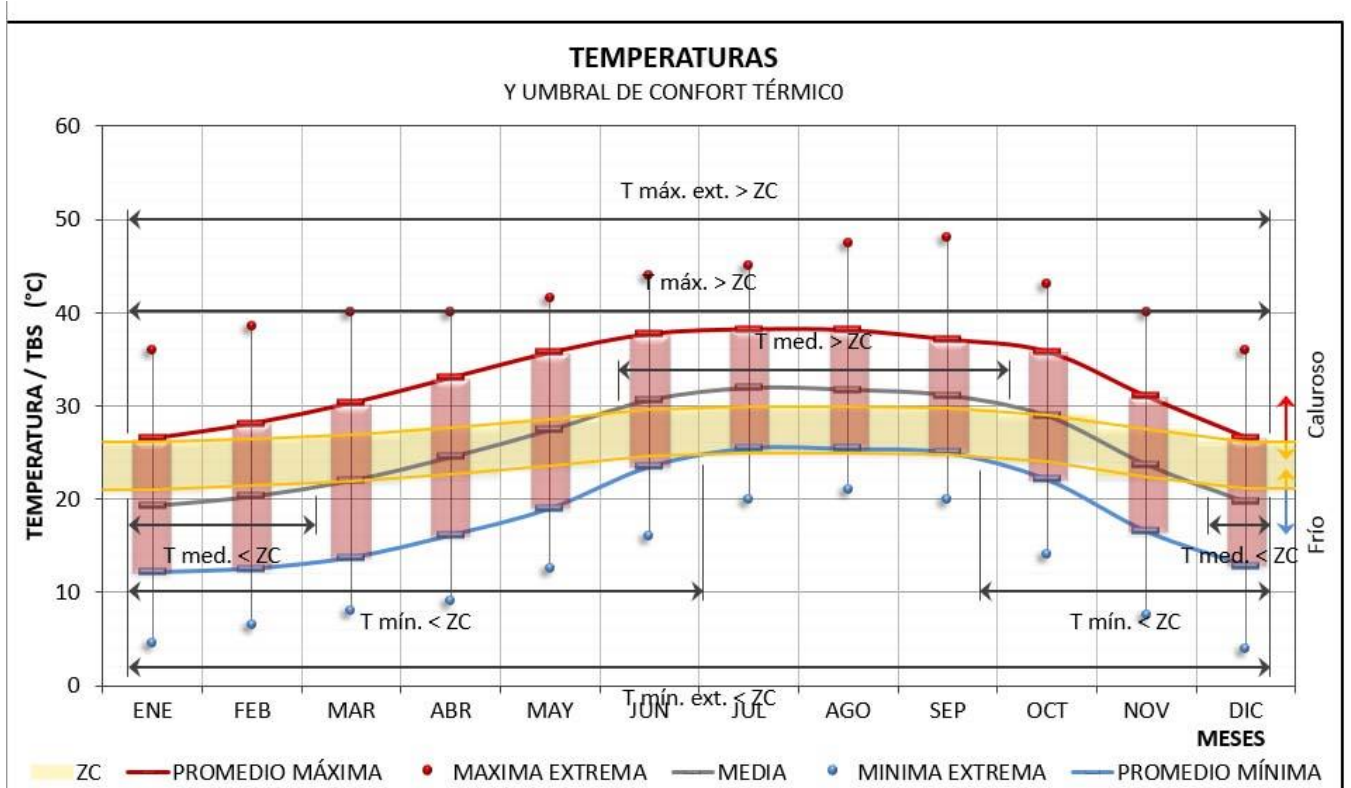
- a. Datos obtenidos de las normales climatológicas de la Estación Meteorológica no. 25116 (período 1981-2010) ubicada en la ciudad de Los Mochis, Ahome, Sinaloa (latitud N 25°48'04", longitud W 109°02'06" y altitud 11.0 msnm) dependiente del Servicio Meteorológico Nacional (SMN-CONAGUA).
- b. Datos calculados a partir de los datos presentados en el libro "CALCULO DE LA RADIACION SOLAR INSTANTANEA EN LA REPUBLICA MEXICANA" (Fernández Zayas & Estrada-Cajigal, 1983).
- c. Datos obtenidos mediante el software Meteonorm de las Estaciones Meteorológicas Los Mochis (ciudad) y Los Mochis (aeropuerto), documentos proporcionados por el Dr. Víctor Armando Fuentes Freixanet.
- d. Datos obtenidos de WindFinder, Estadísticas del viento y del tiempo, Topolobampo/Los Mochis, recuperado de: [https://www.windfinder.com/windstatistics/topolobampo\\_los\\_mochis](https://www.windfinder.com/windstatistics/topolobampo_los_mochis).
- e. "Datos calculados" por el software Bioclimatic Analysis Tool (BAT) en virtud de no contar con información de esta variable climática en alguna de las normales climatológicas de las estaciones analizadas.

**Nota:** Los datos con los que no se cuenta aparecen con las filas vacías.

## 4.2. Análisis climático

### 4.2.1. Temperaturas

En la siguiente gráfica se puede identificar la forma en que la temperatura oscila desde los 4°C hasta los 48°C durante el año. Se observa que el promedio máximo se encuentra fuera de la zona de confort durante todo el año. La media de temperatura se posiciona fuera de la zona de confort de mediados de noviembre a marzo por debajo y de mediados de mayo a octubre por arriba, lo que en total da poco más de la mitad del año. Cuando el tiempo es frío se puede estar en confort por medio del uso de vestimenta adecuada, pero el mayor problema se presenta cuando las temperaturas son muy altas ya que el tipo de vestimenta no es suficiente y se vuelve más complejo estar en confort sin la utilización de equipos de aire acondicionado.



**Gráfica 3.** Temperaturas y umbral de confort térmico. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

En la gráfica de temperaturas horarias se pueden identificar la temperatura representativa por hora a lo largo del año. En el caso de Los Mochis, entre más cálido es el tono con el que está graficada cada hora es mayor el sobrecalentamiento, y entre más oscuro es el tono de azul es mayor el bajocalentamiento. Según estos datos cerca del 38% del tiempo durante el año la ciudad presentaría condiciones de sobrecalentamiento, sólo poco menos del 30% del tiempo se presentan temperaturas de confort representadas de color blanco en la gráfica.

Sobrecalentamiento (SC)	32.1	<
	30.1	32.1
Confort (CF)	28.1	30.1
	23.1	28.1
Bajocalentamiento (BC)	21.1	23.1
	19.1	21.1
	<	19.1

Mes al que corresponden los rangos de temperatura en la escala cromática

Anual

Valor equidistante del cual se conforman los rangos térmicos en la escala cromática

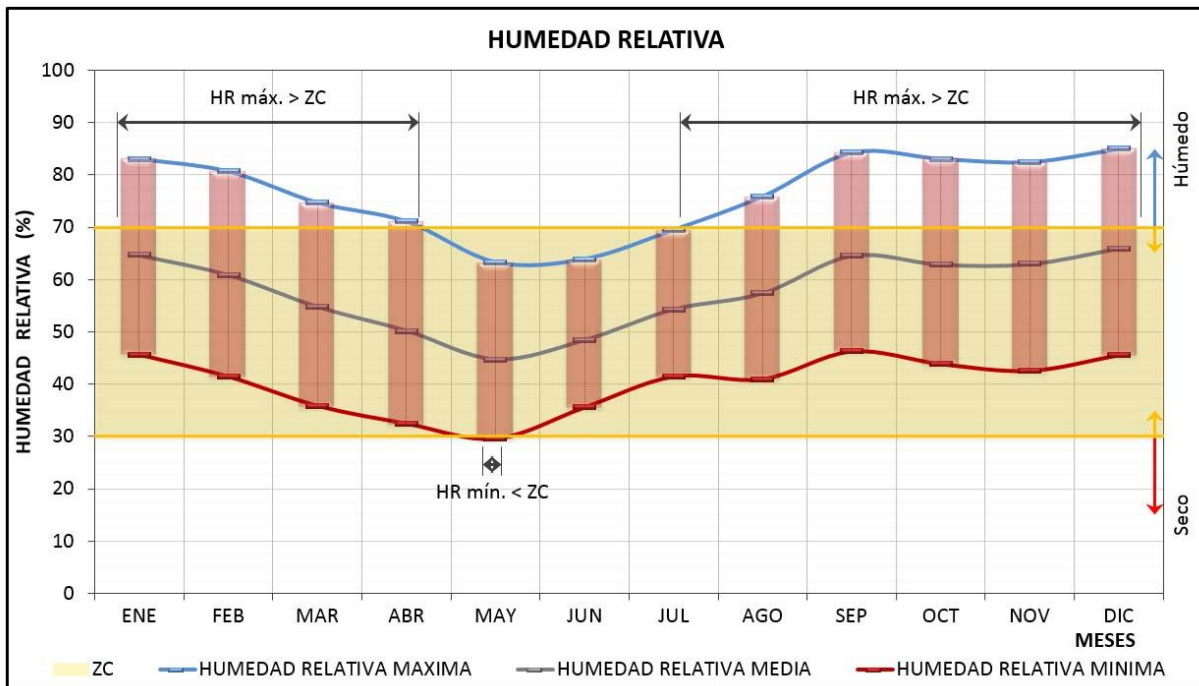
2.0 K

PROM. TEMP.		HORA																								BC	CF	SC	
Min.	Max.	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	%	%	%	
12.1	26.5	ENE	12.3	12.1	12.5	13.8	15.7	18.0	20.6	22.9	24.8	26.1	26.5	26.3	25.9	25.1	24.1	22.9	21.5	20.1	18.5	17.1	15.7	14.5	13.5	12.7	58.3	33.3	8.3
12.5	28.1	FEB	12.7	12.5	13.0	14.3	16.4	18.9	21.7	24.2	26.3	27.6	28.1	27.9	27.4	26.6	25.5	24.2	22.7	21.1	19.5	17.9	16.4	15.1	14.0	13.2	54.2	25.0	20.8
13.7	30.3	MAR	13.9	13.7	14.2	15.6	17.9	20.6	23.4	26.2	28.4	29.8	30.3	30.1	29.6	28.3	27.6	26.2	24.6	22.9	21.1	19.4	17.9	16.4	15.3	14.4	50.0	20.8	29.2
16.1	33.0	ABR	16.3	16.1	16.6	18.1	20.3	23.1	26.0	28.8	31.0	32.5	33.0	32.8	32.3	31.4	30.2	28.8	27.2	25.4	23.7	21.9	20.3	18.9	17.7	16.8	41.7	20.8	37.5
19.0	35.7	MAY	19.2	19.0	19.5	21.0	23.2	25.9	28.8	31.5	33.7	35.2	35.7	35.5	35.0	34.1	32.9	31.5	29.9	28.2	26.5	24.8	23.2	21.8	20.6	19.7	37.5	16.7	45.8
23.5	37.7	JUN	23.7	23.5	23.9	25.2	27.1	29.4	31.8	34.2	36.0	37.3	37.7	37.5	37.1	36.3	35.4	34.2	32.8	31.3	29.9	28.4	27.1	25.8	24.9	24.1	16.7	29.2	54.2
25.5	38.2	JUL	25.6	25.5	25.9	27.0	28.7	30.7	33.0	35.0	36.7	37.8	38.2	38.1	37.7	37.0	36.1	35.0	33.8	32.5	31.2	29.9	28.7	27.6	26.7	26.0	0.0	41.7	58.3
25.4	38.1	AGO	25.5	25.4	25.8	26.9	28.6	30.6	32.9	34.9	36.6	37.7	38.1	38.0	37.6	36.9	36.0	34.9	33.7	32.4	31.1	29.8	28.6	27.5	26.6	25.9	0.0	41.7	58.3
25.0	37.1	SEP	25.1	25.0	25.4	26.4	28.0	30.0	32.1	34.1	35.7	36.7	37.1	37.0	36.6	35.9	35.1	34.1	32.9	31.7	30.4	29.2	28.0	27.0	26.2	25.5	0.0	41.7	58.3
22.1	35.8	OCT	22.2	22.1	22.5	23.7	25.5	27.8	30.1	32.4	34.2	35.4	35.8	35.7	35.2	34.5	33.5	32.4	31.1	29.7	28.2	26.8	25.5	24.4	23.4	22.7	25.0	25.0	50.0
16.5	31.0	NOV	16.7	16.5	16.9	18.2	20.1	22.5	25.0	27.4	29.3	30.6	31.0	30.8	30.4	29.6	28.6	27.4	26.0	24.5	23.0	21.5	20.1	18.9	17.9	17.1	41.7	29.2	29.2
12.8	26.6	DIC	13.0	12.8	13.2	14.4	16.3	18.5	20.9	23.2	25.0	26.2	26.6	26.4	26.0	25.3	24.3	23.2	21.8	20.4	19.0	17.6	16.3	15.1	14.1	13.4	58.3	33.3	8.3
18.7	33.2	ANUAL	18.8	18.7	19.1	20.4	22.3	24.7	27.2	29.6	31.5	32.7	33.2	33.0	32.5	31.8	30.8	29.6	28.2	26.7	25.2	23.7	22.3	21.1	20.1	19.3	31.9	29.9	38.2

Gráfica 4. Temperaturas horarias. Elaboración propia, con datos de las normales climatológicas para la ciudad de Los Mochis y con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

#### 4.2.2. Humedad relativa

La humedad relativa presenta una media que oscila entre el 45% y el 65% encontrándose dentro de la zona de confort todo el año, pero muy cerca del límite superior durante algunos meses. La humedad relativa máxima que sobrepasa la zona de confort se presenta desde julio hasta abril, llegando a sobrepasar el 85% y la mínima sólo se alcanza a salir por debajo de esta zona durante un corto periodo alrededor de mayo.



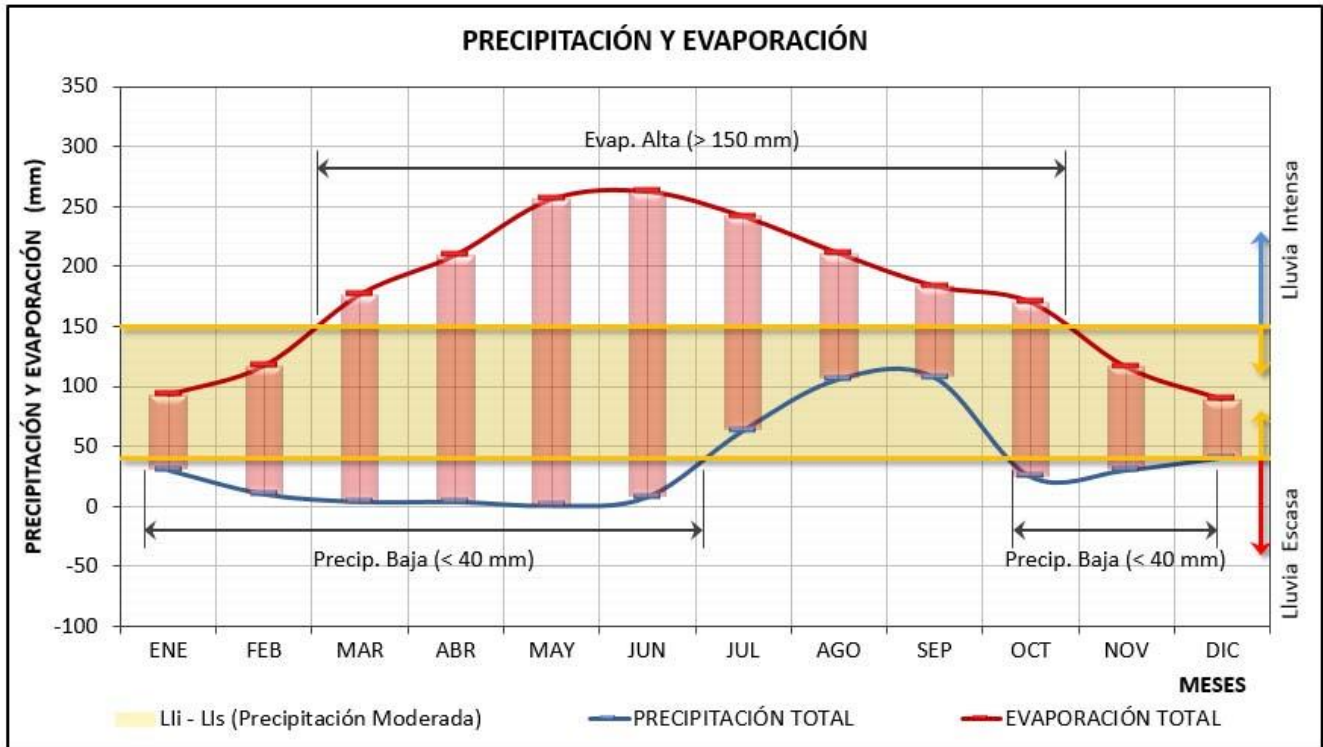
Gráfica 5. Humedad Relativa. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

Si se compara el comportamiento de la temperatura a lo largo del año en la *Gráfica 3* con la *Gráfica 5* de Humedad relativa se puede notar que se comportan de forma contraria, a mayor humedad se presentan temperaturas menores y viceversa, ya que el porcentaje de humedad relativa afecta directamente el comportamiento de la temperatura y su oscilación térmica.

A pesar de que la ciudad de Los Mochis se encuentra clasificada como un clima muy seco o muy árido, mediante la gráfica anterior se puede observar que la humedad relativa tiende a ser más alta que baja, y gran parte del año se registran humedades relativas máximas fuera de la zona de confort (entre el 30 y 70%) y algunas humedades relativas medias muy cerca del límite superior. Estos registros sirven para determinar la estrategia de enfriamiento que utilizará el sistema de torre de viento, donde en este caso agregar más humedad al ambiente puede no ser la mejor opción.

#### 4.2.3. Precipitación y evaporación

De acuerdo a la *Gráfica 6* la ciudad de Los Mochis presenta una precipitación baja la mayor parte del año, presentando lluvias moderadas solamente en un periodo comprendido entre julio y octubre aproximadamente, coincidiendo con algunos meses de calor. A pesar de la baja precipitación, se puede observar que hay una evaporación alta en un periodo largo comprendido de mediados de febrero hasta octubre, pudiendo suponer que el comportamiento de la evaporación tiene mayor relación con las temperaturas elevadas y con la cercanía al mar que con la precipitación. Mediante la siguiente gráfica podemos entender con mayor claridad la clasificación climática que ubica a la ciudad con un clima seco. Es importante considerar las temporadas de lluvias para el diseño del sistema de torre de viento y poder prevenir problemas de filtración o ingreso de agua al interior.



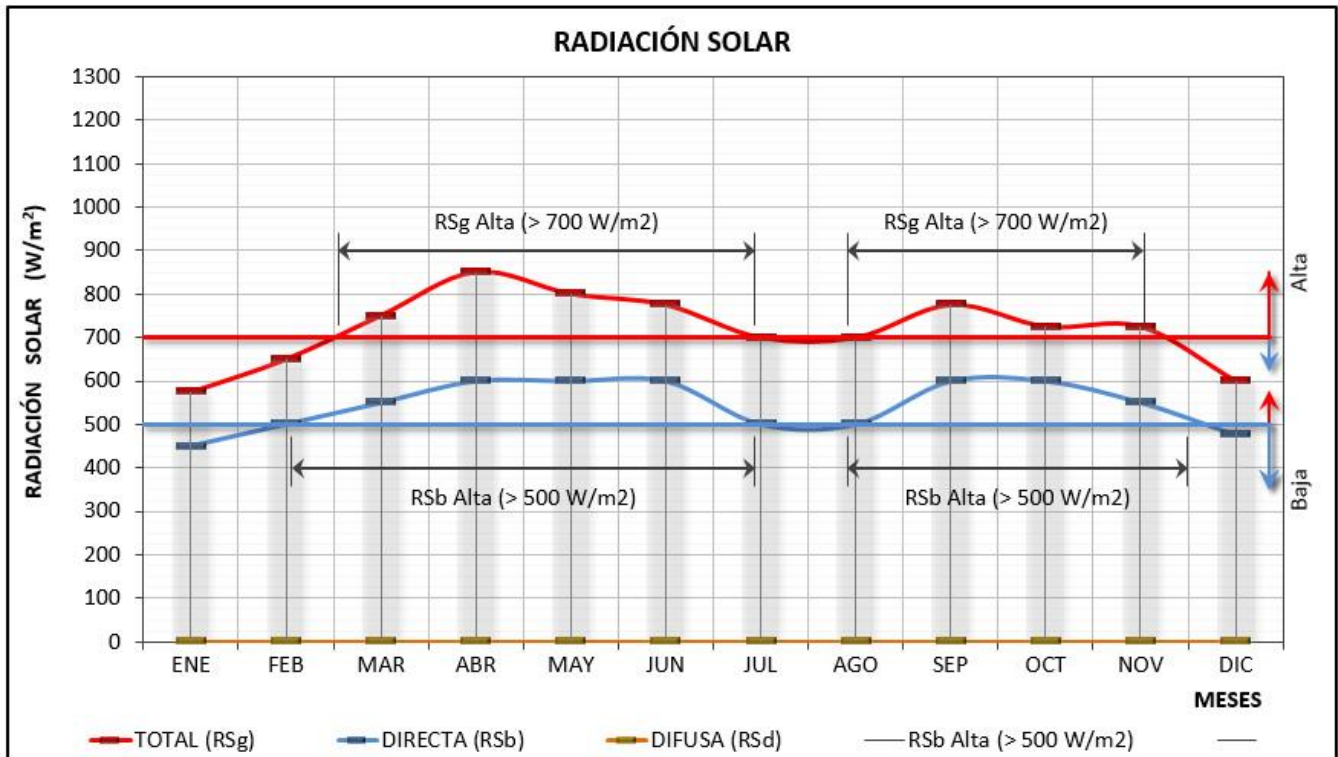
Gráfica 6. Precipitación y evaporación. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

#### 4.2.4. Radiación solar

En la siguiente gráfica podemos observar el comportamiento de la radiación solar en La ciudad de Los Mochis a lo largo del año. Se debe considerar que los datos de radiación difusa no están representados en esta gráfica por lo cual se grafican con el valor 0.

De acuerdo a la Gráfica 7 se considera como Radiación Total alta aquella que se presenta por encima de los 700 W/m<sup>2</sup>, por lo cual los meses en los que la radiación es alta serían en los periodos de mediados de febrero a julio y de agosto a noviembre, abarcando más de la mitad del año con esta condición.

Se puede notar que los periodos donde la radiación baja coinciden con los periodos que presentan mayor precipitación, lo que explica que en los días nublados y lluviosos la radiación solar sea menor.



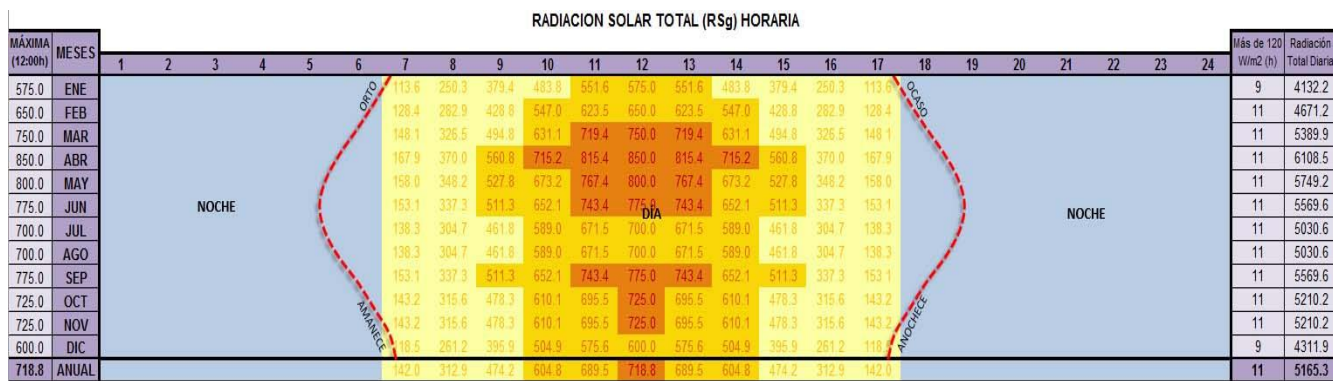
**Gráfica 7.** Radiación solar. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

La radiación solar es un factor muy importante para cualquier sistema de enfriamiento que se utilice, ya que dependiendo de los materiales con los que esté construida la edificación, será mayor o menor el calor transferido al interior y podría afectar directamente a la eficiencia del sistema.

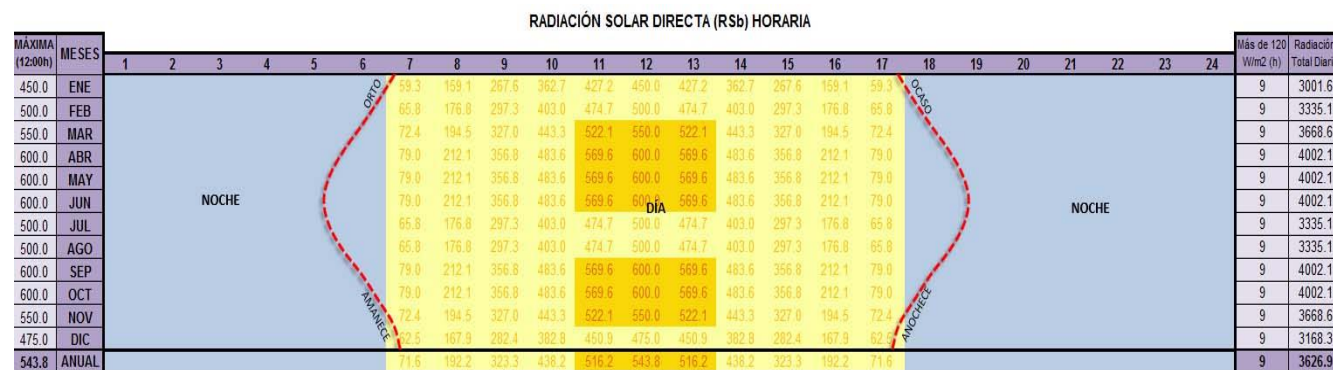
A continuación, se muestran las gráficas del comportamiento de la radiación solar horaria total y directa a lo largo del año. Se puede observar que el horario más crítico de radiación solar es prácticamente alrededor del mediodía, sobre todo, en los meses de marzo, abril, mayo, junio y septiembre, los cuales presentan los índices más altos de radiación solar en ese horario y de todo el año.

### Escala Cromática

> 700	Radiación Alta	
500 700	Radiación Media	
0 500	Radiación Baja	
= 0	Radiación Nula	



Gráfica 8. Radiación solar total (RSg) horaria. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

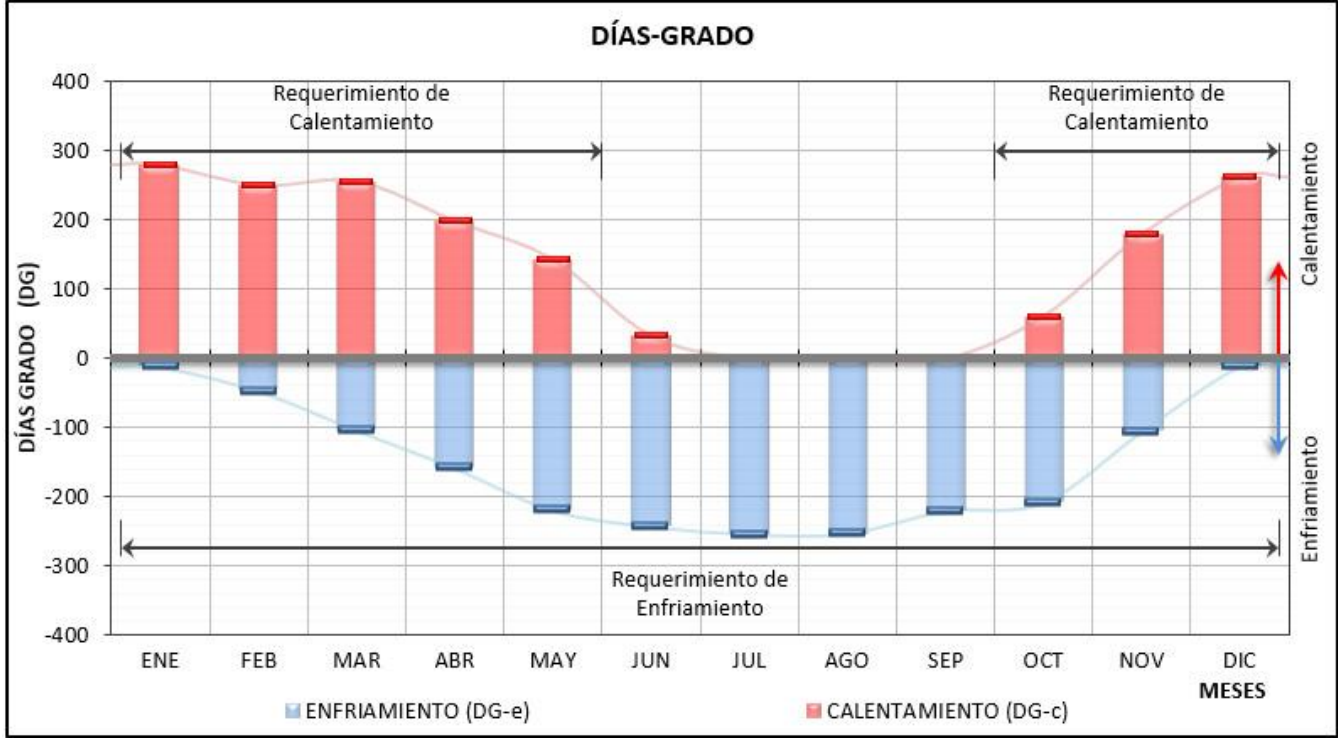


Gráfica 9. Radiación solar directa (RSb) horaria. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

#### 4.2.5. Días-Grado

Los Días-Grado son un parámetro que nos permite identificar en qué momentos hay un requerimiento de calentamiento y cuándo se requiere de enfriamiento en una edificación, y a partir de ahí se pueden planear las estrategias a utilizar para mejorar el confort térmico.

En el caso de Los Mochis se puede identificar lo extremo que puede ser el clima presentando en un mismo mes requerimientos tanto de enfriamiento como de calentamiento; también es importante prestarle atención en el periodo que comprende julio, agosto y septiembre, siendo el tiempo cuando hay mayor requerimiento de enfriamiento. Y considerar los meses cuando menos se necesita de enfriamiento que son diciembre, enero, febrero y marzo principalmente. Lo más conveniente para este caso sería un sistema que pueda ser versátil y adaptarse a las condiciones climáticas cambiantes que se presentan.

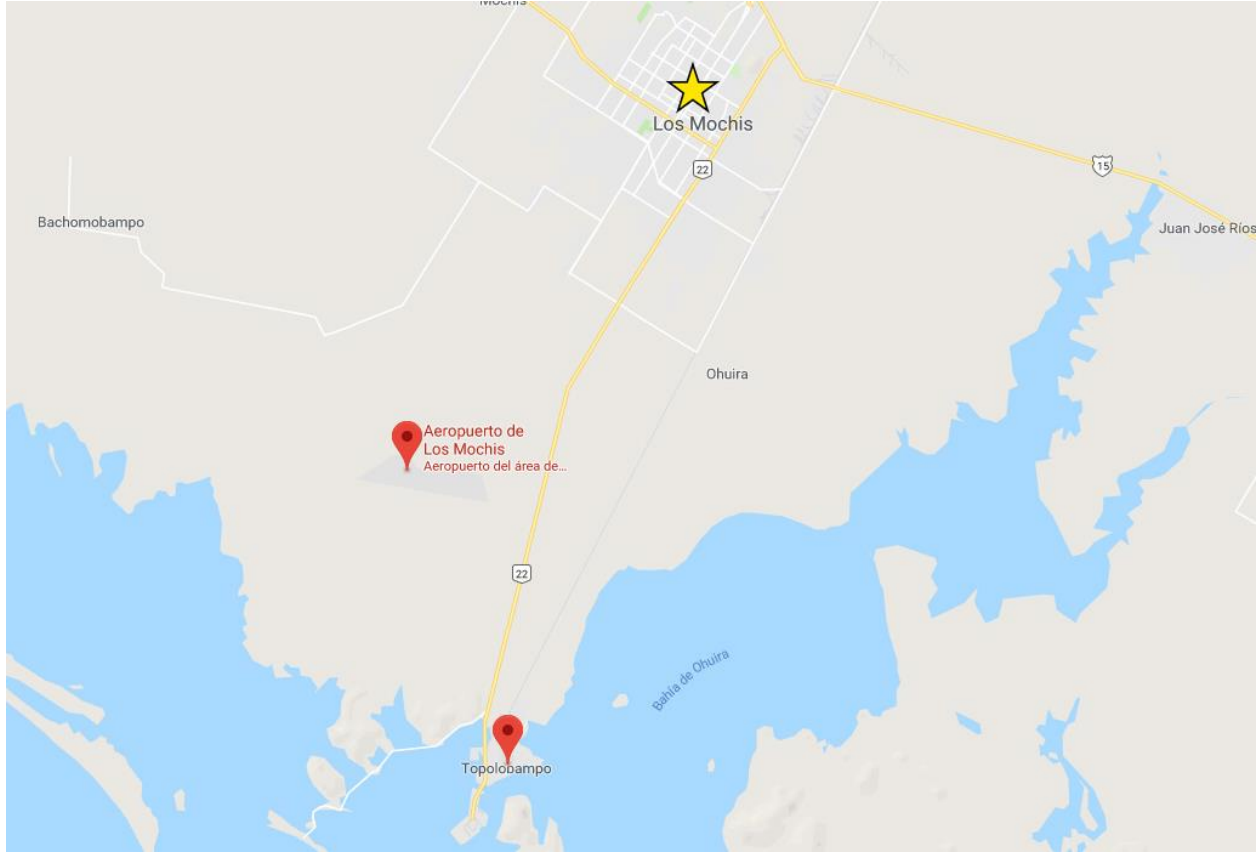


Gráfica 10. Días – Grado. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

4.2.6. Viento

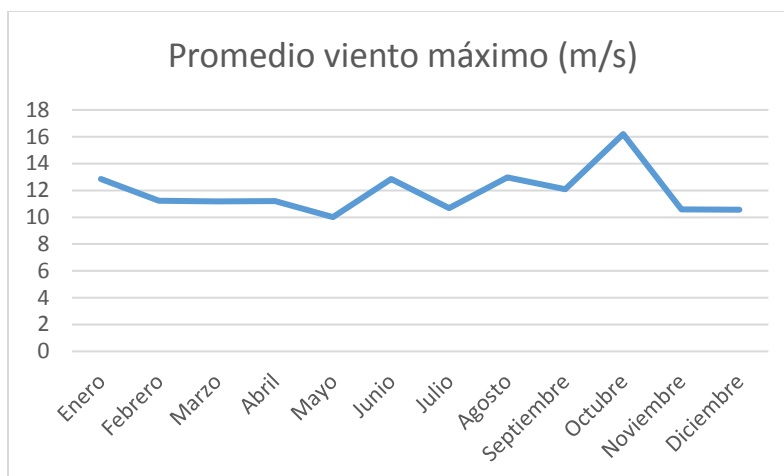
De acuerdo de la investigación realizada, la ciudad de Los Mochis no cuenta con una estación meteorológica dentro de sus límites urbanos que proporcionen registros sobre la actividad del viento. Las estaciones meteorológicas más cercanas son la estación Los Mochis/Aeropuerto (Aeropuerto Internacional del Valle del Fuerte) que se ubica a 19 km aproximadamente del centro de la ciudad y la estación de Topolobampo/Los Mochis a 24 km de distancia del centro. De la primera estación mencionada

se cuenta con registros proporcionados por Meteored (2017) del periodo 2012-2016. Los registros de la segunda es información proporcionada por WindFinder.



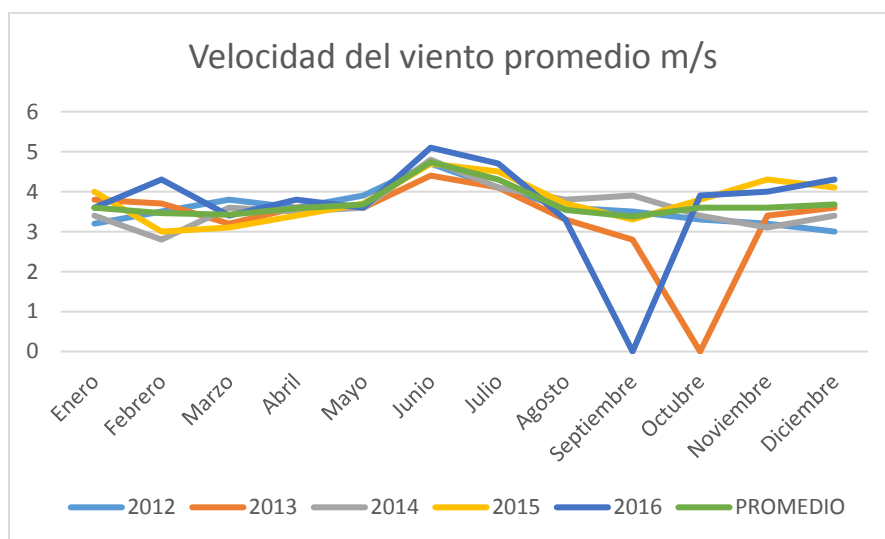
**Imagen 26.** Ubicación de estaciones meteorológicas más cercanas. Fuente: Elaboración propia con mapa base de Google (2017) [Mapa de la ciudad de Los Mochis].

De acuerdo con la estación Los Mochis /Aeropuerto, para los meses más calurosos del año, que abarcan de junio a septiembre principalmente, los vientos máximos promedio del periodo 2012-2016 se registraron alrededor de los 12 m/s a 10 m de altura en la estación meteorológica más cercana que es la del Aeropuerto Internacional del Valle del Fuerte.



**Gráfica 11.** Promedio de velocidad de viento máximo mensual en el periodo de 2012-2016. Fuente: Elaboración propia con datos de Meteored (2017).

La velocidad del viento promedio registrada durante ese periodo oscila entre los 3 y los 5 m/s, para el caso de los meses de septiembre del 2016 y octubre del 2013 no se contó con información disponible y es por eso se representan como 0 en la *Gráfica 12*.



**Gráfica 12.** Promedio de vientos máximos mensual en el periodo de 2012-2016. Fuente: Elaboración propia con datos de Meteored (2017).

Para la estación meteorológica Los Mochis/Topolobampo los vientos promedios se registran de 5 m/s practicamente todo el año con excepción de octubre el cual presenta vientos promedios de 4 m/s.

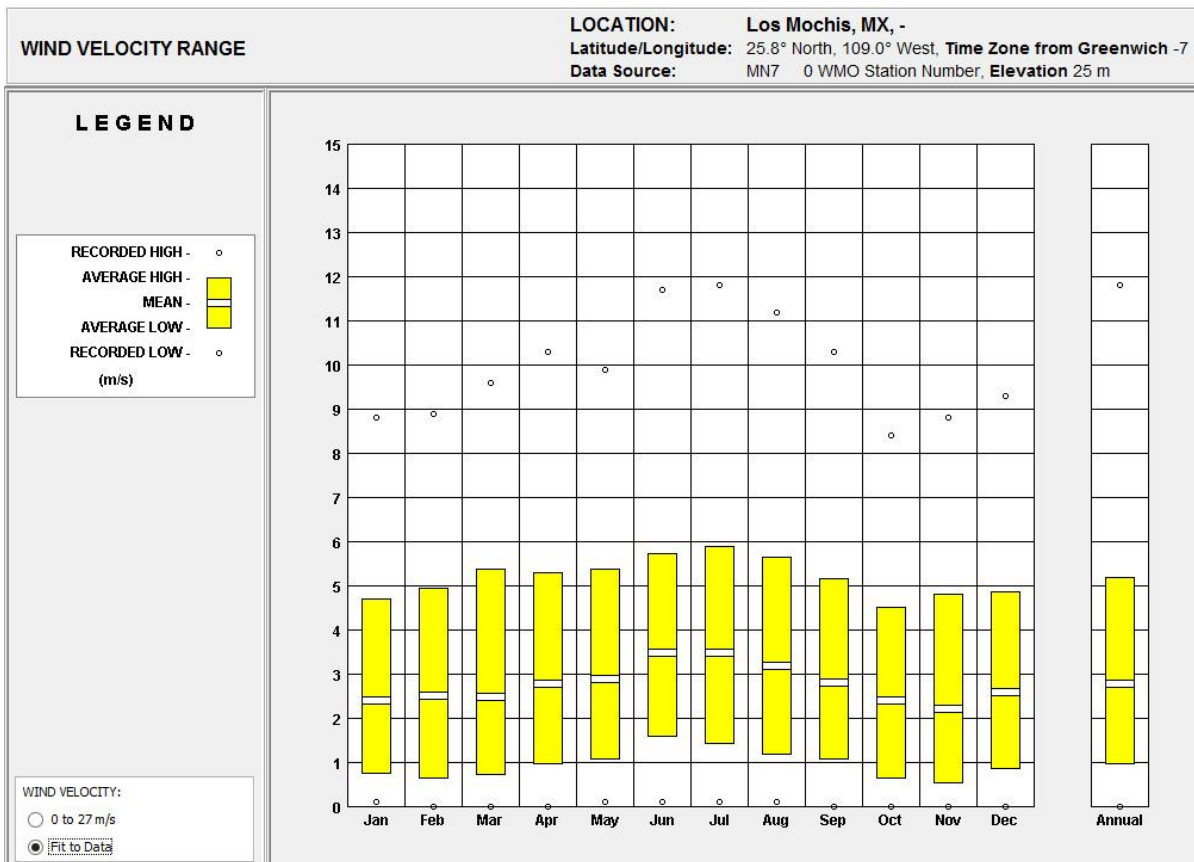
VIENTO MENSUAL (Frecuencia / Velocidad)													
MESES	PARÁMETRO	UNIDAD	DIRECCIONES								CALMAS (%)	PROMED.	MÁXIMA
			N	NE	E	SE	S	SW	W	NW			
ENERO	Frecuencia	%	4.5	1.8	3.4	1.6	1.1	2.6	5.3	31.1	48.6	6.4	31.1
	Velocidad	m/s	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0			
FEBRERO	Frecuencia	%	3.8	1.6	4.9	3.2	1.6	4.6	5.9	25.1	49.3	6.3	25.1
	Velocidad	m/s	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0			
MARZO	Frecuencia	%	1.9	0.6	7.7	4.0	3.7	6.2	6.8	19.8	49.3	6.3	19.8
	Velocidad	m/s	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0			
ABRIL	Frecuencia	%	2.5	1.2	6.8	2.5	3.7	10.6	8.7	14.9	49.1	6.4	14.9
	Velocidad	m/s	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0			
MAYO	Frecuencia	%	1.2	0.9	5.8	3.4	4.6	15.4	9.2	8.6	50.9	6.1	15.4
	Velocidad	m/s	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0			
JUNIO	Frecuencia	%	0.3	0.6	5.0	10.6	12.4	15.5	2.8	0.9	51.9	6.0	15.5
	Velocidad	m/s	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0			
JULIO	Frecuencia	%	0.6	1.3	10.7	9.4	9.1	14.2	2.5	1.6	50.6	6.2	14.2
	Velocidad	m/s	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0			
AGOSTO	Frecuencia	%	0.9	2.2	10.6	9.3	8.1	13.4	4.0	1.6	49.9	6.3	13.4
	Velocidad	m/s	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0			
SEPTIEMBRE	Frecuencia	%	1.3	1.9	11.7	6.5	5.8	10.7	6.8	4.9	50.4	6.2	11.7
	Velocidad	m/s	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0			
OCTUBRE	Frecuencia	%	3.5	2.9	9.6	2.9	2.2	6.4	7.1	16.3	49.1	6.4	16.3
	Velocidad	m/s	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0			
NOVIEMBRE	Frecuencia	%	6.5	2.2	5.7	1.6	1.6	4.0	6.2	19.7	52.5	5.9	19.7
	Velocidad	m/s	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0			
DICIEMBRE	Frecuencia	%	6.4	2.2	5.7	1.6	1.6	4.0	6.2	19.7	52.6	5.9	19.7
	Velocidad	m/s	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0			
ANUAL	Frecuencia	%	2.8	1.6	7.3	4.7	4.6	9.0	6.0	13.7	50.4	6.2	13.7
	Velocidad	m/s	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9			

VIENTO	UNIDAD	MESES												ANUAL
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
DOMINANTE		NW	NW	NW	NW	SW	SW	SW	SW	E	NW	NW	NW	NW
REINANTE		N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
MÁXIMA	m/s	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	4.0	5.0	5.0	4.9
PROMED.	m/s	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	4.0	5.0	5.0	4.9
CALMAS	(%)	48.6	49.3	49.3	49.1	50.9	51.9	50.6	49.9	50.4	49.1	52.5	52.6	50.4

**Tabla 3.** Vientos. Elaboración propia con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT). Fuente: d. WindFinder, Estadísticas del viento y del tiempo, Topolobampo/Los Mochis

La desventaja de la información de estas dos estaciones meteorológicas es que se encuentran más cerca del mar que de la propia ciudad, donde es más probable que los vientos se registren con velocidades más altas. En la *Gráfica 13* se presenta información de los rangos de la velocidad del viento “Los Mochis (ciudad)” con datos interpolados de estaciones meteorológicas cercanas y estimaciones generadas por medio de Meteonorm y graficados a través de Climate Consultant. De acuerdo a esta información los vientos promedios anuales rondarían los 2.8 m/s y las velocidades más altas serían en los meses de junio a agosto cuando es época de calor coincidiendo en este último aspecto con las información de las otras dos estaciones meteorológicas presentadas anteriormente, por lo que hay que contemplar que, si se planea introducir el viento dentro de las edificaciones por medio de un captador de viento como estrategia de enfriamiento pasivo, sería necesario enfriarlo antes de que llegue al interior para que no resulte contraproducente la acción.

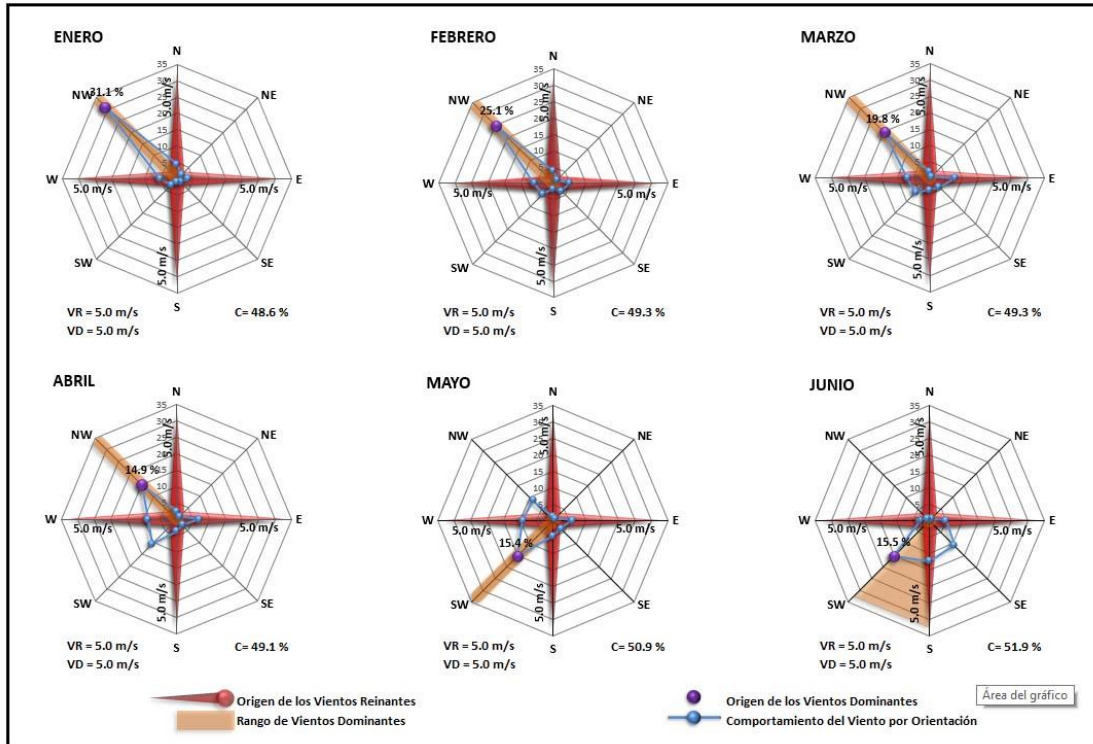


*Gráfica 13.* Rangos de velocidad del viento. Elaboración. Fuente: Climate Consultant 6.0

Para fines de esta investigación se toman en cuenta las distintas fuentes ya que unas complementan la información faltante de las otras, dándole prioridad a los datos de velocidad del viento generados a través de Meteororm y Climate Consultant, ya que estos datos toman en cuenta factores que se presentan al estar dentro de una zona urbana o suburbana y al ser velocidades más bajas se consideran como condiciones más críticas.

*Dirección y frecuencia del viento*

A continuación, se presentan una serie de gráficas que muestran el comportamiento del viento de acuerdo a cada mes del año y el comportamiento anual según la estación meteorológica Los Mochis/Topolobampo. Para el análisis de estas gráficas se tomó la velocidad del viento con la velocidad media del viento mensual, ya que no se cuenta con los datos específicos de la velocidad de los vientos reinantes y los vientos dominantes.



Gráfica 14. Vientos (primera parte). Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

**Enero:** el rango y origen de los vientos dominantes proviene de la dirección noroeste (NW) con una velocidad media de 5 m/s y una frecuencia del 31.1%; el promedio de calmas es del 48.6%.

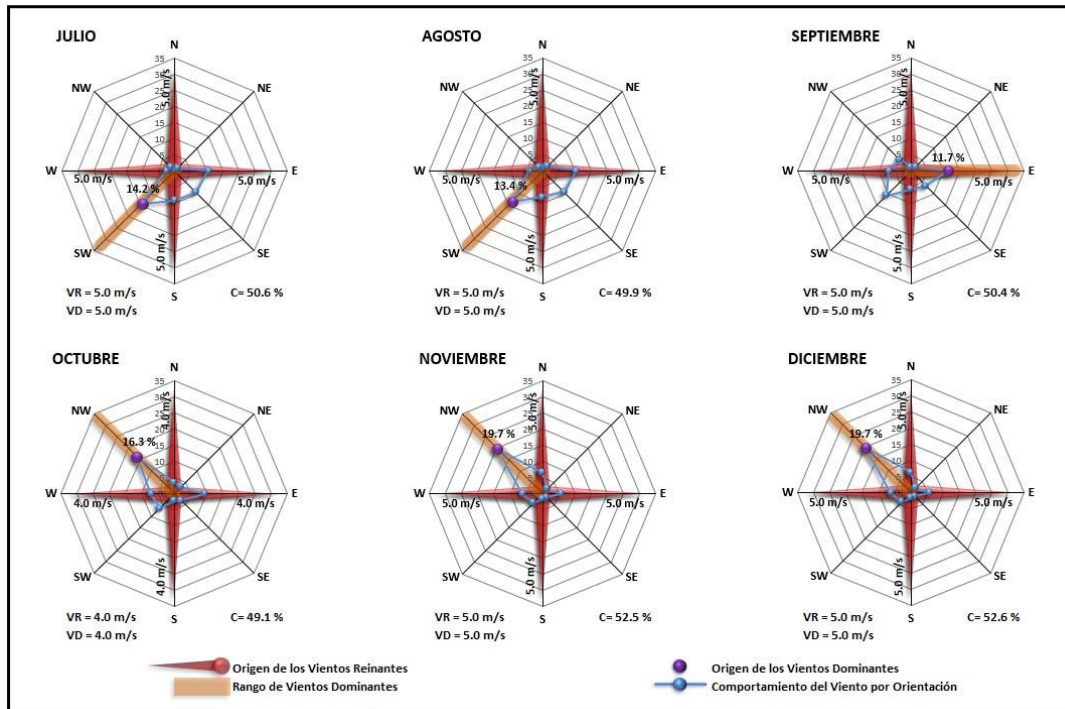
**Febrero:** el rango y origen de los vientos dominantes proviene de la dirección noroeste (NW) con una velocidad media de 5 m/s y una frecuencia del 25.1%; el promedio de calmas es del 49.3%.

**Marzo:** el rango y origen de los vientos dominantes proviene de la dirección noroeste (NW) con una velocidad media de 5 m/s y una frecuencia del 19.8%; el promedio de calmas es del 49.3%.

**Abril:** el rango y origen de los vientos dominantes proviene de la dirección noroeste (NW) con una velocidad media de 5 m/s y una frecuencia del 14.9%; el promedio de calmas es del 49.1%.

**Mayo:** el rango de los vientos dominantes predomina la dirección suroeste (SW), al igual que el origen del viento proviene de la misma dirección; con una velocidad media mensual de 5 m/s y una frecuencia del 15.4%; el promedio de calmas es de 50.9.

**Junio:** el rango de los vientos dominantes abarca las orientaciones suroeste (SW) y sur (S); el origen de los vientos dominantes proviene también desde el suroeste (SW) con una velocidad de 5 m/s y una frecuencia del 15.5%; el promedio de calmas es del 51.9%.



Gráfica 15. Vientos (segunda parte). Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

**Julio:** el rango y origen de los vientos dominantes provienen de la dirección suroeste (SW) con una velocidad media de 5 m/s y una frecuencia del 14.2%; el promedio de calmas es del 50.6%.

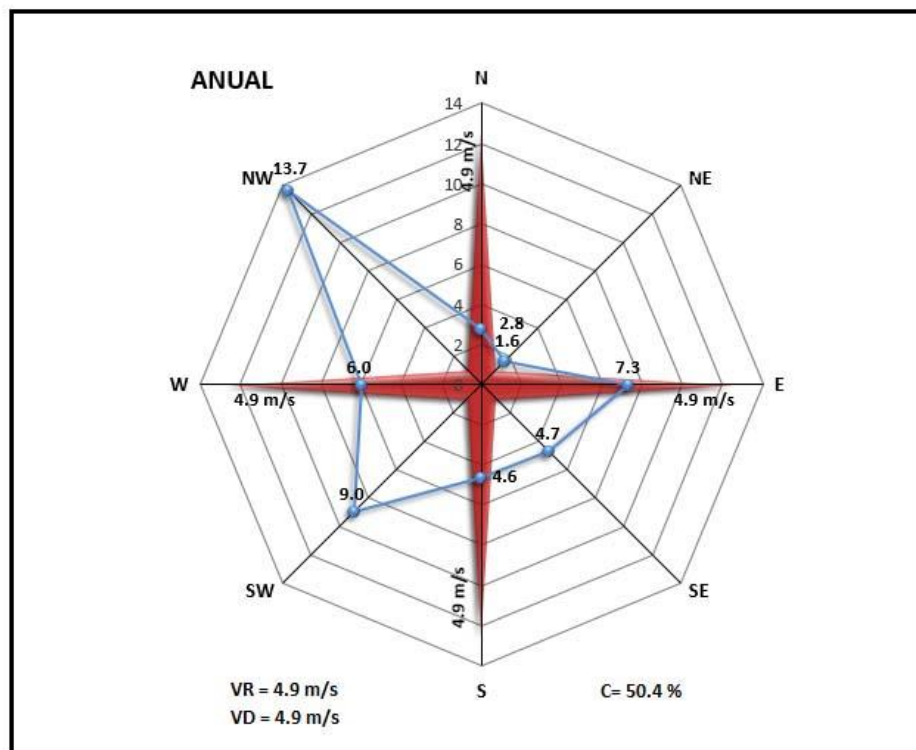
**Agosto:** el rango y origen de los vientos dominantes proviene de la dirección suroeste (SW) al igual que en el mes de julio, con una velocidad media de 5 m/s y una frecuencia del 13.4%; el promedio de calmas es del 49.9%.

**Septiembre:** el rango y origen de los vientos dominantes proviene de la dirección este (E) con una velocidad media de 5 m/s y una frecuencia del 11.7%; el promedio de calmas es del 50.4%.

**Octubre:** el rango y origen de los vientos dominantes proviene de la dirección noroeste (NW) con una velocidad media de 4 m/s y una frecuencia del 16.3%; el promedio de calmas es del 49.1%.

**Noviembre:** el rango de los vientos dominantes predomina la dirección noroeste (NW), al igual que el origen del viento proviene de la misma dirección; con una velocidad media mensual de 5 m/s y una frecuencia del 19.7%; el promedio de calmas es de 52.5.

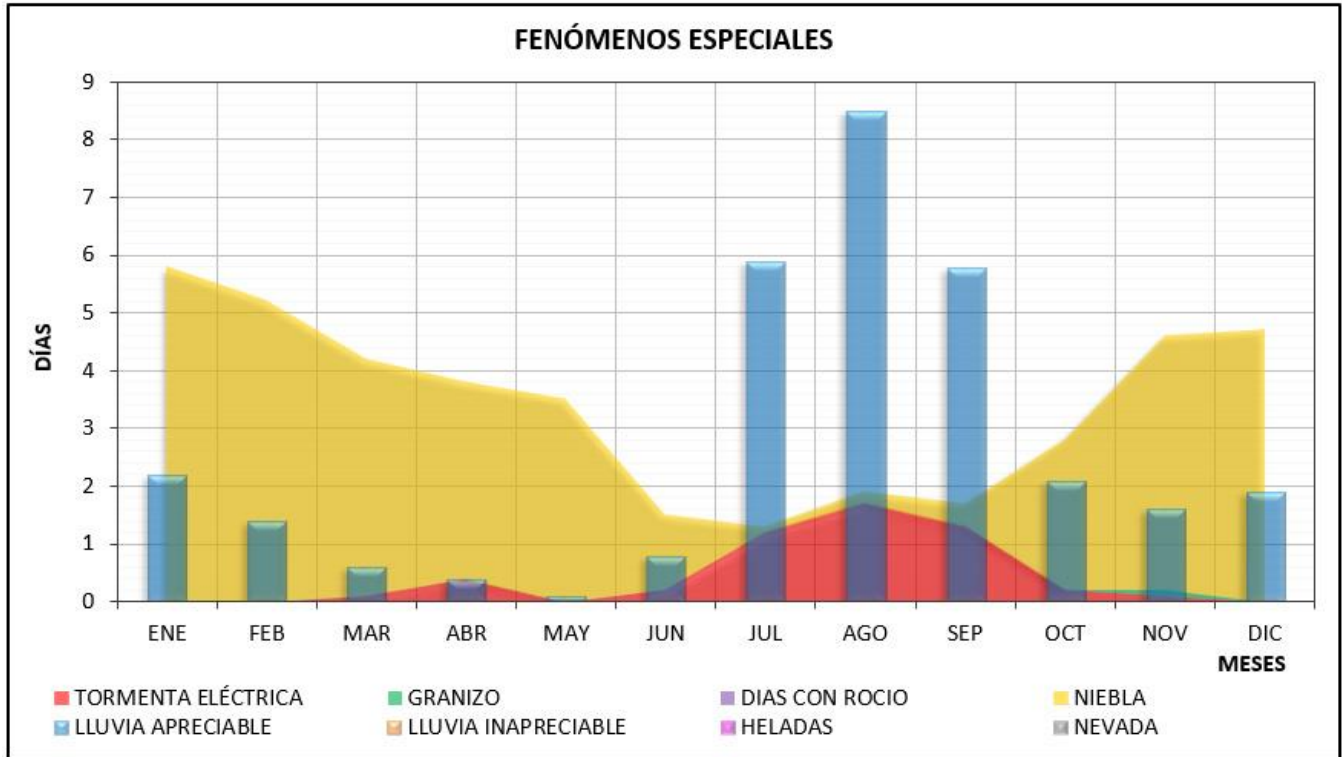
**Diciembre:** el rango de los vientos dominantes predomina la dirección noroeste (NW); el origen de los vientos dominantes proviene también desde el noroeste (NW) con una velocidad de 5 m/s y una frecuencia del 19.7%; el promedio de calmas es del 52.6%.



**Gráfica 16.** Viento Anual. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

Noroeste, ya que de octubre a abril los vientos dominantes provienen de esta dirección. La segunda orientación de vientos dominantes se presenta al Suroeste abarcando su dominancia de mayo a septiembre, este periodo contiene los meses en los que se requiere mayor enfriamiento de las edificaciones y según la rosa de los vientos proporcionada por Climate Consultant con datos de Los Mochis, esta orientación cuenta con el mayor porcentaje de horas de viento.





**Gráfica 18.** Fenómenos especiales. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

Como se puede notar en la gráfica, para Los Mochis la gráfica sólo llega a un máximo de 9 días al mes de frecuencia de fenómenos especiales, ya que ninguno de estos eventos sucede con mayor frecuencia a esta, siendo la lluvia la más común.

#### 4.2.8. Índice Ombrotérmico

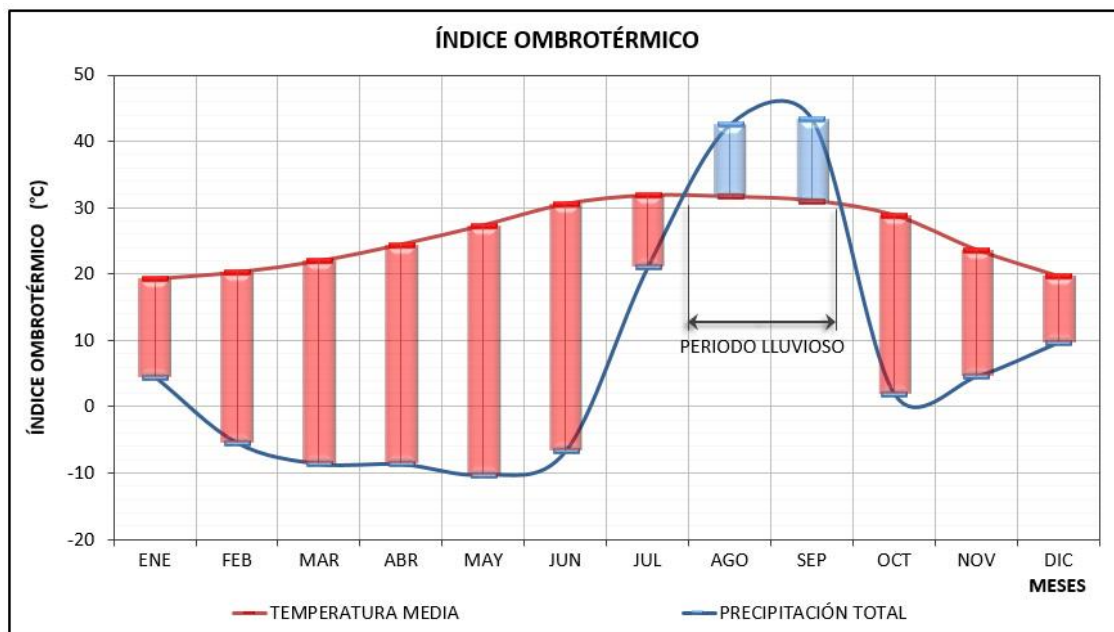
De acuerdo a Rivas-Martínez (2008), el Índice Ombrotérmico es la suma de la precipitación mensual medida en milímetros durante los meses donde la temperatura media es mayor a 0°C, a la que se le llama “precipitación positiva anual” (Pp), y la suma de la temperatura mensual en grados centígrados, de igual manera cuando la temperatura media es mayor a los 0°C, a la cual se le llama “temperatura positiva anual” (Tp). Su fórmula es  $I_o = Pp/Tp$  y su sigla  $I_o$ .

En la gráfica de Índice ombrotérmico de la ciudad de Los Mochis se representan con una curva la temperatura media mensual que se compara con la precipitación total mensual. En la tabla de arriba se pueden identificar los dos coeficientes que maneja este índice, que son, la temperatura equivalente y el

índice de aridez. El índice de aridez se representa con un número mayor entre más humedad haya, y un número menor entre más árido o seco sea el periodo. En Los Mochis hay predominancia seca en la mayoría de los meses, con excepción de agosto y septiembre que abarcan el periodo lluvioso; el mes más seco según el índice ombrotérmico con relación a su temperatura equivalente y el índice de aridez sería el mes de mayo.

ÍNDICE OMBROTÉRMICO																
FUENTE	VARIABLES CLIMATOLÓGICAS	UNIDAD	AÑOS	MESES												ANUAL
				ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
a	TEMPERATURA MEDIA	°C	30	19.3	20.3	22.0	24.5	27.4	30.6	31.9	31.7	31.1	28.9	23.7	19.7	25.9
a	PRECIPITACIÓN TOTAL	mm	25	30.1	10.2	3.9	3.8	0.6	7.8	63.3	106.2	107.7	25.0	30.2	40.5	429.3
ÍNDICE OMBROTÉRMICO																
b	TEMPERATURA EQUIVALENTE	coef.		4.6	-5.4	-8.6	-8.6	-10.2	-6.6	21.2	42.6	43.4	2.0	4.6	9.8	7.4
b	ÍNDICE DE ARIDEZ	coef.		0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	0.7	1.3	1.4	0.1	0.2	0.5	0.2
b	SECO / HUMEDO			S	S	S	S	S	S	S	H	H	S	S	S	S

Tabla 4. Índice Ombrotérmico. Elaboración propia con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).



Gráfica 19. Índice ombrotérmico. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

### 4.3. Análisis bioclimático

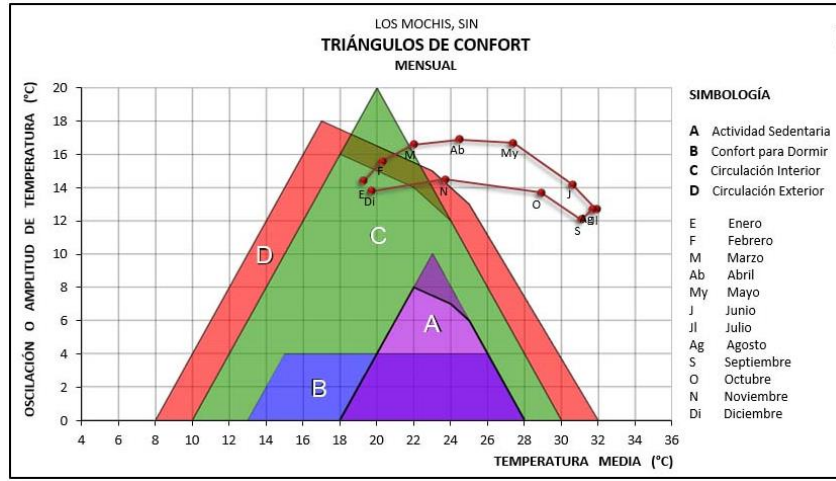
Existen diversas herramientas gráficas para analizar las variables climáticas y culturales que intervienen en el logro del confort térmico, de esta forma se puede evaluar visualmente estas variables y sus interacciones, las variables básicas del confort térmico que se representan más comúnmente son la temperatura, la humedad, la radiación solar y los movimientos de aire.

A continuación, se presentan algunas gráficas como apoyo para el análisis bioclimático de la ciudad de Los Mochis, Sinaloa, como son los Triángulos de confort, Estrategias Bioclimáticas, Tablas de Mahoney y Diagrama Bioclimático de Olgyay.

#### 4.3.1. Triángulos de confort

Los Triángulos de confort son una técnica de diseño que facilitan la elección de estrategias apropiadas para el diseño bioclimático, de acuerdo a las condiciones meteorológicas comunes de cada mes. Esta herramienta permite además comparar las condiciones climáticas con las condiciones deseables de confort térmico para las diferentes actividades (Actividad sedentaria, confort para dormir, circulación interior, circulación exterior).

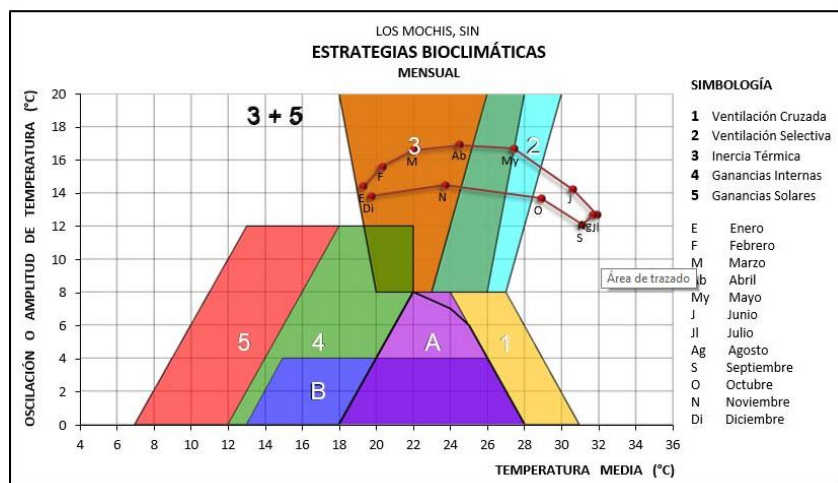
A continuación, se presentan los Triángulos de confort para la ciudad de Los Mochis, Sinaloa. La gráfica nos muestra que, en Los Mochis, durante diciembre, enero, y febrero se puede alcanzar el confort térmico necesario para la circulación exterior; y durante parte de noviembre, diciembre, enero y febrero para circulación interior de una persona dentro de una edificación.



Gráfica 20. Triángulos de confort. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

#### 4.3.2. Estrategias Bioclimáticas

La gráfica de Estrategias Bioclimáticas arroja que, durante los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo, abril y parte de mayo, con aplicar la estrategia de inercia térmica se puede alcanzar la zona de confort; para mayo se puede utilizar la ventilación selectiva. Se puede notar que en el periodo de junio a octubre no aparece ninguna estrategia bioclimática que pueda ayudar a estar en confort, ya que son los meses donde la temperatura es más alta, llegando a condiciones extremas, y este tipo de estrategias ya no es suficiente.



Gráfica 21. Estrategias Bioclimáticas. Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

De acuerdo a Evans (2000) las diferentes estrategias bioclimáticas pueden lograr distintos cambios en el comportamiento térmico de las edificaciones:

- **Ventilación cruzada:** un ejemplo de aplicación de esta estrategia es el uso de ventiladores de techo, lo cual puede reducir la temperatura aparente en  $2^{\circ}\text{K}$ .
- **Ventilación selectiva:** permite reducir la temperatura media en  $3^{\circ}\text{K}$ , logrando diferencias menores en zonas con menor amplitud.
- **Inercia térmica:** puede llegar a reducir la amplitud interior en una tercera parte de la amplitud exterior.
- **Ganancias internas:** pueden aumentar  $3\text{-}4^{\circ}\text{K}$  o más la temperatura media en edificios bien aislados.
- **Ganancias solares:** permiten alcanzar valores de hasta  $10^{\circ}\text{K}$ .

Algunas de estas estrategias de diseño bioclimático propuestas necesitan de importantes variaciones de temperatura para funcionar de manera eficaz (Evans, 2000):

- **Inercia Térmica:** permite disminuir la variación de temperatura interior. Se logra por medio de materiales densos que aumentan su temperatura en menor grado que los materiales de baja capacidad térmica cuando están se exponen a la misma cantidad de calor.
- **Retraso térmico:** Por medio del uso de materiales de gran capacidad térmica en paredes y techos de la envolvente, permite retrasar la transmisión de calor hacia el interior, evitando que los espacios interiores se calienten cuando las temperaturas en el exterior son elevadas.
- **Ventilación selectiva:** El control de la ventilación de acuerdo a las necesidades térmicas del momento. En épocas más frías, se puede reducir la ventilación nocturna y aumentar la ventilación a mediodía cuando las temperaturas exteriores son confortables, elevando la temperatura media.
- **Ganancias solares:** El ingreso de radiación solar, a través de transparencias en la envolvente, aumenta la temperatura interior. Esto puede ocasionar que se almacene calor en los materiales densos de los espacios interiores.

### 4.3.3. Tablas de Mahoney

Esta herramienta de diseño bioclimático propone una serie de recomendaciones para mejorar el confort térmico en un lugar determinado de acuerdo a sus características meteorológicas. Las cuatro etapas del análisis que proponen estas tablas son: 1) Análisis de datos meteorológicos mensuales; 2) Comparación de los datos climatológicos contra valores de límites o zonas de confort; 3) Identificación de indicadores y; 4) La definición de recomendaciones para el diseño arquitectónico (Evans, 2000).

“Las Tablas de Mahoney permiten evaluar la duración de las condiciones de disconfort y la necesidad de responder con recursos bioclimáticos específicos, equilibrando las necesidades en distintas épocas del año” (Evans, 2000).

De acuerdo a estas tablas se recomienda principalmente el uso de construcción masiva, una configuración compacta, con ventanas pequeñas y la ventilación no es requerida.

LOS MOCHIS, SIN  
**TABLAS DE MAHONEY**

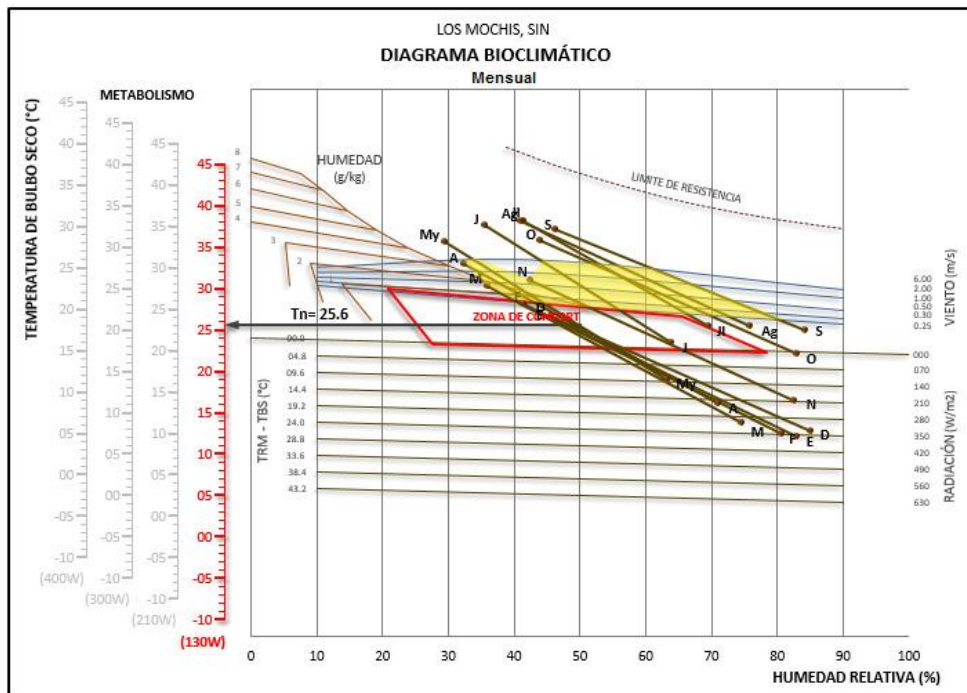
INDICADORES	1	2	3	4	5	6	No.	RECOMENDACIONES	
NÚM. INDICADORES	0	0	0	12	2	0			
DISTRIBUCIÓN							X	1	
								2	Concepto de patio compacto
ESPACIAMIENTO								3	
								4	
							X	5	Configuración compacta
VENTILACIÓN								6	
								7	
							X	8	Ventilación NO requerida
TAMAÑO DE ABERTURAS								9	
								10	
								11	
							X	12	Muy Pequeñas (10% - 20%)
POSICIÓN DE ABERTURAS								14	
								15	
PROTECCIÓN DE ABERTURAS							X	16	Sombreado total y permanente
								17	
MUROS Y PISOS								18	
							X	19	Masivos (arriba de 8 h de retardo térmico)
TECHUMBRE								20	
								21	
							X	22	Masiva (arriba de 8 h de retardo térmico)
ESPACIOS NOCTURNOS EXT.							X	23	Espacios de uso nocturno al exterior
								24	

NOTA: Para cada aspecto se da una sola recomendación o ninguna, excepto en "Protección de las aberturas" y "Espacios nocturnos exteriores", donde varias recomendaciones son posibles.

**Tabla 5.** Índice Tablas de Mahoney. Elaboración propia con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

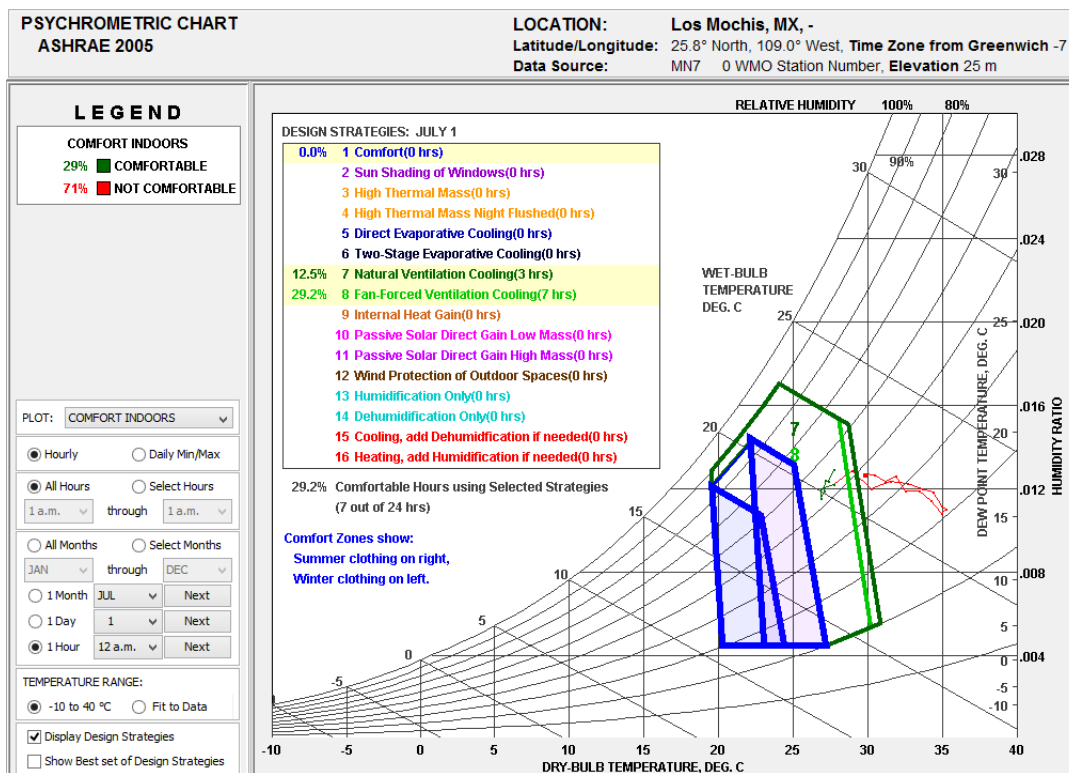
#### 4.3.4. Diagrama Bioclimático

El Diagrama Bioclimático de Olgay es una de las herramientas gráficas, de análisis bioclimático, más conocidas y utilizadas, y que permite establecer una “zona de confort” en relación con la temperatura, humedad relativa del aire, radiación solar y viento. Se puede identificar como algunos meses como son enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio y noviembre atraviesan la zona de confort en mayor o menor medida, pero ningún mes se encuentra dentro de ella totalmente. En Los Mochis se presentan periodos de radiación y viento altos, los cuales en combinación afectan la percepción térmica de las personas causando incomodidad, si a esta combinación se le suma humedad relativa alta, puede ser otro causante de este tipo de malestar térmico. Mayo es un ejemplo de un mes que presenta estos tres factores, aunque alguna parte de él se encuentre en la zona de confort. Los meses que no alcanzan la zona de confort y se encuentran totalmente fuera de ella son julio, agosto, septiembre y octubre. Sin embargo, en el diagrama bioclimático de la ciudad de Los Mochis que se presenta a continuación se puede identificar de color amarillo el potencial del viento que se puede aprovechar para ventilación natural cuando no se está alcanzando el confort térmico.



Gráfica 22. Diagrama Bioclimático de Olgay (mensual). Elaboración propia, con apoyo del software Bioclimatic Analysis Tool (BAT).

De acuerdo al modelo adaptativo de confort obtenido mediante Climate Consultant la estrategia de ventilación natural podría utilizarse en un 20% del tiempo total del año para mantener temperaturas de confort térmico interiores, sin embargo, en meses como en julio, como se muestra el ejemplo en la gráfica presentada a continuación, la estrategia de ventilación podría significar la solución para cerca de un 30% del tiempo, un promedio de 8 horas diarias, que coinciden con las horas nocturnas de la 1 a.m. a las 8 a.m. aproximadamente, en las que bastaría la ventilación natural para satisfacer las necesidades térmicas. Traducido en ahorro significaría un 30% menos de uso de aire acondicionado. Dependiendo el mes y las condiciones bioclimáticas que presente, estos porcentajes de tiempos pueden cambiar, por ejemplo, para el mes de abril se tendría el potencial para el uso de ventilación natural como estrategia de enfriamiento de 6 horas, en mayo y junio de 8 horas, en agosto de 3 horas, octubre de 7 horas, principalmente cuando ya se ha ocultado el sol. Estos resultados se obtendrían con cualquier método convencional de ventilación natural, por lo que con el uso de una torre de viento se busca ampliar estos rangos haciendo más eficiente la ventilación natural.



**Gráfica 23.** Gráfica psicrométrica para el mes de julio en Los Mochis. Fuente: Climate Consultant 6.0 con datos de Los Mochis, MX y el modelo adaptativo de confort ASHRAE 2005.

#### 4.4. Hallazgos aprovechables preliminares

De acuerdo con las diferentes técnicas de investigación se han podido detectar algunos hallazgos aprovechables para el desarrollo del prototipo propuesto, los cuales se presentan en la siguiente tabla, y se describen más adelante.

	<b>Revisión documental</b>	<b>Observación directa</b>	<b>Entrevistas</b>
<b>VIABILIDAD</b>			
<b>Constructiva</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Técnica</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Replicabilidad</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Financiera</b>	<b>X</b>		<b>X</b>
<b>CLIMATOLOGÍA</b>			
<b>Humedad relativa máxima</b>	<b>X</b>		<b>X</b>
<b>Temperatura máxima</b>	<b>X</b>		<b>X</b>
<b>FUNCIONAMIENTO</b>			
<b>Torres de viento</b>	<b>X</b>		<b>X</b>
<b>USUARIOS</b>			
<b>Uso de climatización artificial</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>

*Tabla 6.* Hallazgos aprovechables preliminares. Fuente: Elaboración propia.

#### Viabilidad

De acuerdo con las distintas técnicas de investigación, se puede deducir que un prototipo de sistema de torre de viento tiene alta viabilidad de aplicación en México, y en especial en regiones como Los Mochis, en cuanto a viabilidad constructiva, técnica, financiera y de replicabilidad.

Según la información obtenida por medio de la entrevista, observación directa y revisión documental, la vivienda común de México presenta áreas de oportunidad para la instalación de un prototipo de torre de viento, siempre y cuando sea de materiales ligeros, en diferentes zonas de la vivienda existente, como es el caso del cubo de escaleras, vanos existentes de aires acondicionados de ventana instalados anteriormente y el área de azoteas en general, lo que hace su instalación técnicamente viable, también las condiciones físicas y ambientales de la ciudad del caso de estudio favorecen su viabilidad técnica y de replicabilidad, ya que es una ciudad con muy pocos edificios altos y la contaminación del aire no es tan significativa como las grandes urbes. México cuenta con un territorio basto de condiciones climáticas

similares a las del caso de estudio, lo cual puede beneficiar a un gran número de personas, además que de acuerdo al entrevistado y a la revisión documental, las torres de viento pueden beneficiar a diferentes tipos de clima, solamente en diferentes épocas del año, lo que indica que un mismo prototipo prefabricado manipulable, con ajustes menores, podría replicarse en distintas regiones. También las torres de viento son de formas variadas y de distintas configuraciones, es decir, no tienen un funcionamiento ni diseño rígido, sino que su base de funcionamiento acepta variaciones de acuerdo a las necesidades específicas de climatización, y se puede modificar, de esta manera, su eficiencia.

### Climatología

La humedad relativa es uno de los factores que se deben de tomar en cuenta para el diseño del prototipo prefabricado de torre de viento, ya que está directamente relacionada con el comportamiento de la temperatura y algunas de las configuraciones existentes en los antecedentes empíricos proponen la utilización de humedad por medio de aspersores, paños o muros húmedos, lo que podría beneficiar el confort térmico interior. De acuerdo con la revisión documental y a los resultados de la entrevista, la humedad relativa puede ser alta en algunas épocas del año y salirse de los parámetros definidos como confortables, donde algunos de los meses más calurosos del año presentan esta alta humedad relativa por lo que se considera que añadir humedad mediante aspersores, o algún otro tipo de mecanismo, puede resultar contraproducente para el confort interior, por lo cual no es conveniente un enfriamiento evaporativo.

### Funcionamiento

El funcionamiento básico de una torre de viento se da captando el viento, principalmente de las direcciones dominantes, y por una diferencia de presiones se introduce al interior de las edificaciones, durante este proceso el viento adquiere velocidad y pierde temperatura, llegando más fresco al interior, y por medio de ventilación cruzada, que se puede generar con el apoyo de una ventana, otra torre o una chimenea solar. Es probable que por las altas temperaturas que se presentan a lo largo del día y por la dificultad de utilizar materiales masivos en algunas temporadas del año, sea necesario incluir un intercambiador de calor que permita una mayor eficiencia en el sistema utilizando un disipador natural de calor como es el agua, de manera indirecta para no añadir humedad al ambiente, y/o el suelo.

Debido a la configuración de la ciudad y su lotificación resulta complicado utilizar una torre de viento alejada de la vivienda para aprovechar al suelo como disipador de calor mediante un trayecto subterráneo

del viento, pero se puede aprovechar el potencial del suelo como disipador de calor de manera indirecta mediante el enfriamiento del agua que circula por la red e ingresa a la vivienda ya sea a una cisterna o directamente al tinaco dependiendo de las temperaturas que registren.

### Usuarios

Para los usuarios es indispensable contar actualmente con equipos de climatización artificial, la mayoría de los espacios de las viviendas cuenta con por lo menos un ventilador, ya sea de techo o de piso, y el aire acondicionado se encuentra muy arraigado en la cultura de los habitantes de la región del caso de estudio, lo que puede representar una de las principales limitantes.

## 4.5. Diseño aplicativo de la solución

### 4.5.1. Elección de habitación y levantamiento arquitectónico

La habitación seleccionada para el implemento de la propuesta de torre de viento se encuentra ubicada en la planta alta de una vivienda existente en la ciudad de Los Mochis con dirección en Fuente de Apolo #206 pte. Fraccionamiento Las Fuentes.

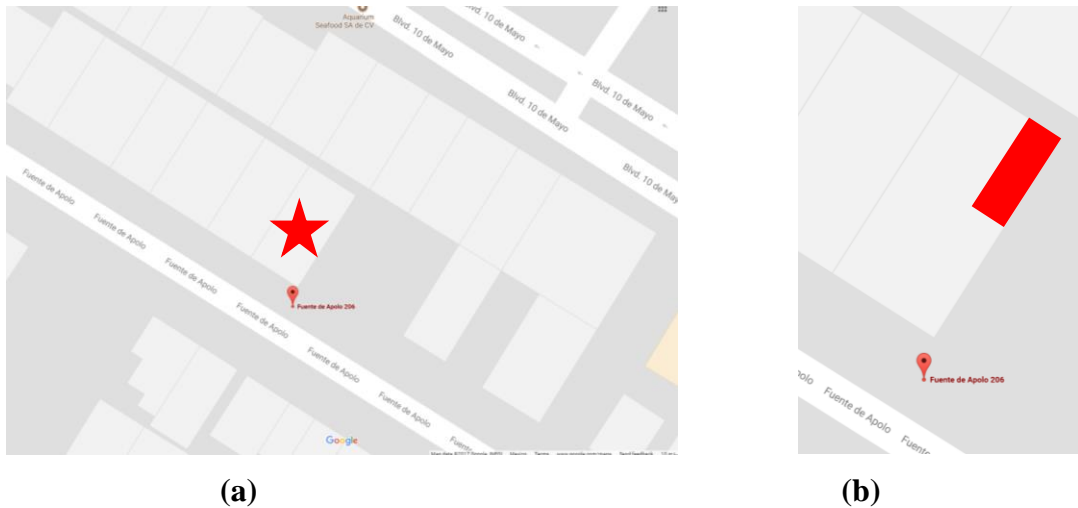
El sistema constructivo de la casa es a base de muros de ladrillo rojo recocido y castillos de concreto armado. Los muros son de 18 cm de grosor con acabados de mortero de cemento, cal y arena en muros interiores y exteriores, y acabado de yeso en lecho bajo de losas. Las losas son de 30 cm de grosor, aligeradas con casetón de poliestireno expandido de 25 x 40 x 60 cm, la cual se puede considerar como un tratamiento térmico en parte de la envolvente para amortiguar la ganancia de calor por radiación.

Por otro lado, la ubicación principal de ventanas y puertas coincide con la orientación del terreno suroeste-noreste y todas las ventanas cuentan con protecciones de herrería de barrotes color negro, en el caso de la habitación seleccionada la orientación de la ventana da hacia el noroeste. Los tipos de piso utilizados son de tipo cerámicos tanto en interior como en exterior. En la envolvente se cuenta con acabado final de pintura vinílica color blanco y algunas partes de la fachada con recubrimiento cerámico color café como en el cubo de la escalera y en la fachada principal en planta baja.

Actualmente la vivienda cuenta con distintos dispositivos eléctricos fuera de lo común que se pueden ver reflejados en sus registros de consumo de energía: una cerca eléctrica perimetral, portón eléctrico y un sistema de iluminación exterior automático. Para la climatización la vivienda cuenta con 6 mini splits de

antigüedad mayor a 15 años, también cuenta con 2 equipos de aire acondicionado de ventana antiguos de los cuales uno tiene más de 25 años, pero está ubicado en una habitación de poco uso y otro que tiene más de 30 años de antigüedad se encuentra en una habitación dormitorio de uso regular.

Las colindancias de la vivienda son un lote baldío al sureste, una vivienda de una planta al noroeste y un local comercial de una sola planta al noreste.



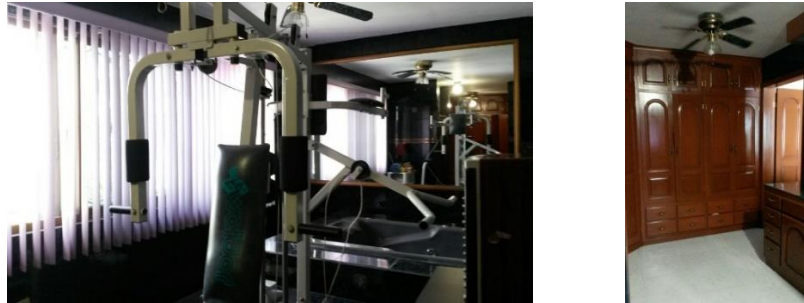
**Imagen 27.** Ubicación: (a) Predio de la vivienda seleccionada; (b) Habitación de estudio. Fuente: Elaboración propia con mapa base de Google (2017) [Mapa de la ciudad de Los Mochis].



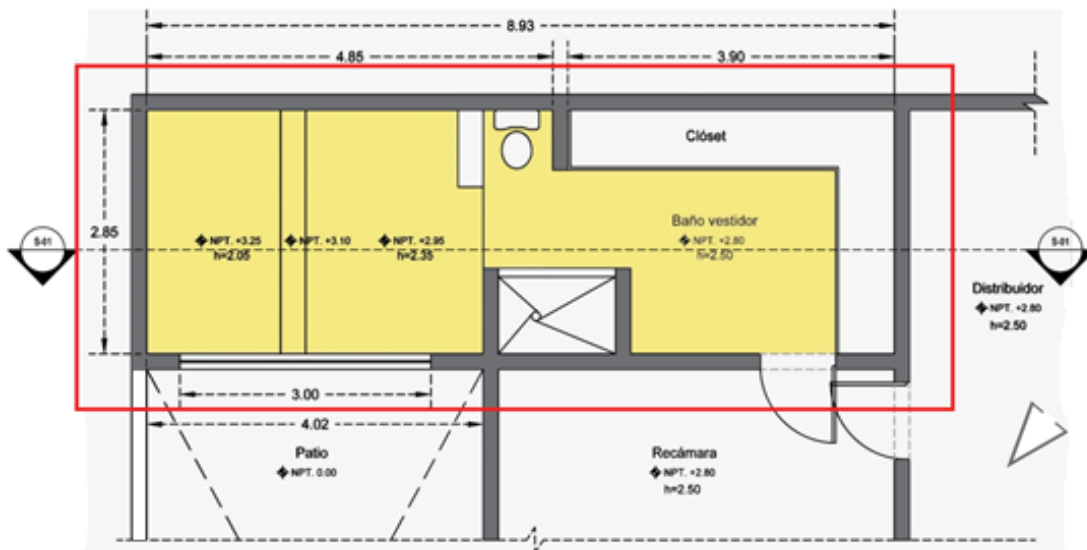
**Imagen 28.** Fachada de la vivienda para el caso de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Se llevó a cabo un levantamiento arquitectónico y fotográfico de la habitación para conocer sus características actuales y sus posibilidades para la instalación de una torre de viento, y a partir de esta información se realizó el modelo utilizado como base para la simulación numérica por medio de CFD.

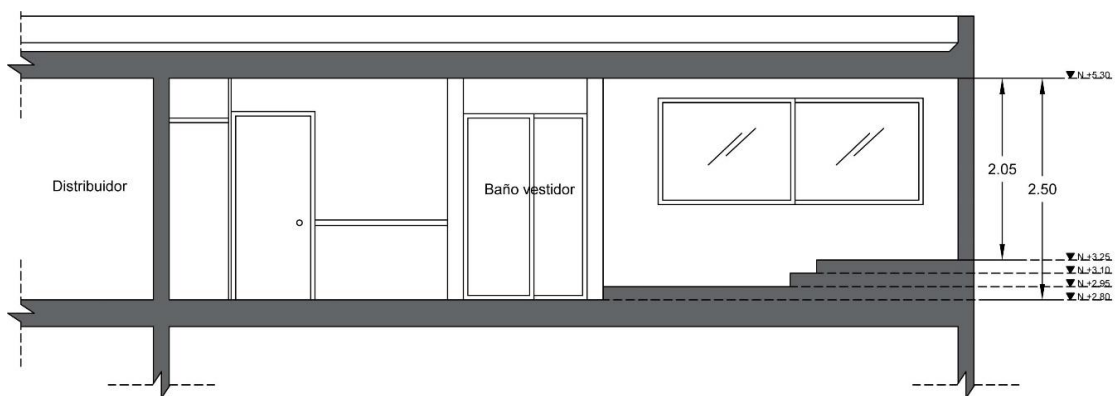
La habitación elegida cumple con la función de baño vestidor de la recámara principal de la vivienda. Fue elegida ya que es una de las habitaciones más grandes de la casa (20 m<sup>2</sup> aproximadamente) y no cuenta con equipo de aire acondicionado que pudiera interferir en los monitoreos de temperatura y humedad relativa que se llevaron a cabo; cuenta con dos ventiladores de techo.



**Imagen 29.** Fotos del interior de la habitación elegida en el estado actual. Fuente: Elaboración propia.



**Imagen 30.** Levantamiento arquitectónico PLANTA. Fuente: Elaboración propia.



**Imagen 31.** Levantamiento arquitectónico SECCIÓN. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.2. Monitoreo de temperatura y humedad relativa

Se llevó a cabo un monitoreo de temperatura y humedad relativa en la habitación de estudio y en su exterior. El equipo utilizado para esta actividad fue un HOBO data logger para monitorear la temperatura y un EXTECH RHT10 Data logger para la humedad relativa.

Los equipos de monitoreo registraron la información cada 3 horas durante los días 23 al 25 de junio del 2017.



(a)

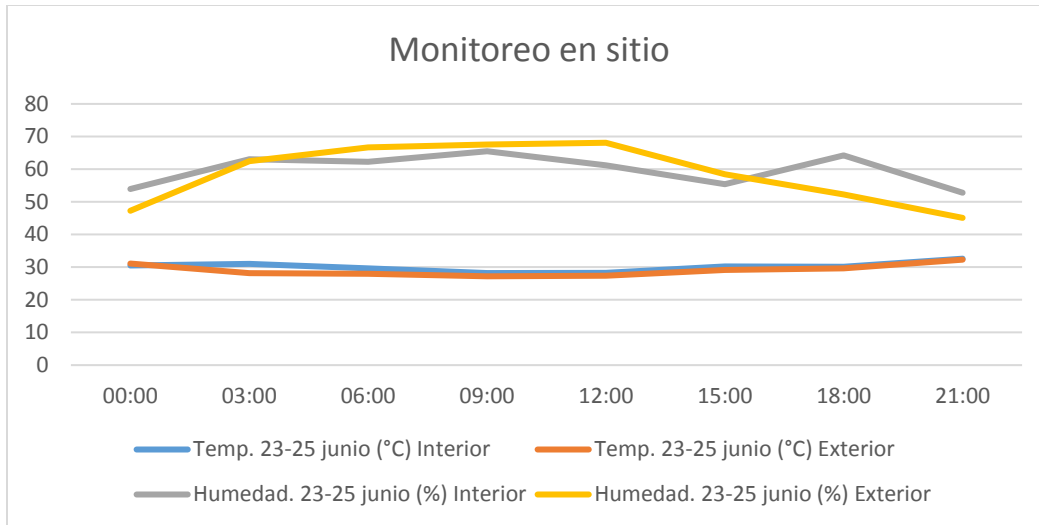


(b)

**Imagen 32.** Equipo de monitoreo: (a) HOBO data logger para temperatura; (b) EXTECH RHT10 Data logger para la Humedad relativa.

Las temperaturas registradas por el monitoreo oscilaron entre los 28°C y los 34°C tanto en el interior como en el exterior, y los porcentajes de humedad relativa se registraron entre 46% y 69%. En la *Gráfica 23* podemos notar que cuando la temperatura se registró más alta la humedad relativa se presentó en menor porcentaje, esto se debe a que a mayor temperatura el aire admite mayor cantidad de humedad antes de saturarse, por ejemplo, en invierno es más probable que la humedad relativa sea más alta ya que el aire no admite más vapor de agua en su composición. “El aire que nos rodea es aire húmedo, es decir, está compuesto por una mezcla de gases, principalmente oxígeno y nitrógeno, pero también vapor de agua” (Grupo de Investigación Reconocido de la Universidad de Valladolid, 2014, pág. s/p).

De acuerdo al monitoreo se puede observar que la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior de la edificación es poca a lo largo del día, de acuerdo a Lim et al. (2011) esto es algo común en los lugares con clima cálido húmedo, lo que puede dificultar “el efecto chimenea”, una de las principales funciones de las torres de viento, donde por una diferencia entre la temperatura exterior y la interior se propicia la ventilación cruzada extrayendo el aire caliente del interior.



**Gráfica 23.** Monitoreo de temperatura y humedad relativa en sitio del 23 al 25 de junio del 2017. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.3. Medición de temperatura en depósitos de agua existentes de la vivienda

De acuerdo a las condiciones climáticas del lugar y al análisis realizado un sistema de torre de viento de construcción masiva para el enfriamiento del aire no es lo más viable para la vivienda existente ya que no se encuentra preparada constructivamente para su instalación, y por otro lado, el agregar humedad para lograr reducir la temperatura por medio del enfriamiento evaporativo tampoco sería la mejor opción debido a que el ambiente ya cuenta con una humedad relativa elevada. Sin embargo, el aire captado no tiene la capacidad de reducir su temperatura por sí solo para alcanzar condiciones de confort, necesita de algún tratamiento extra que le ayude a lograrlo. Por estas circunstancias se planteó añadir al sistema un intercambiador de calor mediante el cual se pueda aprovechar la temperatura de los depósitos de agua existentes en la vivienda mediante un serpentín que la haga circular por el interior de la torre a contraflujo del aire captado.

La vivienda cuenta con dos principales depósitos de agua para su abastecimiento, un tinaco y una cisterna. De acuerdo a los recibos de consumo de agua de la vivienda emitidos por parte de JAPAMA (Junta de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Ahome) durante el año 2017 en la vivienda se consumió un total de 156 m<sup>3</sup> de agua, con un aproximado de 13 m<sup>3</sup> mensuales y 433 litros diarios, que sería la cantidad de agua que se encontraría en renovación a lo largo del día.

### **Tinaco**

El tinaco tiene una capacidad de 1000 lts, es de asbesto de color exterior blanco y se encuentra instalado en la azotea. Se llevó a cabo la medición de la temperatura del agua almacenada en su interior mediante un termómetro sumergible de mercurio a las 3:00 p.m durante el mes de abril. Los resultados de la medición fue una temperatura promedio de 27°C.

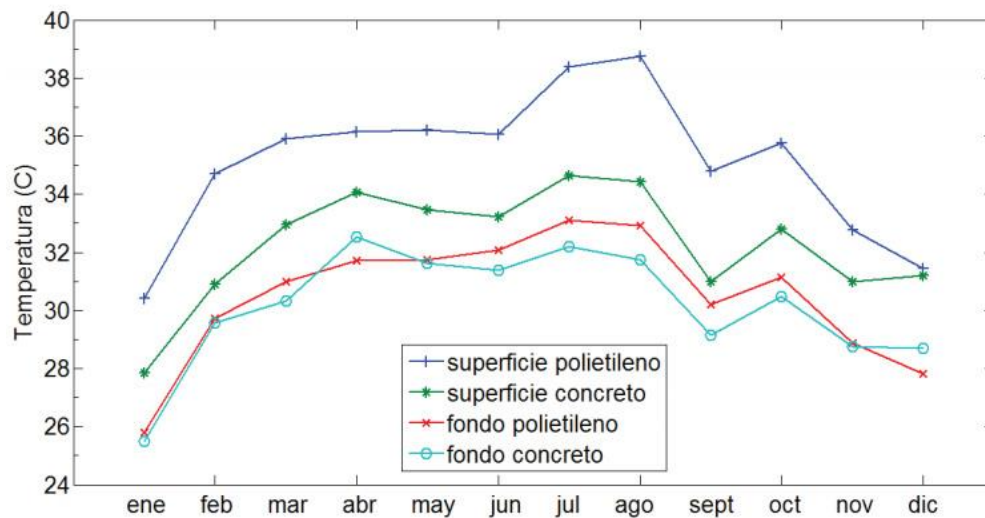


***Imagen 33.*** Tinaco de la vivienda.



***Imagen 34.*** Termómetro sumergible de mercurio.

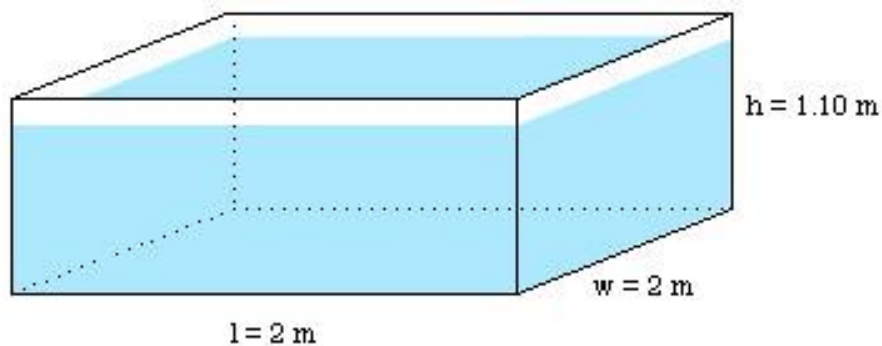
Diego Ayala & Carrillo Baeza (2015) realizaron un estudio acerca del comportamiento térmico de tinacos en un clima cálido sub-húmedo en México (Yucatán) en el cual encontraron que los tinacos de concreto alcanzan temperaturas más altas entre 1 y 2 grados en el fondo que los de plástico. Durante un día soleado de julio el tinaco de concreto (color natural) alcanzó temperaturas de 31°C en su fondo y registró un promedio anual de temperatura en el fondo de 29°C.



**Gráfica 24.** Promedio mensual de temperaturas máximas en la superficie y el fondo de los tinacos. Fuente: Diego Ayala & Carrillo Baeza (2015, pág. 578).

### Cisterna

La cisterna subterránea está construida de material en sitio y cuenta con una capacidad de 4000 litros (calculado al 90 %) con dimensiones de 2 m x 2 m x 1.10 m. No recibe radiación solar directa completa ya que el área donde se encuentra cuenta con una cubierta pergolada.



**Imagen 35.** Dimensiones de cisterna existente. Fuente: Elaboración propia.



*Imagen 36.* Tapadera de cisterna.

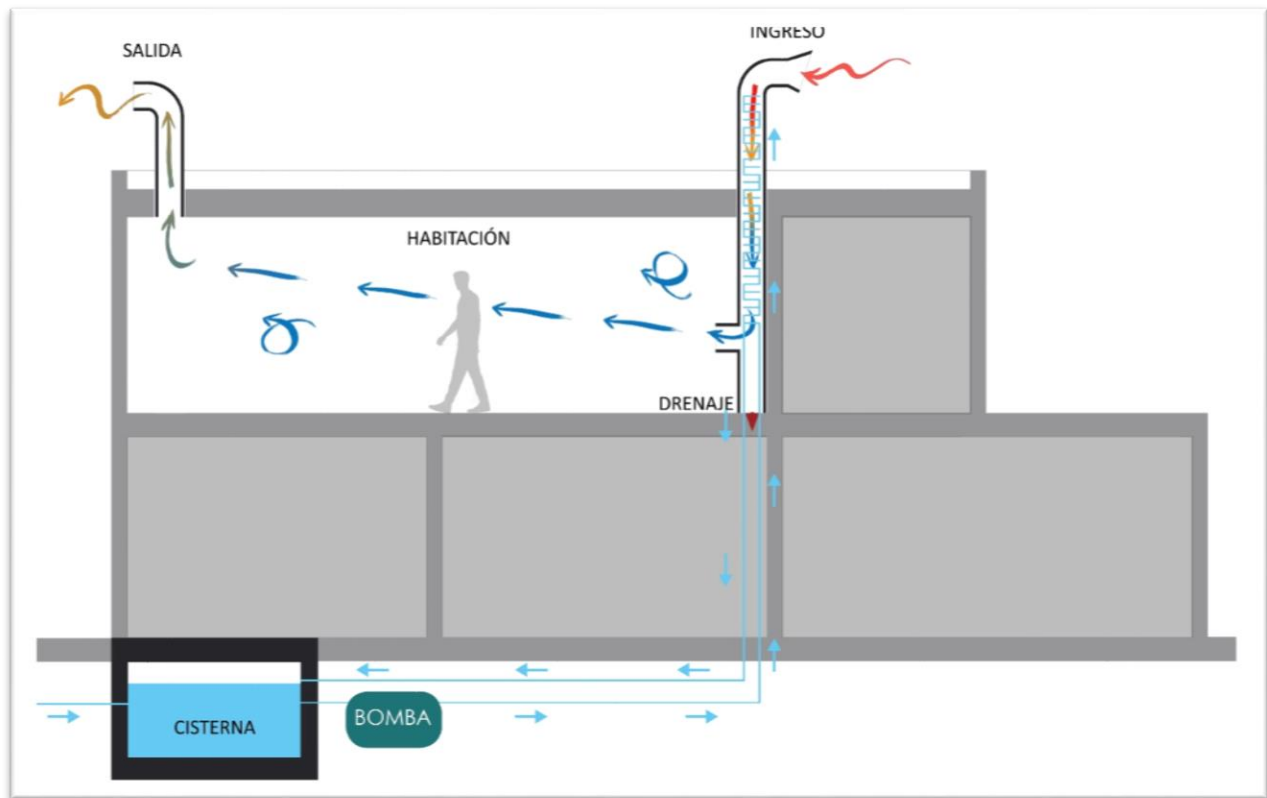
Se realizó la medición de la temperatura del agua almacenada en su interior mediante un termómetro sumergible de mercurio a las en diferentes días y diferentes horas al azar. Los resultados de las mediciones rondaron los 20 °C y 21°C, lo que hace más factible su uso como fuente enfriadora para el sistema propuesto, ya que recibe menos ganancia de calor por radiación que el tinaco y pierde temperatura al estar en contacto con el suelo, además de almacenar mayor cantidad de agua para abastecer al sistema.

De acuerdo a datos de INEGI (ENIGH 2016) es poco frecuente que las viviendas cuenten con cisterna en la ciudad, por lo que la vivienda del caso de estudio es un caso fuera de lo común y tal vez se deba considerar la instalación de una de éstas en la vivienda.

#### 4.5.4. Diseño de sistema de enfriamiento con torre de viento

El sistema de enfriamiento híbrido de torre de viento propuesto consta, principalmente, de una torre captadora y enfriadora de viento y de una salida del mismo la cual puede ser una ventana ya existente u otra torre de salida del lado opuesto a la torre captadora de viento. En este caso se optó por la torre de salida ya que el aire caliente tiende a subir y una salida en la parte superior puede favorecer la circulación de aire fresco expulsando con mayor facilidad el que esté más caliente. La torre captadora de viento cuenta con un serpentín que se alimenta de agua utilizando a la cisterna como fuente del recurso por medio de

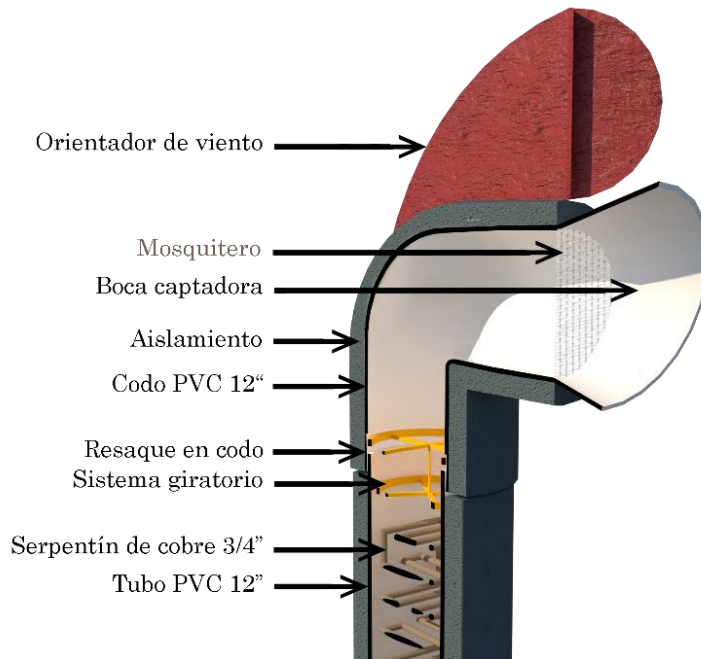
una electrobomba centrífuga para agua que permite que el agua se mantenga circulando durante el tiempo que el sistema se encuentre activo.



*Imagen 37.* Esquema de sistema de torre de viento para enfriamiento híbrido.

Debido a los requerimientos técnicos del sistema es necesario que sea ligero por lo que se proponen los siguientes materiales para la torre de captación de viento y enfriamiento:

- Codo de PVC para tubo de 12” para cabeza captadora.
- Tubo de PVC (4 m) de 12” (30 cm aprox.) para tiro de torre.
- Orientador de viento de polipropileno de 2 mm de espesor.
- Aislante de Polietileno expandido de 5 cm de espesor para tubo en exterior y codo.
- Sistema giratorio de aluminio.
- Serpentín de cobre de 3/4” (27 m).
- “T” de PVC para tubo de 12”, para ingreso de aire enfriado al interior.



**Imagen 38.** Detalles de funcionamiento de captación.

Para la torre de salida del viento se proponen los siguientes materiales:

- Tubo galvanizado de 12" (30 cm aprox.) para tiro de torre.
- Codo galvanizado para tubo de 12" para cabeza expulsora.
- Sistema giratorio de aluminio.
- Orientador de viento de polipropileno de 2 mm de espesor.

Tanto para el ingreso como para la salida del viento se contempla que se cuente con algún tipo de compuerta interior que permita al usuario cerrar y abrir los intercambios de flujos de aire con el exterior desde el interior de la edificación en cualquier momento.

A partir de distintas pruebas de simulación previa que se realizaron con el software Autodesk CFD y distintas configuraciones de torre de viento se propuso una altura de 1.5 m para la torre a partir del lecho superior de la losa de azotea, ya que de acuerdo a los resultados obtenidos a esa altura se alcanzan los vientos veloces sin elevar mucho más la torre debido al efecto que produce la forma de la vivienda en el comportamiento de estos; con un tiro interior de 2.5 m hasta tocar el suelo, esto con el fin de dar más espacio al intercambiador de calor y que el serpentín sea más largo y de conducir las posibles condensaciones hasta una coladera en el suelo; y la salida interior del aire captado se encuentra a 0.90 m del suelo para dirigir el viento a una altura cómoda para los usuarios. La altura de la torre de salida se

determinó de 1.2 m de altura, en este caso esta altura dio mejores resultados para la salida del aire caliente que otras configuraciones más bajas y que el uso de la ventana existente.

#### 4.5.5. Elaboración y pruebas de maqueta a escala

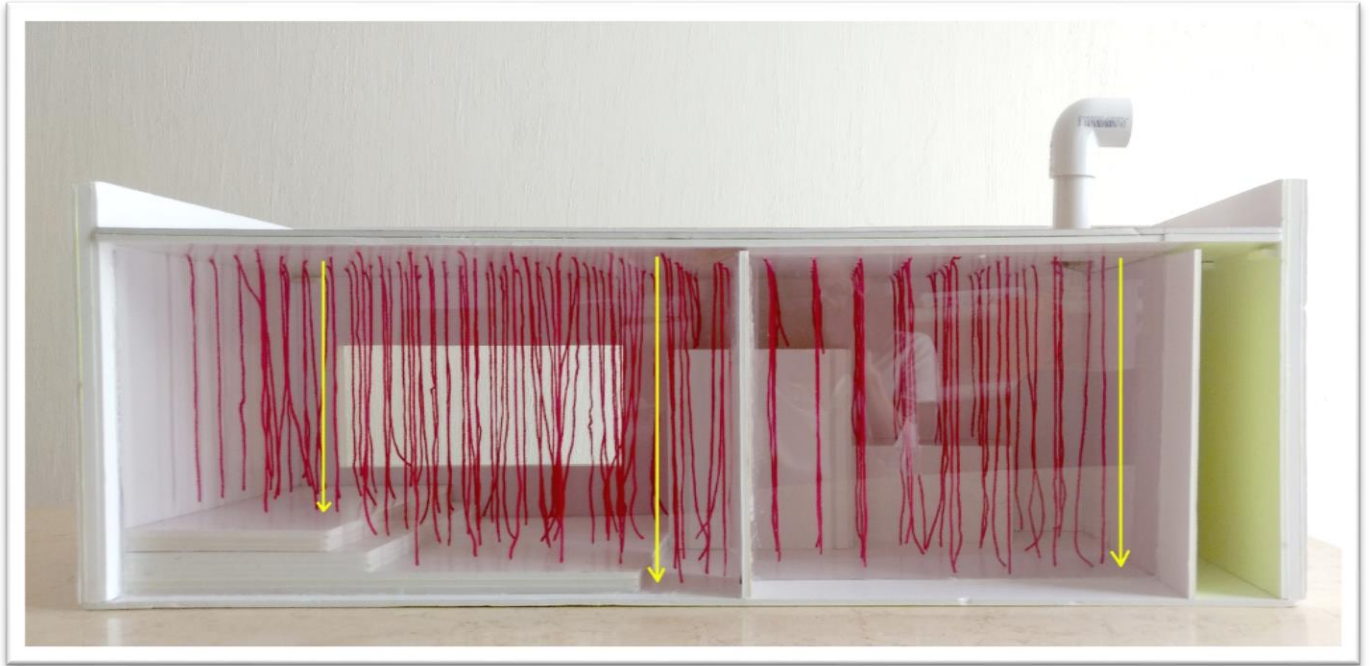
Se elaboró una maqueta a escala 1:10 de la habitación de estudio para comprobar la capacidad de la captación de viento de una torre captadora con el diseño base propuesto, los materiales utilizados para la construcción del modelo de la habitación fueron Foamboard para darle el grosor necesario a los muros, acrílico en un lado de la maqueta para permitir la visibilidad al interior del espacio, este mismo material se utilizó para parte de la ventana para simular el cristal, y algunos hilos ligeros colgantes desde el techo para poder hacer visible el comportamiento del viento interno; la torre captadora de viento se elaboró con un tubo y un codo de PVC de 1 ¼"; el movimiento de aire se generó con el apoyo de un ventilador de pie y la velocidad del viento se controló con un anemómetro digital.

En este caso el modelo utilizó la torre captadora de viento y la salida de viento se realizó a través de la ventana existente.

Se realizaron 3 pruebas que se presentan a continuación: la primera prueba fue la observación de la maqueta sin ningún tipo de viento aplicado, en la segunda se le aplicó una velocidad de viento de 2.8 m/s aproximadamente y en la tercera prueba se le aplicó una velocidad de viento 5 m/s y se observó el movimiento al interior.

### **Prueba #1**

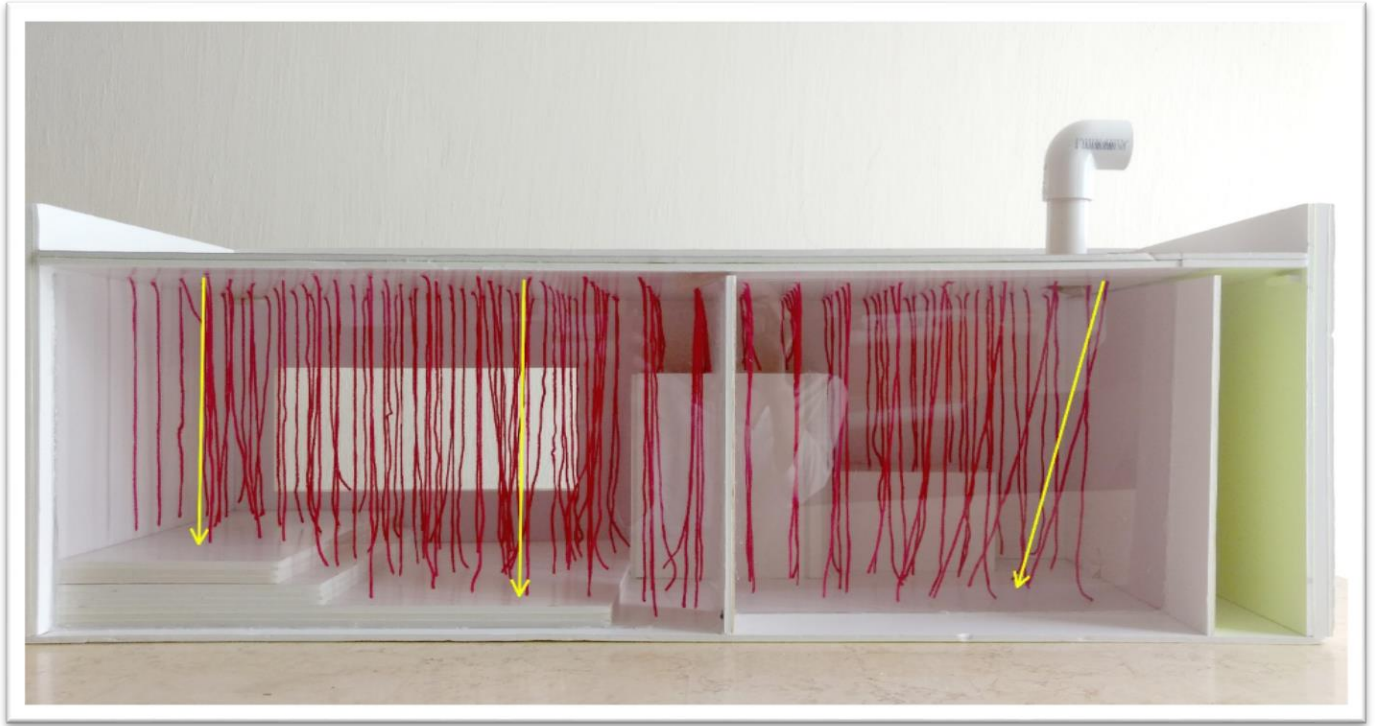
La siguiente imagen es el resultado de la observación de la maqueta sin viento aplicado, como se puede observar, los hilos rojos permanecen rectos sin ningún movimiento ya que no hay viento que captar.



*Imagen 39.* Prueba #1 de captación de viento en maqueta.

### **Prueba #2**

Para la segunda prueba con la ayuda de un ventilador de uso doméstico y un anemómetro se aplicó una velocidad de viento de 2.8 m/s aproximadamente y al interior de la maqueta se pudo distinguir movimiento en los hilos colgantes principalmente en las áreas más cercanas a la entrada de aire, del otro lado de la habitación el movimiento fue casi imperceptible.



*Imagen 40.* Prueba #2 de captación de viento en maqueta.

### **Prueba #3**

Para la tercera prueba, con las herramientas antes mencionadas, se aplicó una velocidad de viento de 5 m/s aproximadamente y al interior de la maqueta se pudo notar un movimiento en los hilos colgantes mucho más pronunciado, al igual que en la segunda prueba el movimiento más notorio se presentó las áreas más cercanas a la entrada de aire, del otro lado de la habitación el movimiento fue mínimo pero perceptible.

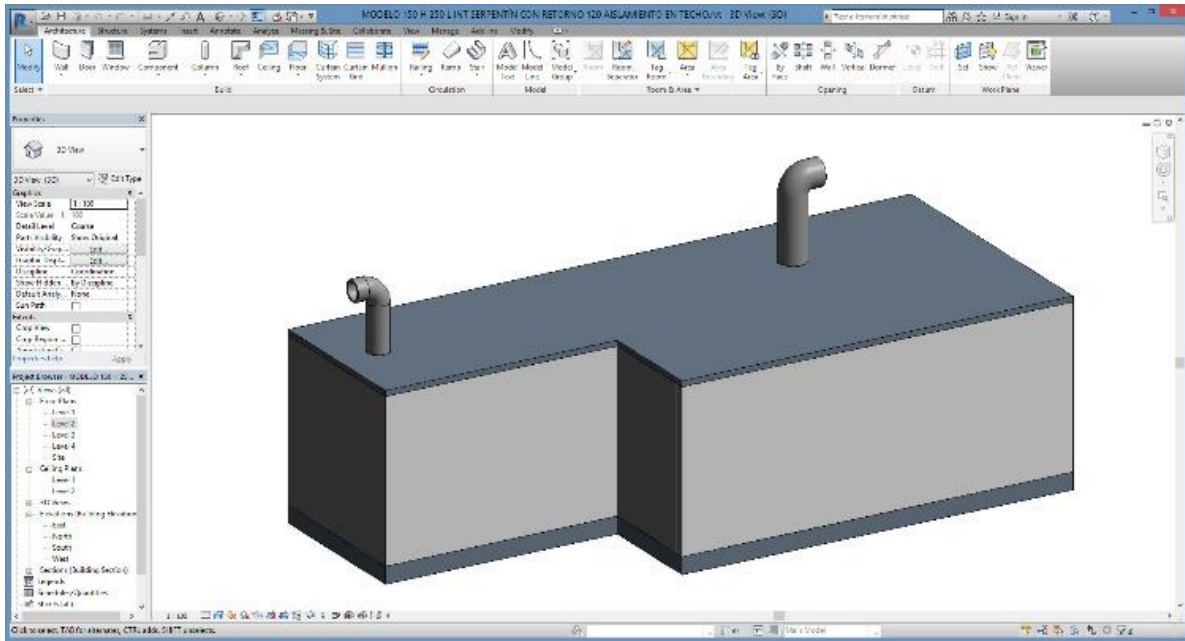


**Imagen 41.** Prueba #3 de captación de viento en maqueta.

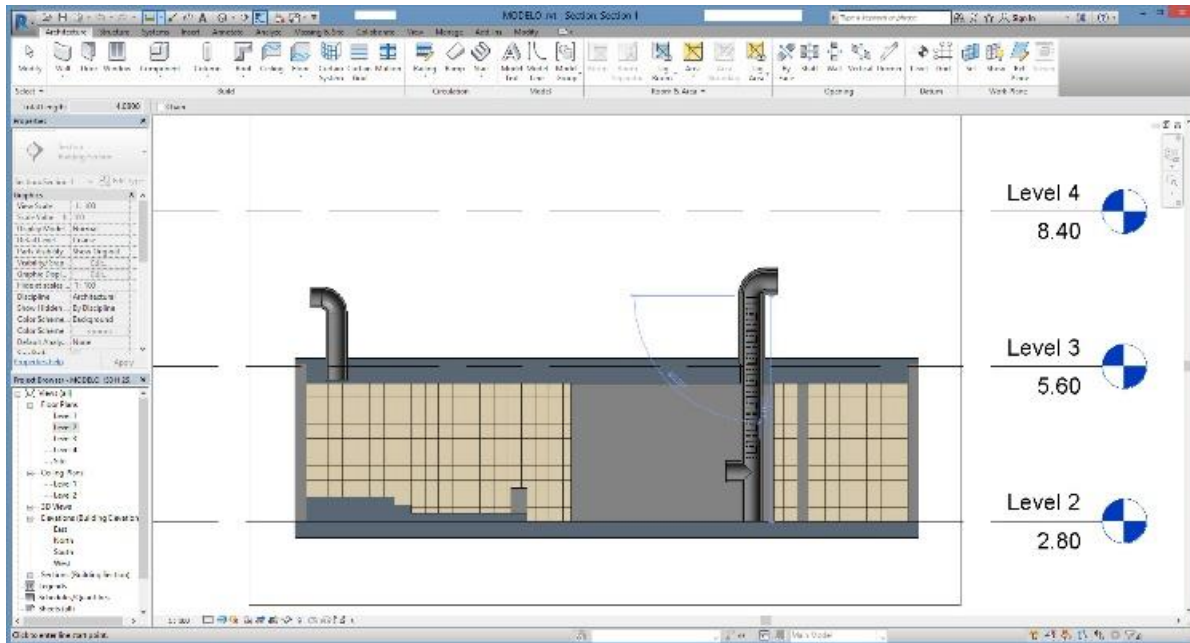
Tanto en la Prueba #2 como en la #3 fue posible percibir el movimiento de aire al interior de la habitación siendo en la #3 más notorio. Mediante las simulaciones numéricas que se realizarán a continuación será posible identificar si el aire captado es suficiente o si su velocidad al interior puede causar algún tipo de incomodidad a los usuarios.

#### 4.5.6. Simulación de captación del viento con CFD

Para la simulación mediante el software Autodesk CFD 2018 se importó el modelo 3D de la habitación de estudio realizado en el software Revit 2018 (Ver proceso en Anexo 7.3). El modelo tuvo que ser simplificado para hacer factible su simulación en cuestión de memoria de computadora y tiempo requerido para llevar a cabo las simulaciones.



*Imagen 42.* Modelado 3D de habitación en software Autodesk Revit 2017.



*Imagen 43.* Modelado 3D de habitación en software Autodesk Revit 2017, vista en sección.

El ordenador utilizado como herramienta para realizar la serie de simulaciones fue una Alienware modelo x51 R-2 con 16 GB RAM, procesador i7 a 3.8 Ghz, gráfica 2GB dedicados a 1TB de disco duro, tarjeta gráfica Nvidia GTX 760, con Sistema Operativo Windows 10.

Los principales materiales utilizados en el modelo simplificado se presentan a continuación:

Aire exterior: Aire (Moist Air - variable)

Muros: Ladrillo (Brick)

Losas: Concreto (Concrete)

Aislamiento en techo y muros: Panel de poliuretano (Polyurethane board)

Aislamiento en torre de captación: Poliestireno expandido (Expanded Polystyrene)

Torre de captación: PVC

Torre de salida: Metal (Steel)

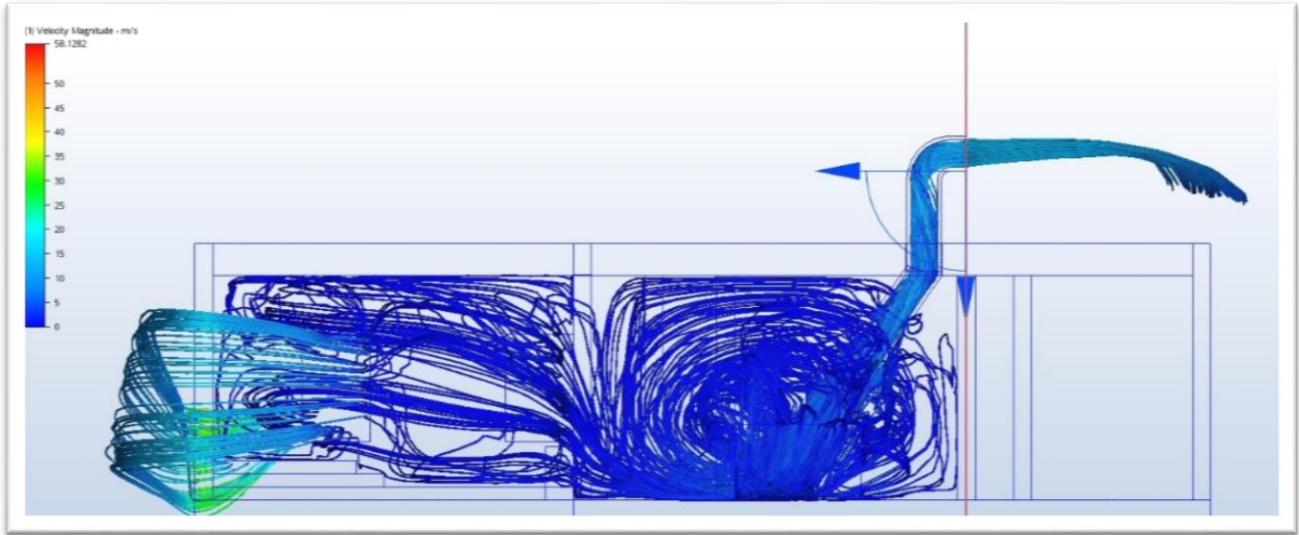
Serpentín: Cobre (Copper)

Debido a la simplificación que fue necesaria realizar al sistema no se tomó en cuenta el tratamiento térmico con el que cuentan actualmente las losas al ser aligeradas con poliestireno expandido y se consideraron solo como losas de concreto. Tampoco se consideraron las ganancias de calor por iluminación y por personas, según INIFE (2015) en calor generado por la iluminación puede ser muy variable dependiendo del tipo de iluminación con la que se cuente, y las personas habitando un espacio acondicionado pueden también producir cantidades de calor distintas dependiendo del género y edad que tengan, así como del tipo de actividad que estén realizando. Tampoco se consideraron los muebles que no son parte de la construcción, ni los efectos que pueden tener en el comportamiento de la distribución del aire y su velocidad.

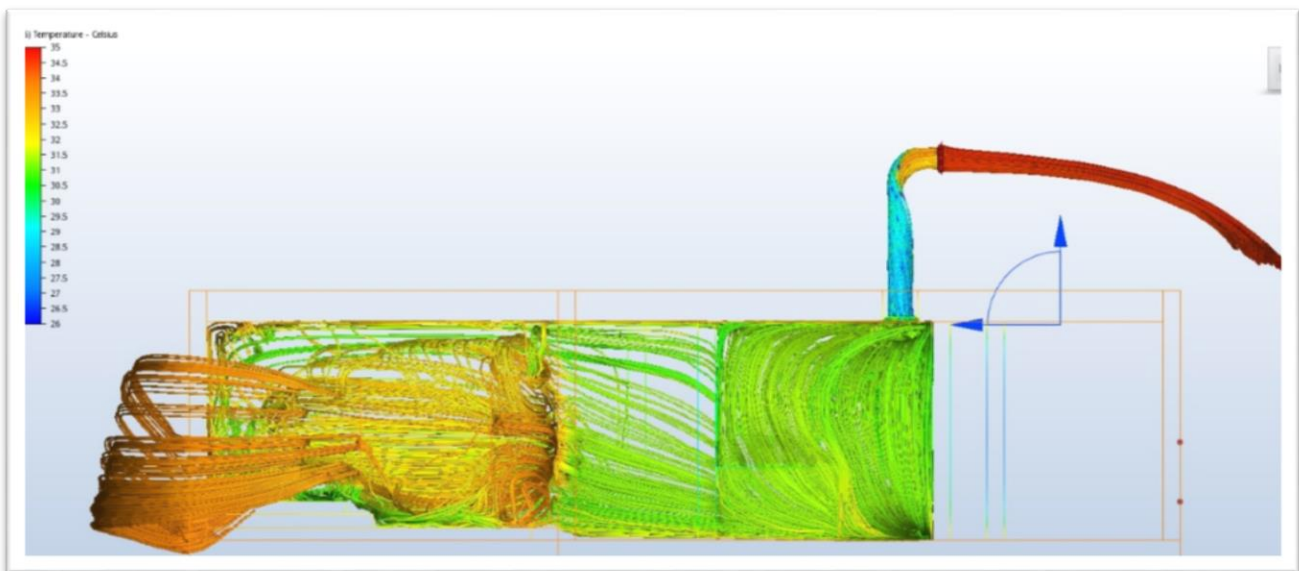
Para el desarrollo del prototipo de torre de viento se tomó como base algunas de las características de las torres de viento encontradas en la revisión documental de los antecedentes empíricos, se propuso una geometría de torre de viento base para probar su comportamiento en referencia al viento como su captación, distribución y velocidades al estar instalada en una habitación.

Las dimensiones del sistema fueron determinadas a partir de la prueba de distintas configuraciones de torre, del comportamiento del viento al momento de ser captado y de las características de la vivienda para su instalación. Durante el proceso se realizaron distintas simulaciones de prueba con diferentes combinaciones de variables como el uso de las ventanas existentes como medio de salida del aire y

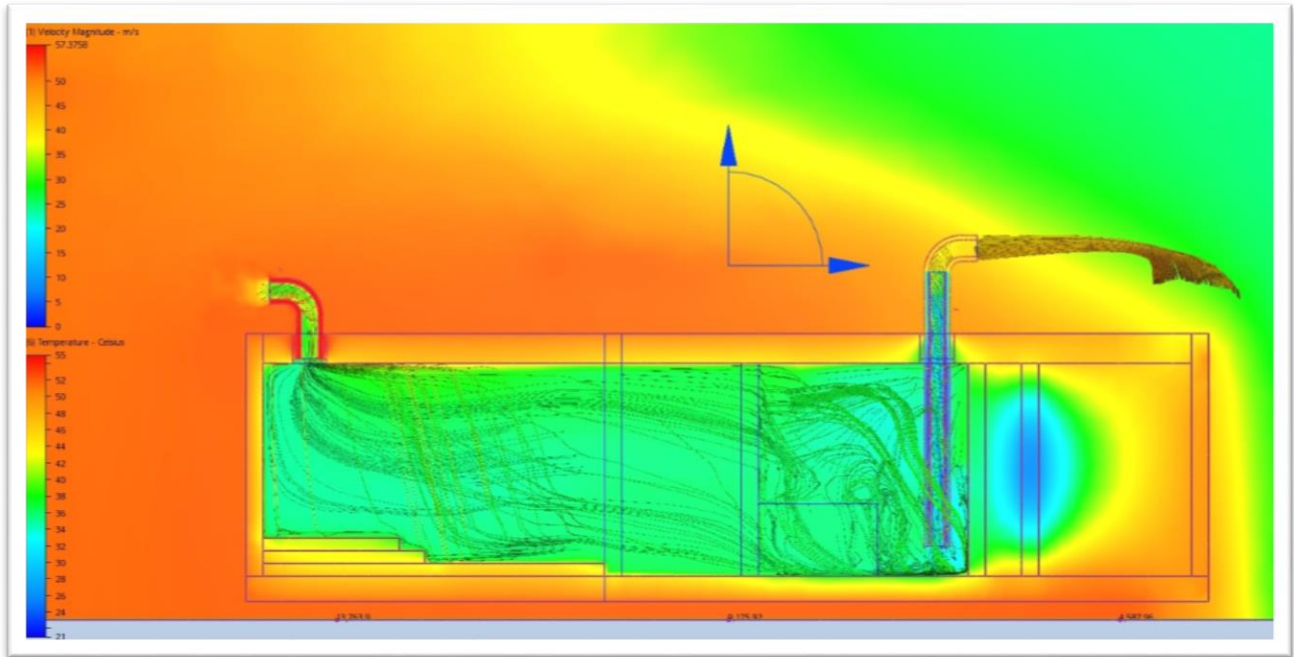
distintas alturas, tanto interiores como exterior, de la torre de captación y de la torre de salida. En las imágenes que se presentan a continuación se pueden observar algunas de estas pruebas realizadas, que fueron necesarias para lograr la configuración final propuesta.



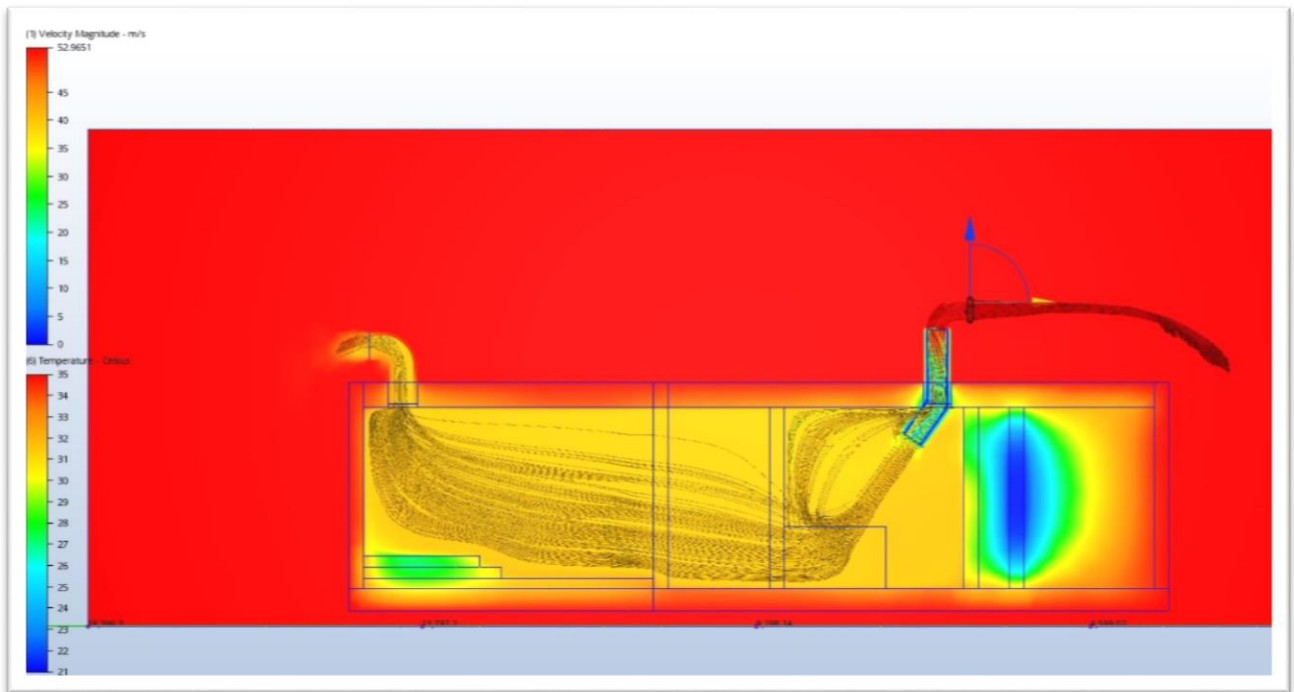
**Imagen 44.** Simulación de prueba de magnitud de velocidad con torre de captación de viento con ingreso interior angulado y ventana existente como medio de expulsión de aire.



**Imagen 45.** Simulación de prueba de temperatura con torre de captación de viento de 2 m de altura a nivel interior de lecho inferior de losa y ventana existente como medio de expulsión de aire.

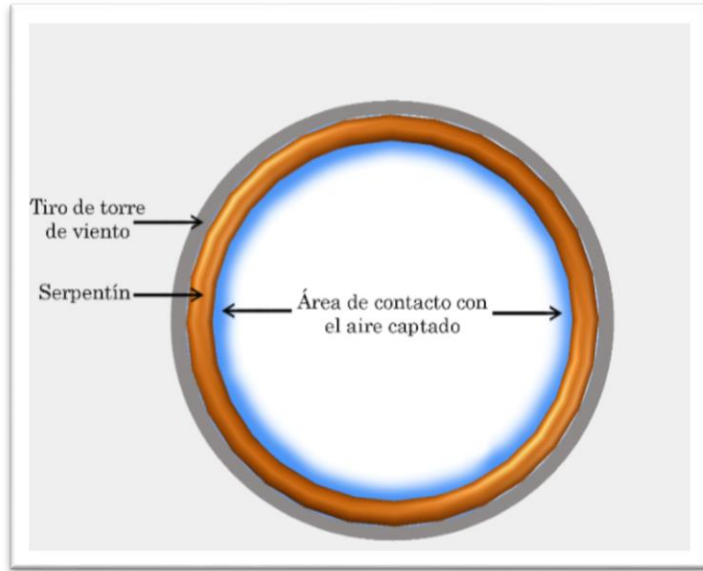


**Imagen 46.** Simulación de prueba de temperatura con torre de captación de viento de 1.2 m de altura a nivel interior de 2.2 m a partir de lecho inferior de losa y torre de 0.60 m de altura para expulsión de aire.

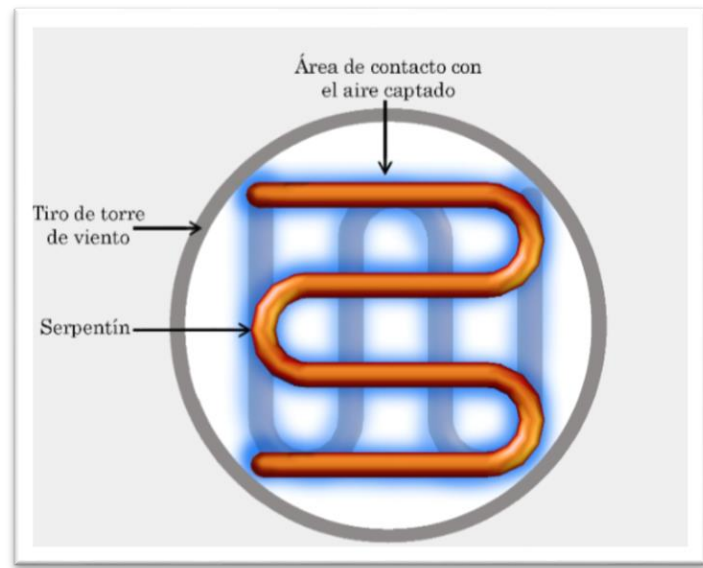


**Imagen 47.** Simulación de prueba de temperatura con torre de captación de viento de 1.2 m de altura con ingreso interior angulado y torre de 0.60 m de altura para expulsión de aire.

La torre de viento se consideró orientada hacia el suroeste, orientación que de acuerdo al análisis bioclimático es la que presenta los vientos dominantes la mayor parte del tiempo en los meses que se requiere enfriamiento. Por otro lado, para las condiciones de frontera (boundary conditions) las velocidades consideradas para las distintas simulaciones fueron 5 m/s y 2.8 m/s las cuales fueron los promedios de velocidad registrados en las diferentes estaciones meteorológicas que poseen datos acerca de la región geográfica. Además, se consideró una humedad relativa de 65% en todos los casos y temperaturas de 35°C y 38°C. La simulación se realizó considerando un estado estacionario (steady state). También se consideraron dos configuraciones distintas de serpentines de cobre, el Tipo 1 que es un serpentín que envuelve la circunferencia interior de tubo que funciona como tiro de la torre de viento con una longitud de 190 m de tubo de cobre aproximadamente, y el Tipo 2 que se distribuye por el espacio interior del tiro con una longitud de tubo 27 m. En la siguiente imagen podemos ver una representación de estos dos tipos de serpentín desde una sección en planta para entender mejor su distribución y su área de contacto con el viento que transita en el interior.

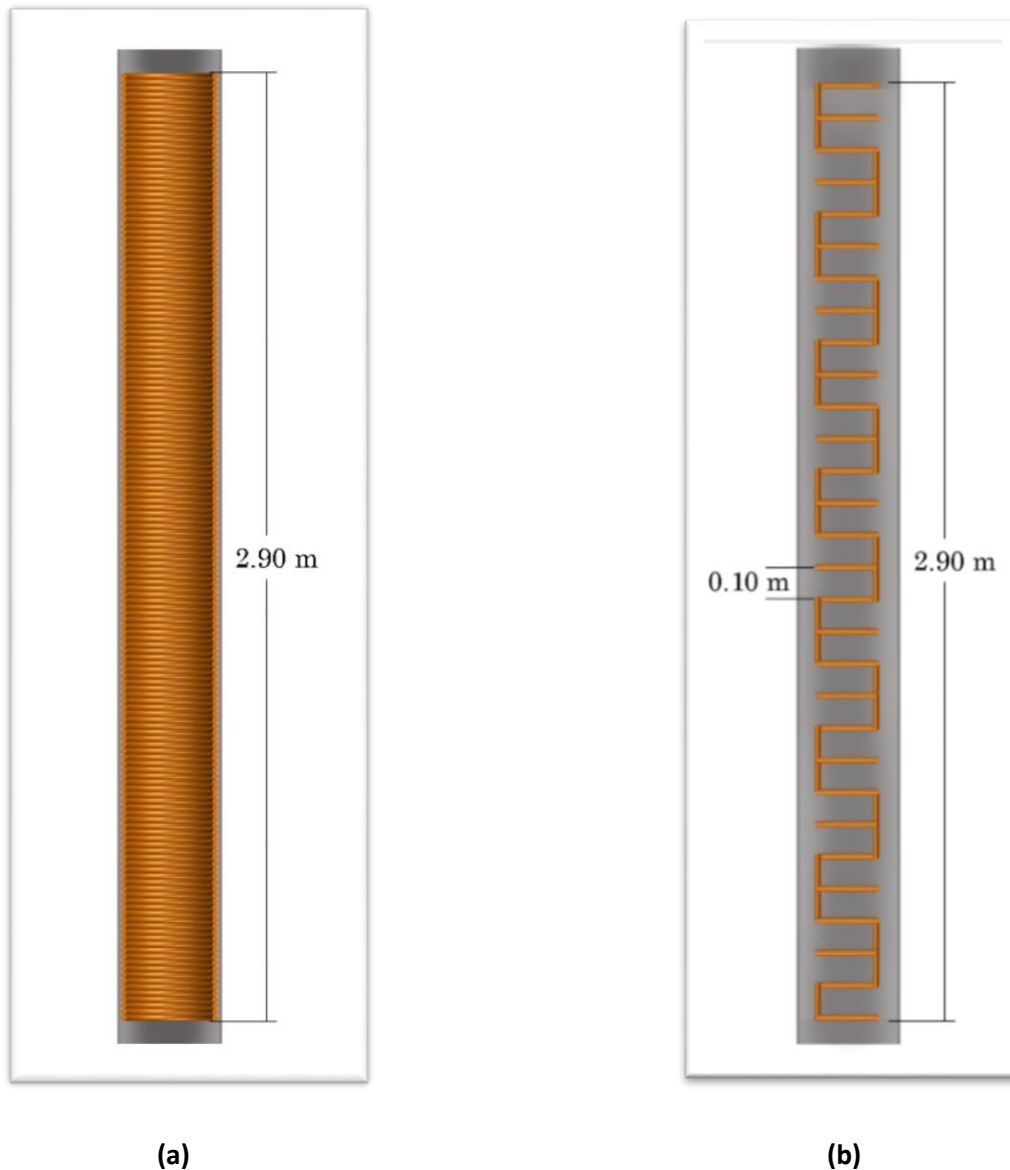


(a)



(b)

**Imagen 48.** Configuraciones de serpentín de enfriamiento vista en planta: (a) Tipo 1; (b) Tipo 2. Fuente: Elaboración propia.



**Imagen 49.** Configuraciones de serpentín de enfriamiento vista en sección: (a) Tipo 1; (b) Tipo 2. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las simulaciones se presentan con una imagen de un plano en sección transversal de la vivienda que permite ver el proceso de la circulación del aire desde que se encuentra en el exterior, circula por el interior del sistema y sale de la habitación para incorporarse nuevamente a la corriente exterior. En la primera imagen de cada simulación se presenta como plano de fondo el comportamiento del viento exterior en cuestión de velocidad, la edificación se presenta en color blanco y en colores se puede apreciar el comportamiento del viento captado en cuestión de temperatura, trayectoria y distribución. En la segunda

imagen presentada para cada simulación se puede distinguir lo edificado en una vista de estructura alámbrica (wireframe) que permite ver sólo las líneas de contorno, y en color el comportamiento del viento en materia de velocidad del viento, trayectoria y distribución. Es importante considerar las velocidades internas que se alcancen pues, según Sosa Griffin (1999), la velocidad máxima aceptable del aire en el interior de un espacio es de 2.5 m/s, se considera así para evitar cambios bruscos de temperatura corporal y que se lleguen a volar papeles u otros objetos, lo que puede ser molesto para los usuarios.

Se presentan a continuación 11 simulaciones como resultado de una aproximación empírica gradual y del tiempo disponible para su realización.

No. Simulación	Temperatura exterior		Velocidad del viento exterior		Configuración de serpentín		Radiación		Aislamiento				Temperatura interior (°C)			Vel. viento interior
	°C		2.8 m/s	5 m/s	1	2	Activa	Inactiva	En techo	En muros	En torre	Sin ais.	Máx.	Mín.	Predominante	Promedio (m/s)
1	35			X	X		X					X	35	31	32	1.5
2	35		X		X		X					X	34	30	31	0.75
3	35			X		X		X				X	29	25	27	1
4	35		X			X		X				X	30	26	28	0.75
5	35			X		X		X			X		31	24	27	1
6	35		X			X		X			X		34	26	30	0.5
7	35			X		X		X	X		X		30	26	28	1
8	35		X			X		X	X		X		35	27	30	1
9	35			X		X		X	X	X	X		26	23	24.5	0.5
10	35		X			X		X	X	X	X		26.5	24	25.5	0.5
11	38		X			X		X	X	X	X		27.5	25	26.5	0.5

**Tabla 7.** Simulaciones, características y resultados.

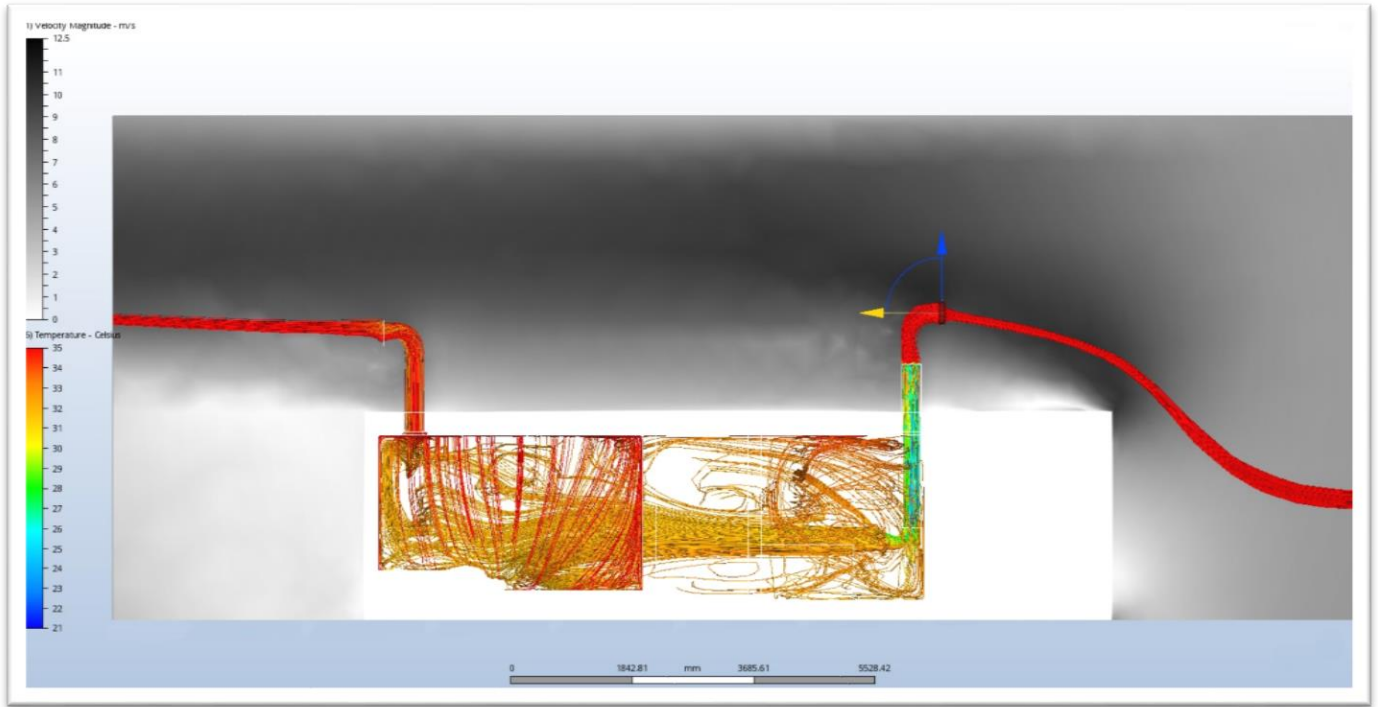
## Simulación #1

Esta simulación contó con las siguientes limitantes y condiciones de frontera:

- Velocidad del viento exterior de: 5 m/s.
- Temperatura exterior: 35°C
- Humedad relativa: 65%
- Configuración de serpentín: Tipo 1
- Radiación con datos de la ciudad de Los Mochis: Activa
- Aislamiento: Sin aislamiento

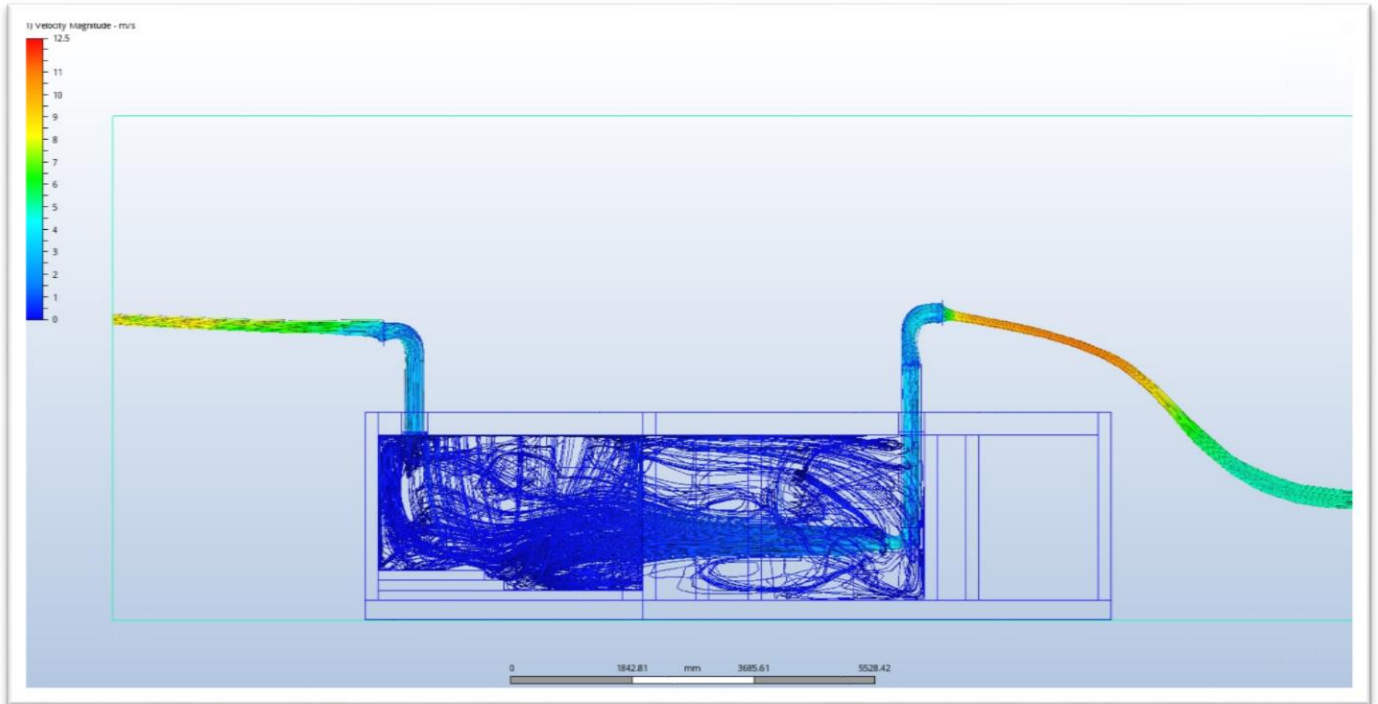
En los resultados de la simulación graficados en la siguiente imagen, en el plano de magnitud de velocidad (en escala de grises) se pueden identificar las velocidades más altas representadas en los tonos más oscuros, entre más negro es mayor la velocidad del viento exterior por lo que los tonos más cercanos al negro son los más deseables de captar.

Los resultados obtenidos referentes a las temperaturas logradas al interior del espacio habitable se encuentran entre 31°C y 35°C, pudiéndose reconocer los 32°C como la temperatura predominante de las corrientes de aire, lógicamente las temperaturas más frescas se encuentran en las áreas más cercanas al ingreso del aire al interior proveniente de la torre de captación y las más elevadas en el lado opuesto de la habitación y por lo tanto cerca de la salida al exterior. Aunque se alcanza una reducción de temperatura de aproximadamente 3°C se mantiene por encima de los rangos de confort que se delimitaron con un límite superior de 28°C para considerarlo como confort térmico.



**Imagen 50.** Simulación #1, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.

De acuerdo a los resultados obtenidos para las velocidades de viento alcanzados al interior del espacio habitable, se presentan velocidades de entre 0 m/s y 3 m/s, entrando con mayor velocidad y perdiéndola conforme se distribuye en el espacio, adquiriendo un poco de velocidad nuevamente para su expulsión. El área cercana al ingreso del aire puede verse afectada por la velocidad en la que entra, pudiendo causar incomodidad en esa parte.



*Imagen 51.* Simulación #1, Magnitud de velocidad del aire interior.

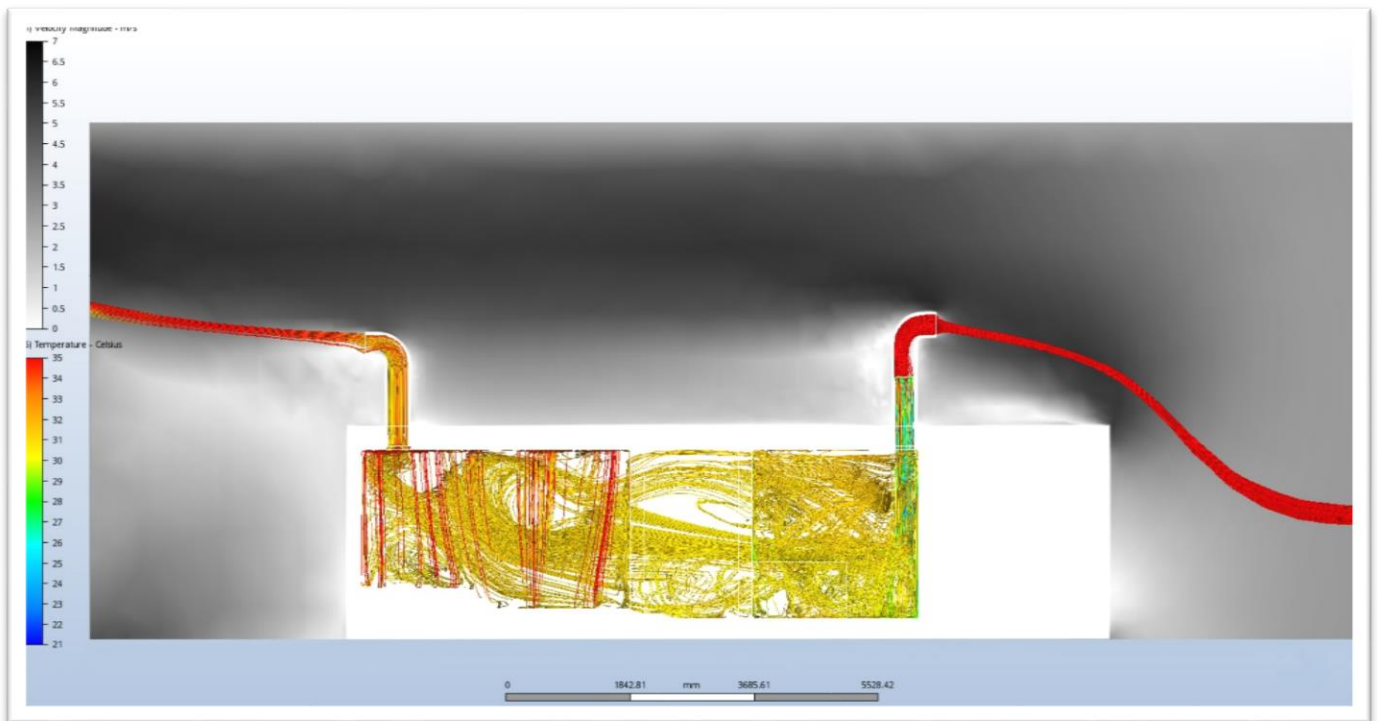
## Simulación #2

Para la segunda simulación presentada se consideraron las mismas variables utilizadas en la Simulación #1 con diferencia únicamente en la magnitud de velocidad del viento exterior a captar:

- Velocidad del viento exterior de: 2.8 m/s.
- Temperatura exterior: 35°C
- Humedad relativa: 65%
- Configuración de serpentín: Tipo 1
- Radiación con datos de la ciudad de Los Mochis: Activa
- Aislamiento: Sin aislamiento

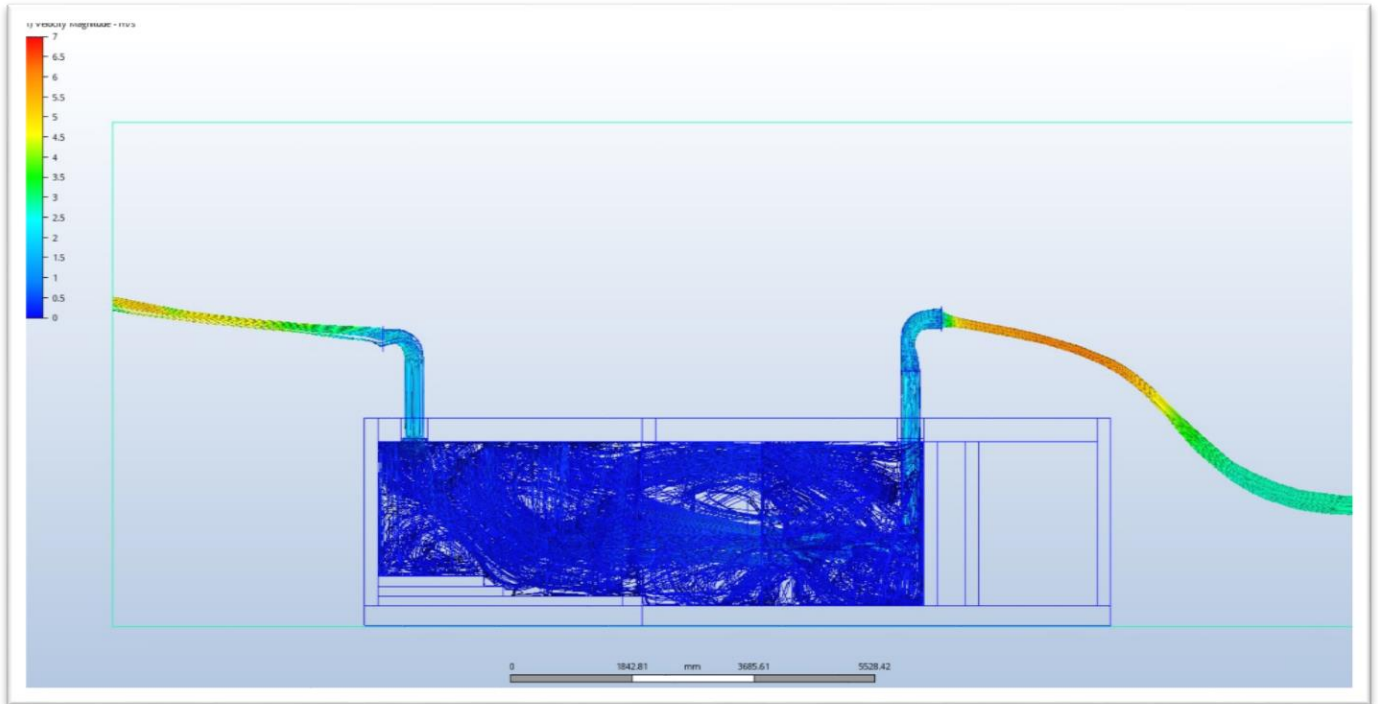
Los resultados obtenidos referentes a las temperaturas logradas al interior del espacio habitable se encuentran entre 30°C y 34°C, pudiéndose reconocer los 31°C como la temperatura predominante de las corrientes de aire. Se logra distinguir una diferencia de temperatura entre la primera mitad del espacio y

la segunda más cercana a la salida. En este caso las temperaturas se mantienen también por encima de los 28°C.



**Imagen 52.** Simulación #2, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.

En este caso se aprecian velocidades interiores entre 0 y 1.5 m/s, dentro de los límites para que no cause incomodidad a los usuarios que habiten el espacio.



**Imagen 53.** Simulación #2, Magnitud de velocidad del aire interior.

Para estas dos primeras simulaciones los resultados demuestran que, aunque el sistema logra reducir aproximadamente 3 grados la temperatura interior de la exterior a los 35°C con los materiales utilizados con poca masa térmica, sin ningún tipo de aislamiento, y principalmente, por la configuración del serpentín “Tipo 1”, no es suficiente para alcanzar temperaturas de confort interior. Tal vez el sistema podría ser utilizado en un rango de temperaturas exteriores menos elevadas.

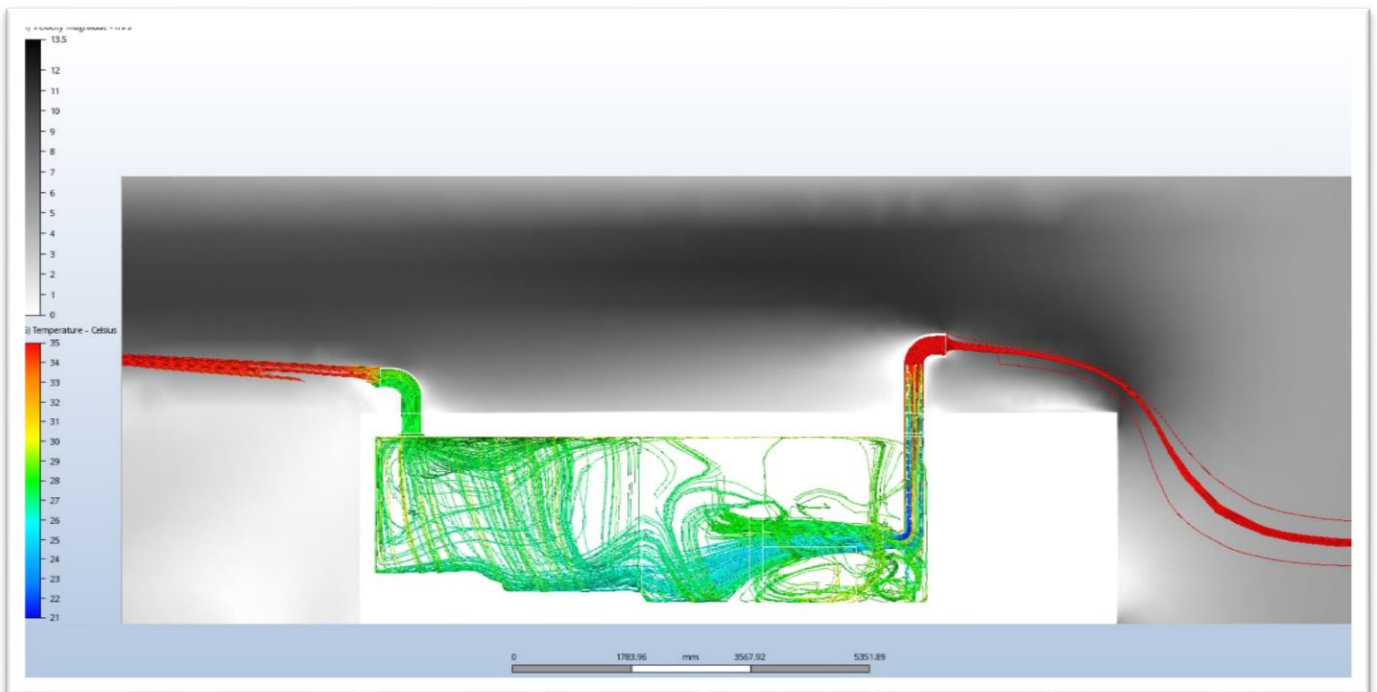
Al obtener estos resultados se consultó con el Mtro. Ing. José Eduardo Briceño acerca de una configuración de serpentín que fuera más eficiente en el enfriamiento del aire que ingresa, y se optó utilizar el serpentín “Tipo 2” para el resto de las simulaciones realizadas.

### Simulación #3

Para esta simulación se tomaron las mismas variables de la Simulación #1 con las únicas diferencias en la configuración del serpentín que en este caso es de tipo 2 (Ver imágenes 38 y 39) y en que la radiación solar no fue considerada.

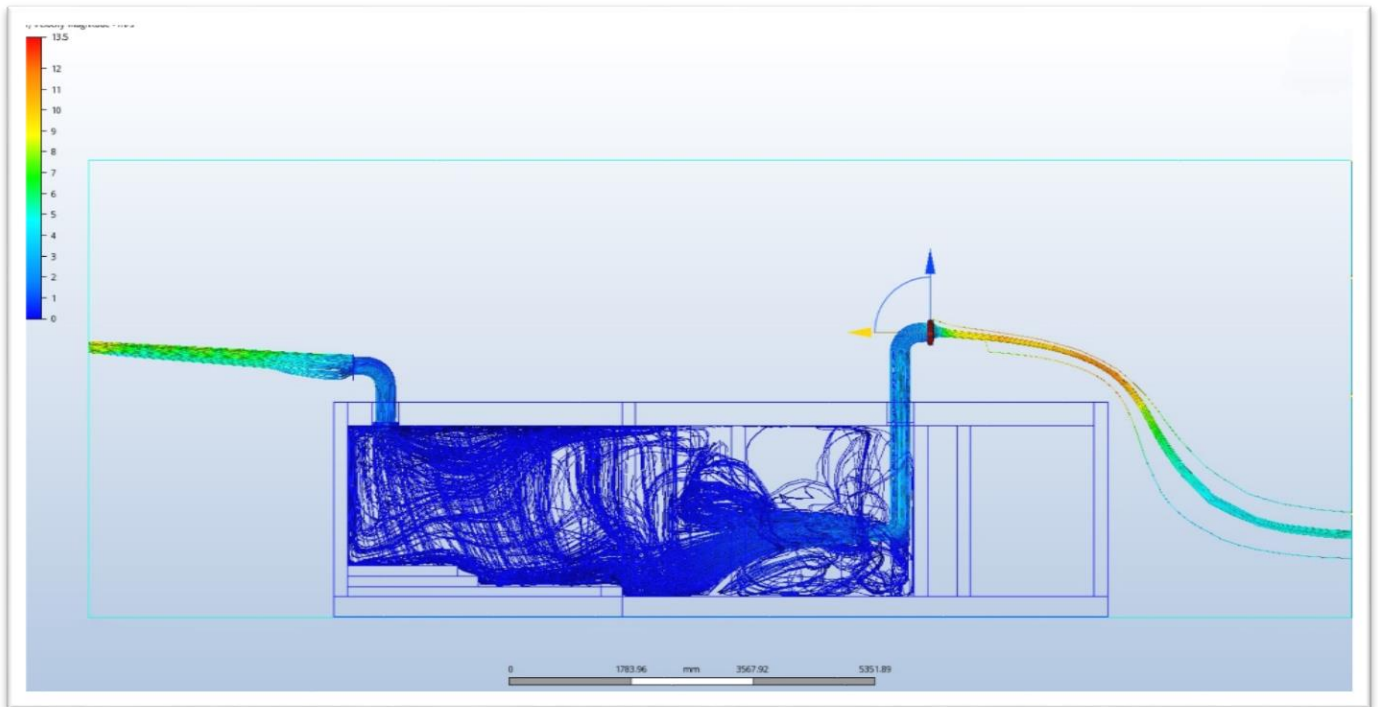
- Velocidad del viento exterior de: 5 m/s.
- Temperatura exterior: 35°C
- Humedad relativa: 65%
- Configuración de serpentín: Tipo 2
- Radiación con datos de la ciudad de Los Mochis: Inactiva
- Aislamiento: Sin aislamiento

De acuerdo a los resultados de la simulación las temperaturas logradas al interior se encuentran entre 25°C y 29°C, pudiéndose reconocer los 27°C como la temperatura predominante de las corrientes al interior.



**Imagen 54.** Simulación #3, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.

Las velocidades alcanzadas al interior se encuentran entre 0 y 2 m/s.



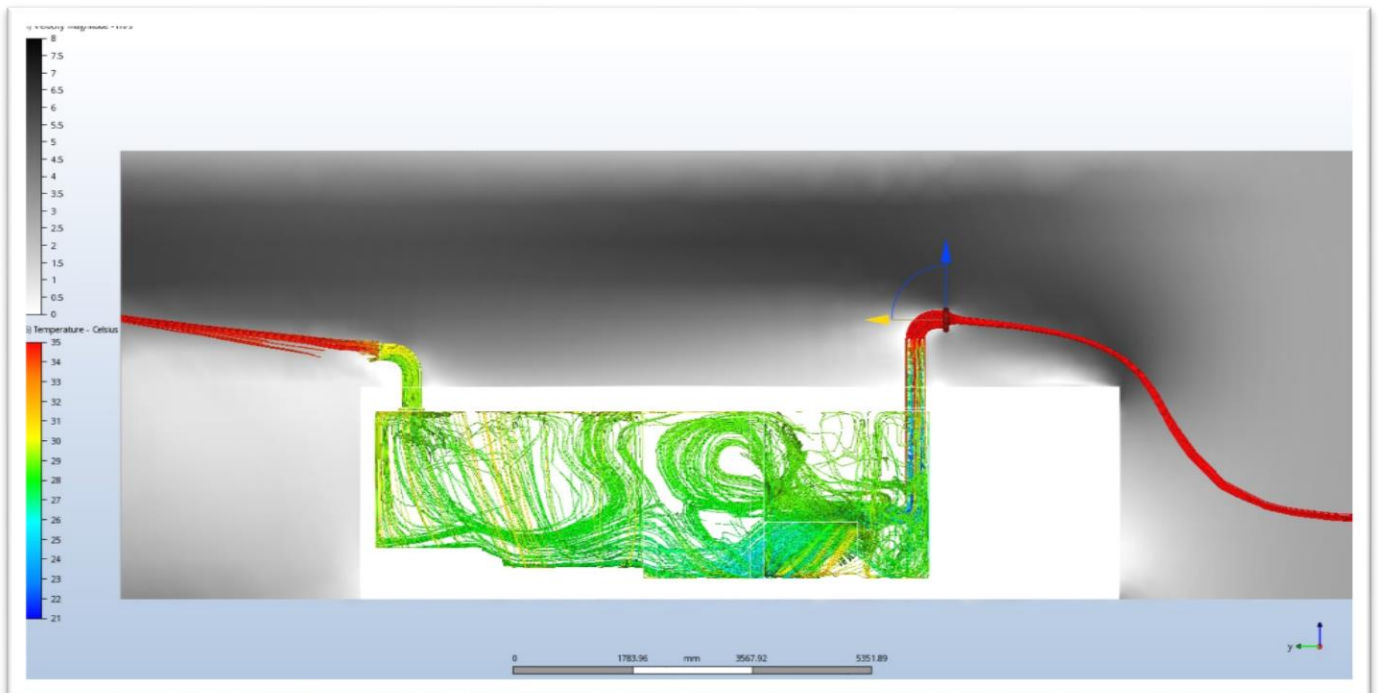
*Imagen 55.* Simulación #3, Magnitud de velocidad del aire interior.

#### **Simulación #4**

Esta simulación se llevó a cabo con las mismas condiciones de la simulación anterior (#3) tampoco consideró la radiación solar en el sitio. La única condicionante que cambió fue la velocidad del viento exterior que en este caso fue de 2.8 m/s.

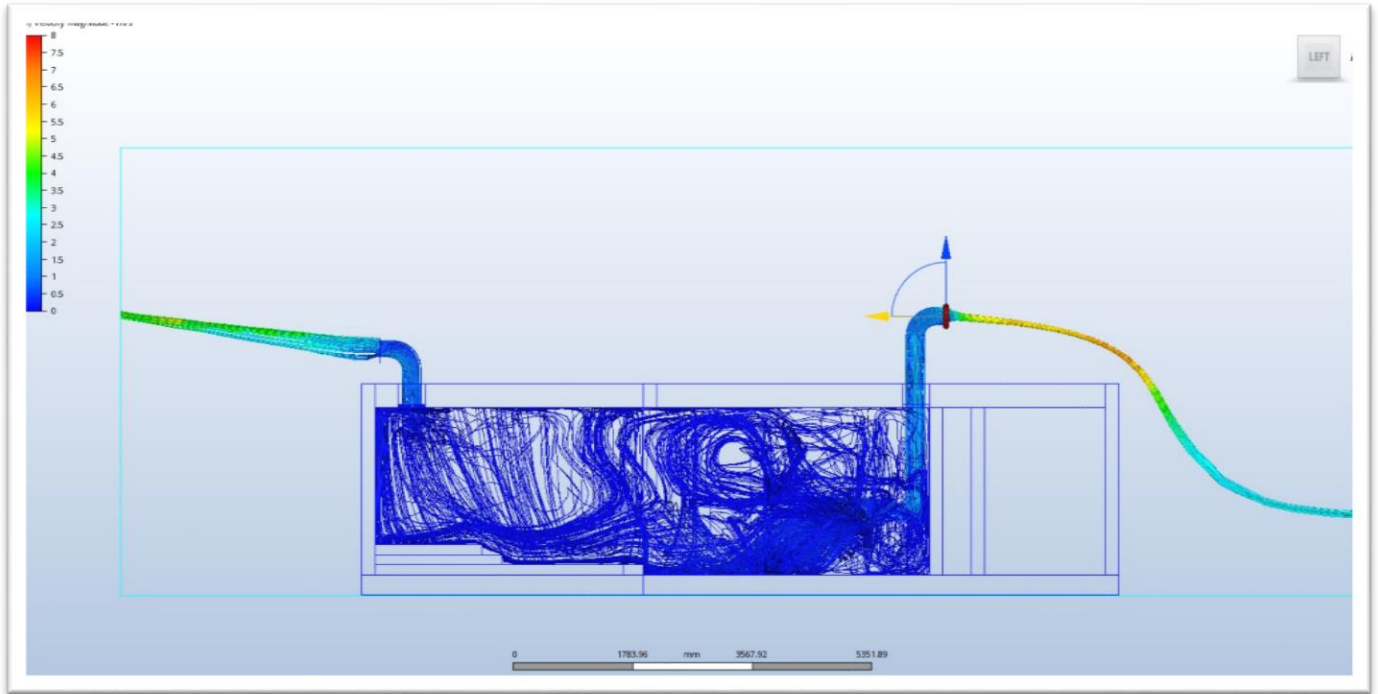
- Velocidad del viento exterior de: 2.8 m/s.
- Temperatura exterior: 35°C
- Humedad relativa: 65%
- Configuración de serpenteo: Tipo 2
- Radiación con datos de la ciudad de Los Mochis: Inactiva
- Aislamiento: Sin aislamiento

Los resultados obtenidos en cuanto a temperaturas logradas al interior se encuentran entre 26°C y 30°C, con una temperatura predominante de 28°C como la temperatura predominante en el interior. En este caso la temperatura logra alcanzar los límites del confort térmico en su temperatura predominante y se presentan 1°C por debajo de la Simulación #3.



**Imagen 56.** Simulación #4, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.

Por otro lado, podemos identificar que los vientos que originalmente transitan a una velocidad de 2.8 m/s pero se ven afectados directamente con la geometría de la edificación (esto sucede en todas las simulaciones), modificando su velocidad y su trayectoria, de acuerdo a la imagen se puede notar que las velocidades interiores no superan los 1.5 m/s y la distribución interior no es lineal sino que se presenta como un flujo turbulento.



*Imagen 57.* Simulación #4, Magnitud de velocidad del aire interior.

Las simulaciones #3 y #4 al no considerar la radiación solar no están contemplando la ganancia de calor que se puede tener como consecuencia de este factor, solamente lidian con el calor exterior, algo que no sucede en la realidad, pero sirve para entender mejor el funcionamiento del sistema y el comportamiento de viento y la temperatura, y poder hacer comparaciones más adelante.

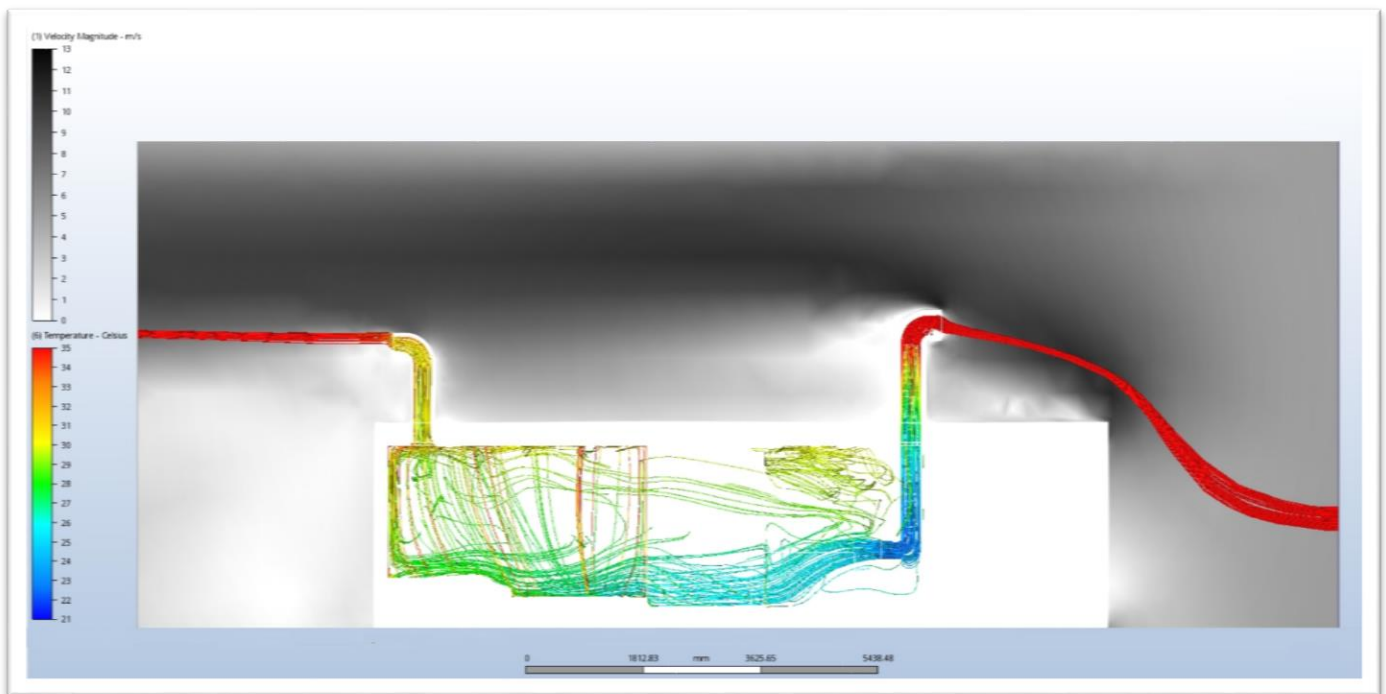
### **Simulación #5**

Para la simulación que se presenta a continuación sólo consta de aislamiento en la torre de captación de viento que se encuentra expuesta al exterior, se realizó con una velocidad del viento exterior de 5 m/s y contemplando la radiación solar.

- Velocidad del viento exterior de: 5 m/s.
- Temperatura exterior: 35°C
- Humedad relativa: 65%

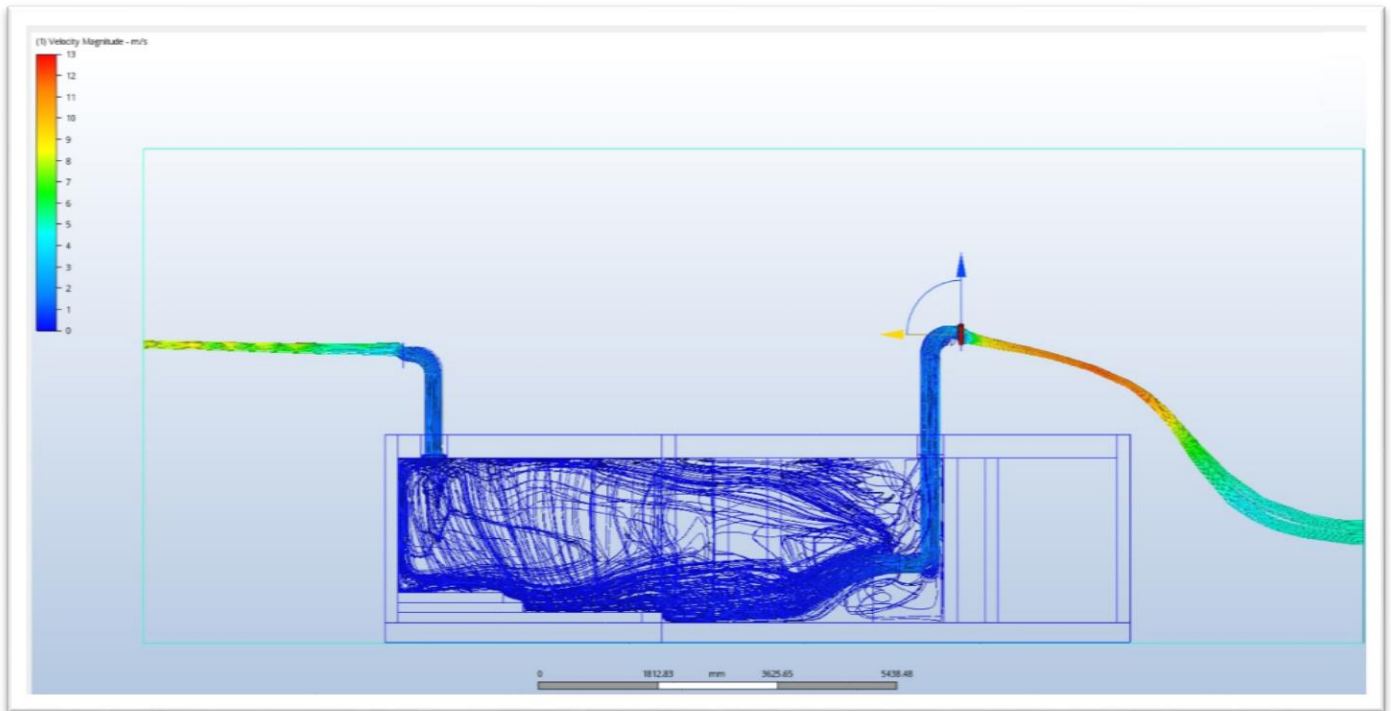
- Configuración de serpentín: Tipo 2
- Radiación con datos de la ciudad de Los Mochis: Activa
- Aislamiento: Aislamiento exterior en torre de captación

Esta simulación logra resultados de temperatura de entre 24°C y 31°C, el cambio de temperatura del flujo a lo largo de su trayectoria es muy marcado, por lo que cuesta más definir una temperatura predominante, pero en este caso, la temperatura predominante ronda los 27°C. En la primera mitad del espacio, la más cercana al ingreso del aire enfriado se identifica a 26°C, en la segunda parte del espacio, del lado opuesto, la temperatura ronda los 28°C. Las temperaturas más elevadas que superan los 28°C se localizan en la parte superior del espacio, esto puede deberse a que el aire caliente tiende a subir y a que la losa del techo no cuenta con ningún tipo de aislamiento y el interior del espacio está ganando calor por ese medio.



**Imagen 58.** Simulación #5, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.

La velocidad del viento interior no supera los 2 m/s.



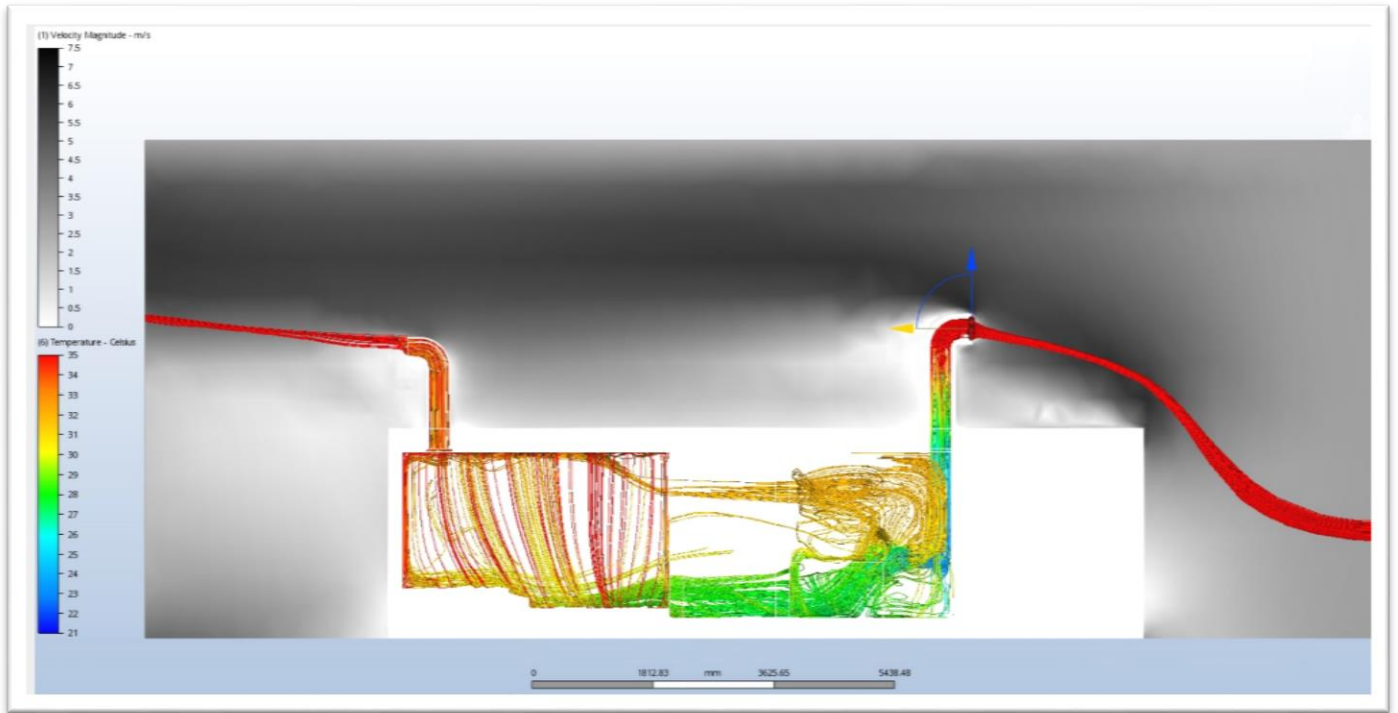
*Imagen 59.* Simulación #5, Magnitud de velocidad del aire interior.

## Simulación #6

La siguiente simulación presentada consideró la radiación solar y cuenta con aislamiento en la torre de captación de viento que se encuentra expuesta al exterior, pero fuera de eso no se consideró más aislamiento para el resto del modelo, se realizó con una velocidad del viento exterior de 2.8 m/s, todas las demás variables se repiten con el resto de las simulaciones como se describe a continuación:

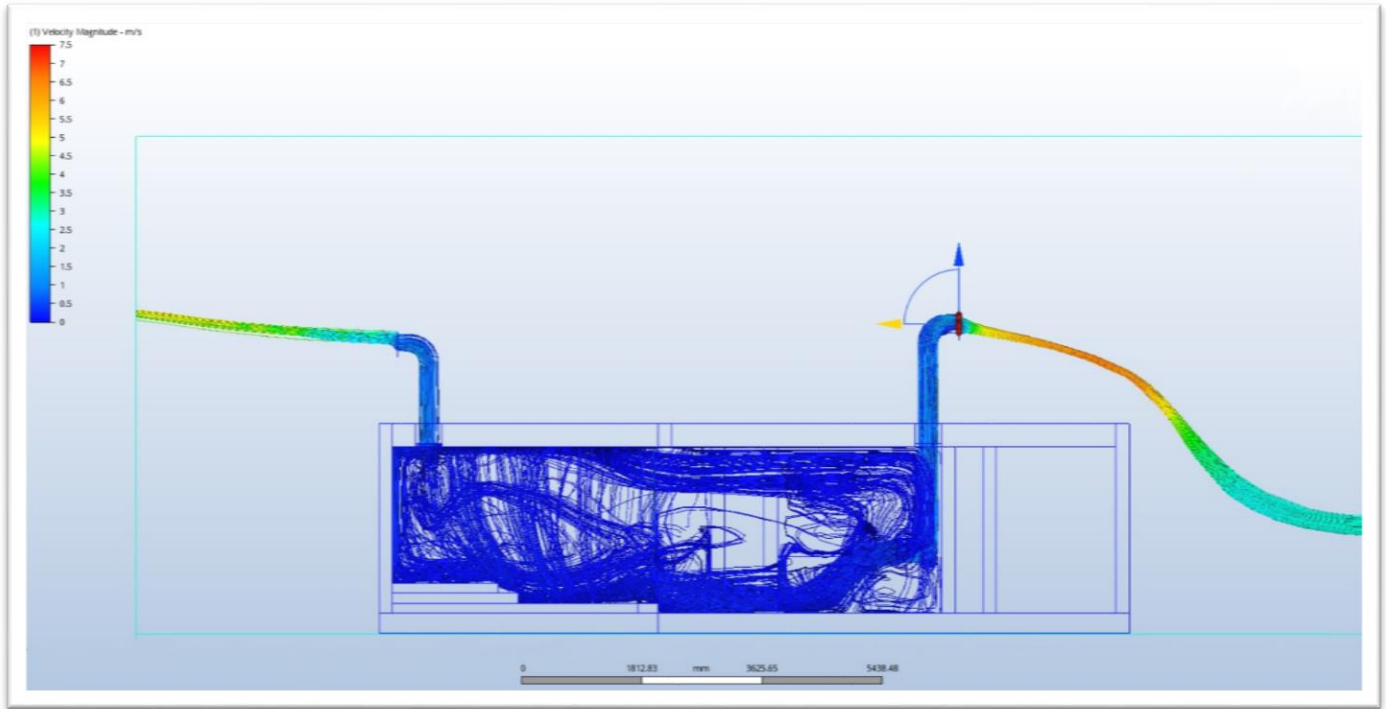
- Velocidad del viento exterior de: 2.8 m/s.
- Temperatura exterior: 35°C
- Humedad relativa: 65%
- Configuración de serpentín: Tipo 2
- Radiación con datos de la ciudad de Los Mochis: Activa
- Aislamiento: Aislamiento exterior en torre de captación

Los resultados obtenidos en cuanto a temperaturas logradas al interior se encuentran entre 26°C y 34°C, la temperatura predominante en la parte baja de la habitación es de 29°C y en la parte alta es de 31°C, las diferencias de temperatura se encuentran muy zonificadas, pero la temperatura promedio sería de 30°C.



**Imagen 60.** Simulación #6, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.

En esta simulación las temperaturas alcanzadas son bastante uniformes en todo el interior del espacio presentándose con una velocidad aproximada de 0.5 m/s.



*Imagen 61.* Simulación #6, Magnitud de velocidad del aire interior.

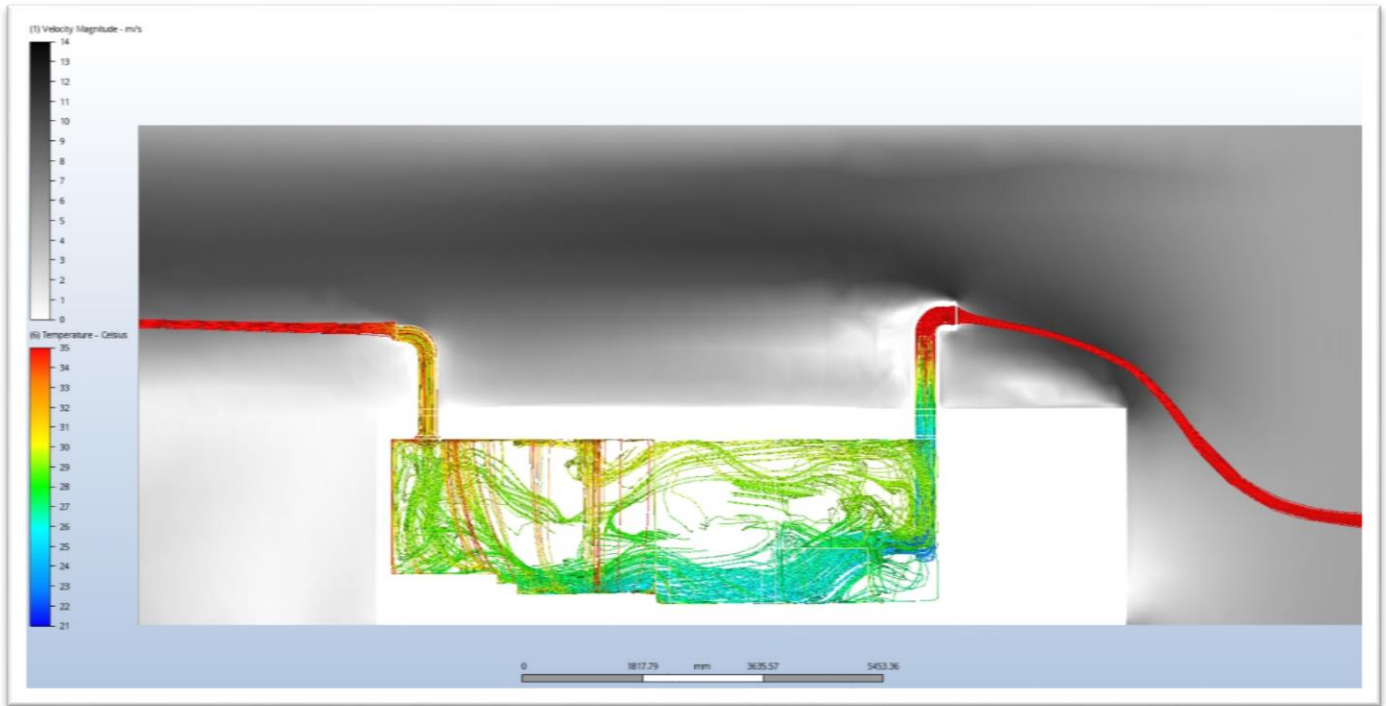
### Simulación #7

Para esta simulación se consideraron las siguientes variables:

- Velocidad del viento exterior de: 5 m/s.
- Temperatura exterior: 35°C
- Humedad relativa: 65%
- Configuración de serpentín: Tipo 2
- Radiación con datos de la ciudad de Los Mochis: Activa
- Aislamiento: Aislamiento exterior en torre de captación y en techo.

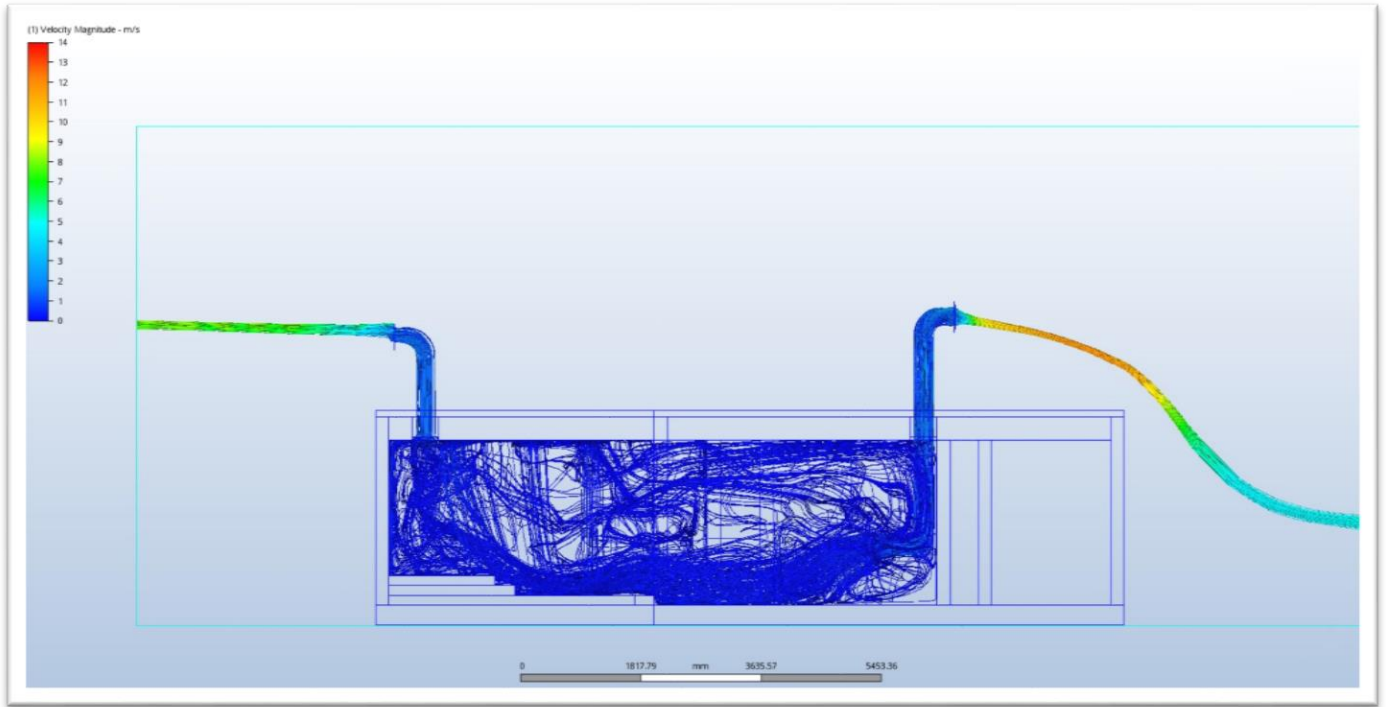
En este caso las condicionantes fueron prácticamente las mismas que la simulación #5 con la diferencia que se agregó un aislamiento en el techo.

Como resultado presenta temperaturas del espacio habitable entre 26°C y 30°C, con una velocidad predominante de 27°C en la parte inferior y 29°C en la parte superior. La temperatura promedio es de 28°C al límite de los rangos de confort.



**Imagen 62.** Simulación #7, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.

En esta simulación las temperaturas alcanzadas son bastante uniformes en todo el interior del espacio presentándose con una velocidad aproximada de 1 m/s.



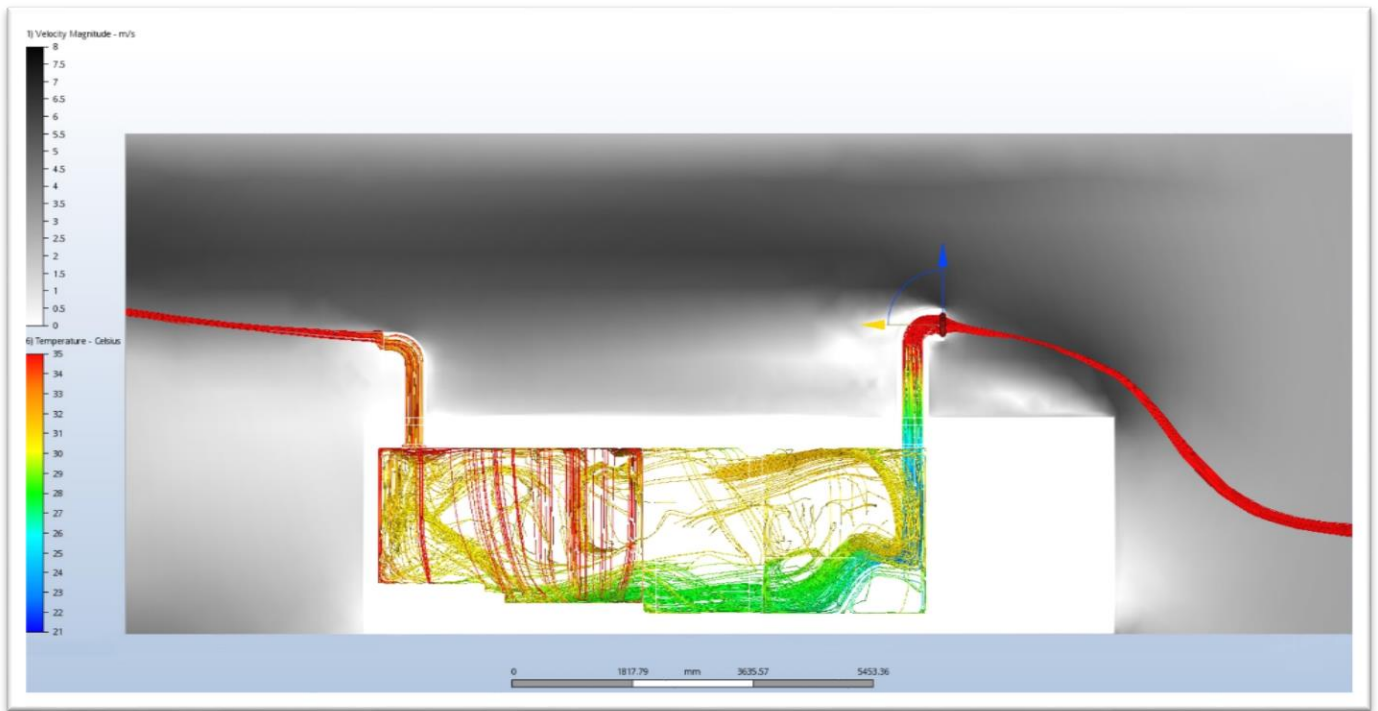
*Imagen 63.* Simulación #7, Magnitud de velocidad del aire interior.

### **Simulación #8**

La siguiente simulación presentada consideró la radiación solar y cuenta con aislamiento en la torre de captación de viento que se encuentra expuesta al exterior y aislamiento en techo, se realizó con una velocidad del viento exterior de 2.8 m/s, todas las demás variables se repiten con el resto de las simulaciones como se describe a continuación:

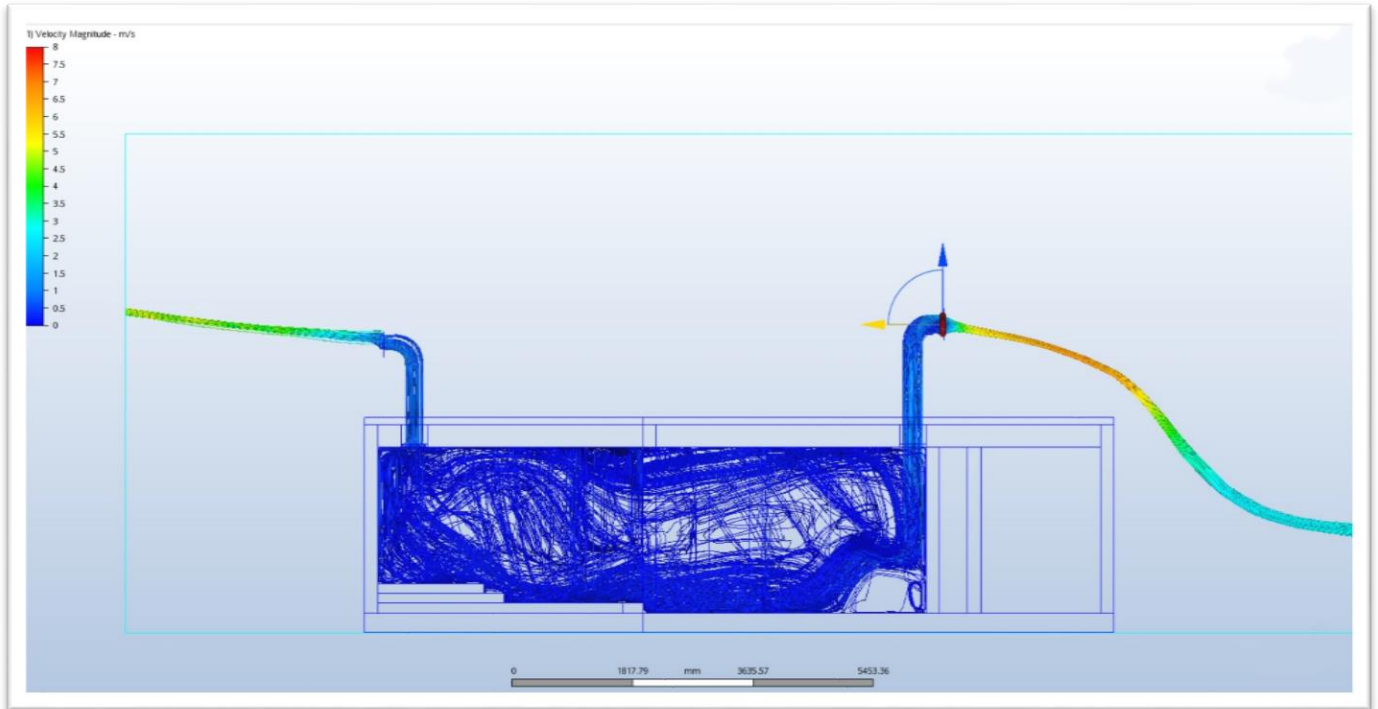
- Velocidad del viento exterior de: 2.8 m/s.
- Temperatura exterior: 35°C
- Humedad relativa: 65%
- Configuración de serpentín: Tipo 2
- Radiación con datos de la ciudad de Los Mochis: Activa
- Aislamiento: Aislamiento exterior en torre de captación y techo.

Los resultados obtenidos en cuanto a temperaturas logradas al interior se encuentran entre 27°C y 35°C, la temperatura promedio sería de 31°C. En el espacio se identifican zonas muy definidas con diferentes temperaturas estando sólo la zona más cercana al ingreso de aire dentro de la zona de confort.



**Imagen 64.** Simulación #8, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.

En esta simulación las temperaturas alcanzadas son bastante uniformes en todo el interior del espacio presentándose con una velocidad aproximada de 1 m/s.



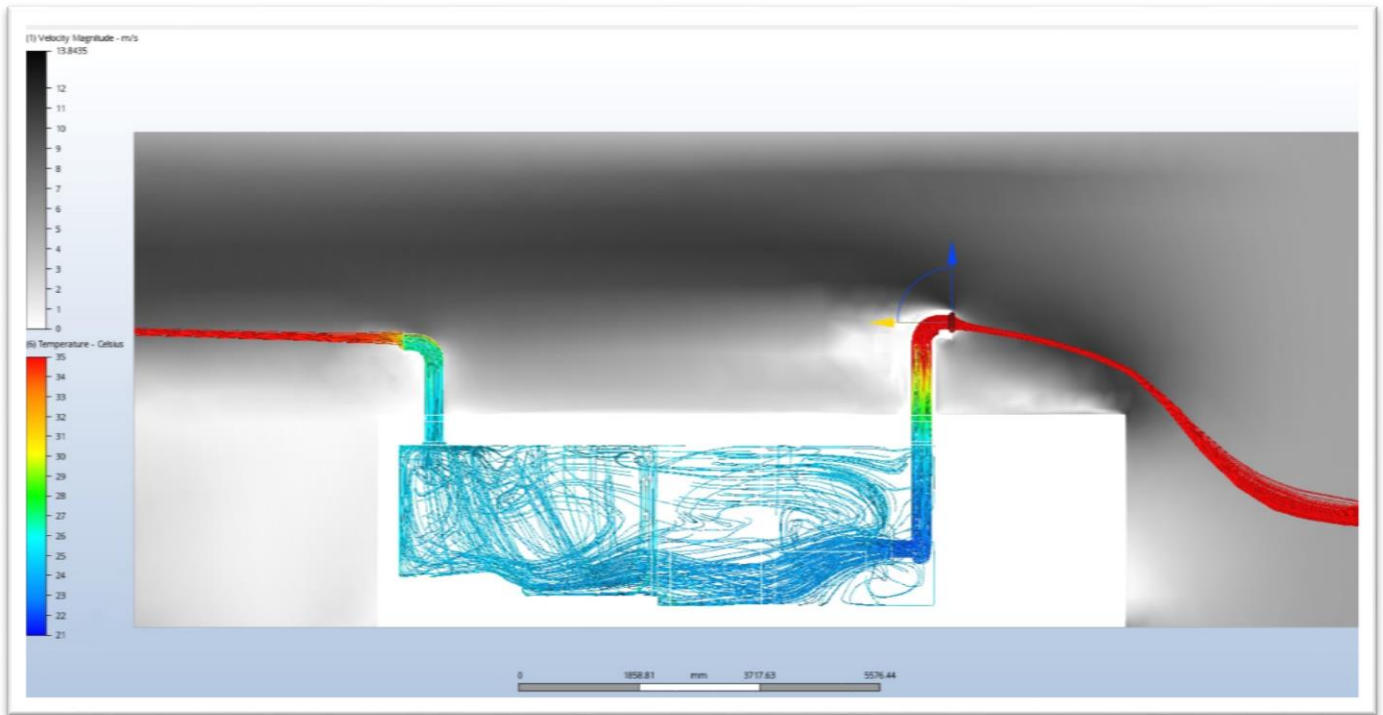
*Imagen 65.* Simulación #8, Magnitud de velocidad del aire interior.

### **Simulación #9**

La siguiente simulación presentada también consideró la radiación solar, aislamiento en la torre de captación de viento que se encuentra expuesta al exterior, aislamiento en techo y aislamiento en muros expuestos, se realizó con una velocidad del viento exterior de 5 m/s, las demás variables se repiten con el resto de las simulaciones como se describe a continuación:

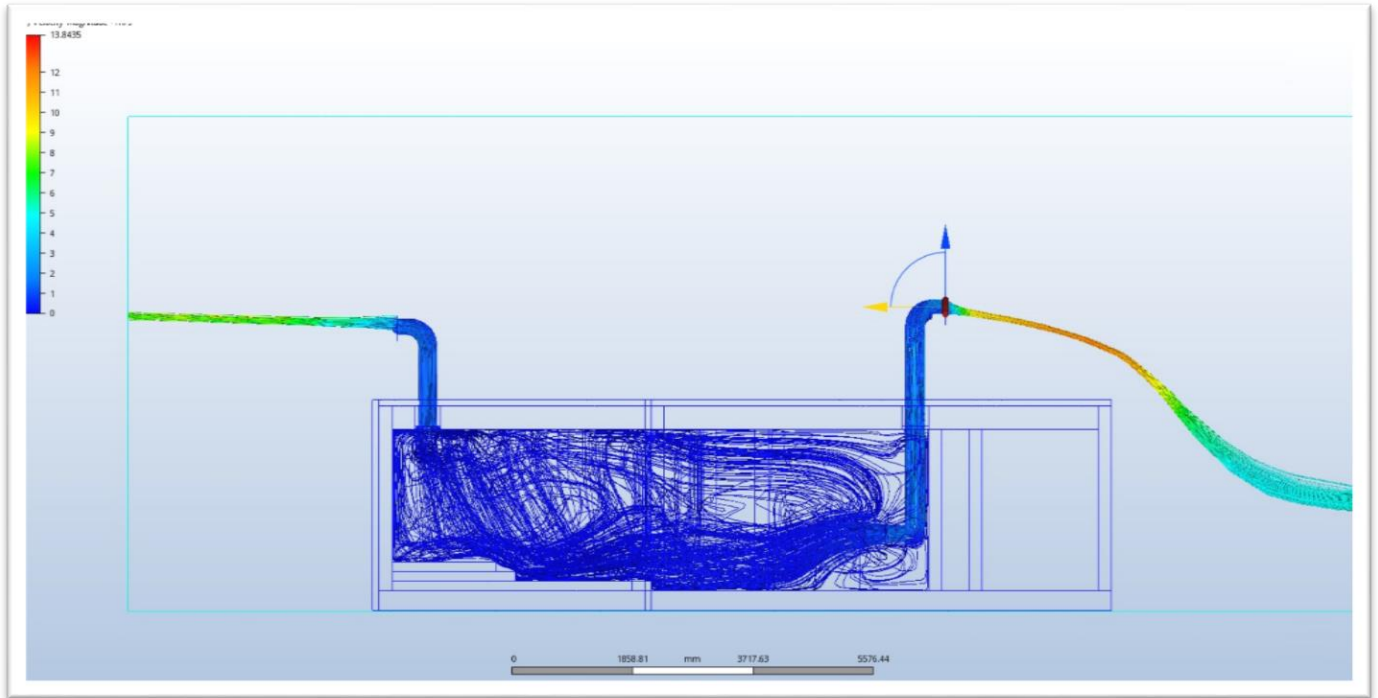
- Velocidad del viento exterior de: 5 m/s.
- Temperatura exterior: 35°C
- Humedad relativa: 65%
- Configuración de serpentín: Tipo 2
- Radiación con datos de la ciudad de Los Mochis: Activa
- Aislamiento: Aislamiento exterior en torre de captación, techo y muros expuestos.

Los resultados obtenidos en cuanto a temperaturas logradas al interior se encuentran entre 23°C y 26°C, la temperatura promedio y predominante sería de 24.5°C. La variación de temperatura es mucho menor que en las simulaciones anteriores y las temperaturas más bajas. En este caso se logra un descenso de temperatura de por lo menos 9°C.



**Imagen 66.** Simulación #9, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.

En el aspecto de velocidad del viento interior, el rango se presenta bastante uniforme entre 0 y 1 m/s y la distribución del aire en el interior se extiende en prácticamente todo el espacio.



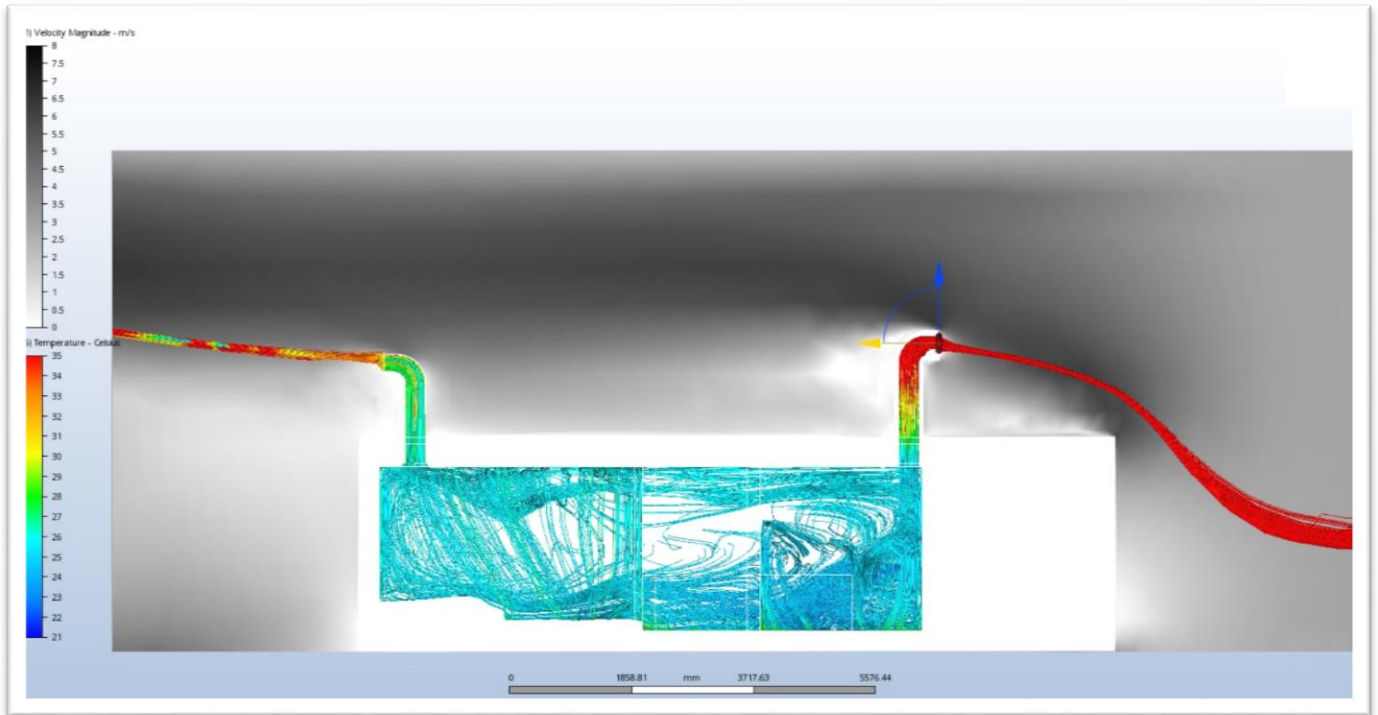
*Imagen 67.* Simulación #9, Magnitud de velocidad del aire interior.

### **Simulación #10**

La siguiente simulación presentada también consideró la radiación solar, aislamiento en la torre de captación de viento que se encuentra expuesta al exterior, aislamiento en techo y aislamiento en muros expuestos, se realizó con una velocidad del viento exterior de 2.8 m/s, las demás variables se repiten con el resto de las simulaciones como se describe a continuación:

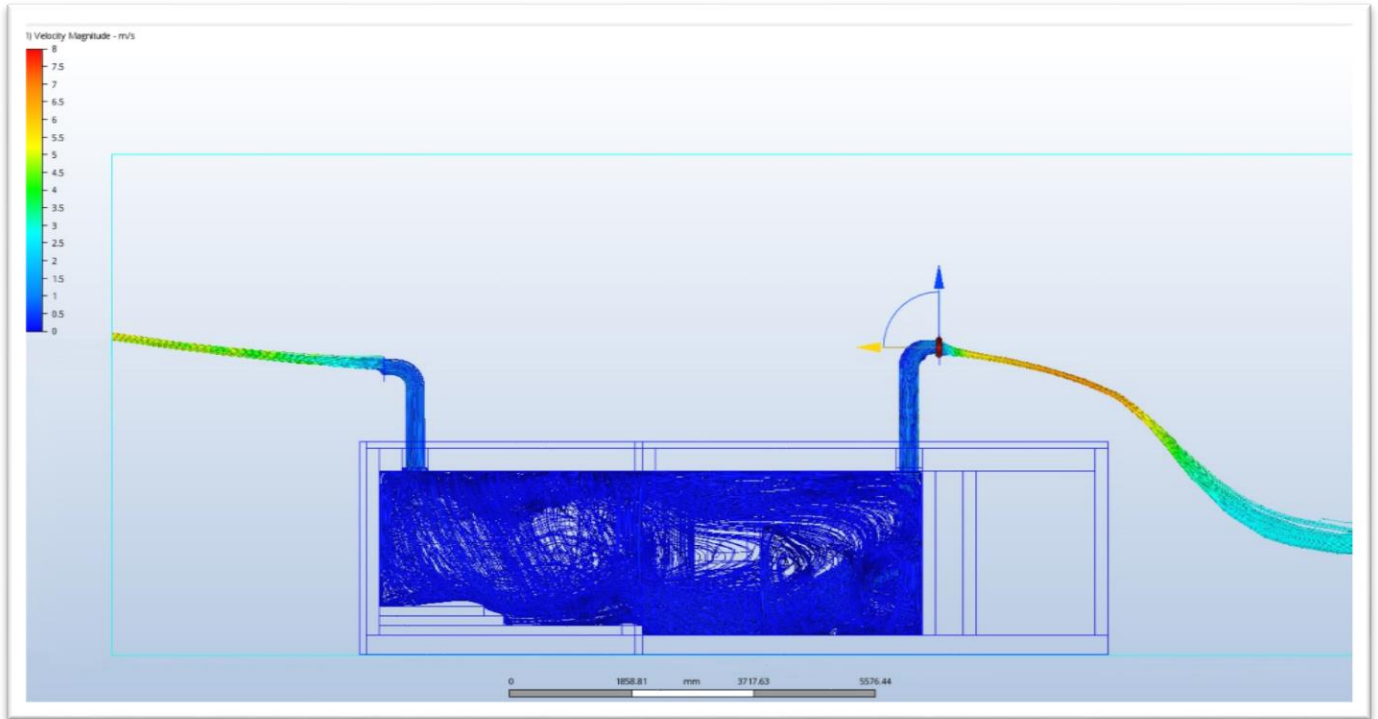
- Velocidad del viento exterior de: 2.8 m/s.
- Temperatura exterior: 35°C
- Humedad relativa: 65%
- Configuración de serpentín: Tipo 2
- Radiación con datos de la ciudad de Los Mochis: Activa
- Aislamiento: Aislamiento exterior en torre de captación, techo y muros expuestos.

Las temperaturas alcanzadas al interior, de acuerdo a la simulación, se encuentran entre 24°C y 26.5°C, la temperatura promedio y predominante sería de aproximadamente 25.5°C. En este caso se logra un descenso de temperatura de por lo menos 8.5°C.



**Imagen 68.** Simulación #10, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.

En cuanto a magnitud de velocidad del viento interior, el rango se presenta bastante uniforme aproximada de 0.5 m/s y con una distribución extendida en todo el espacio interior.



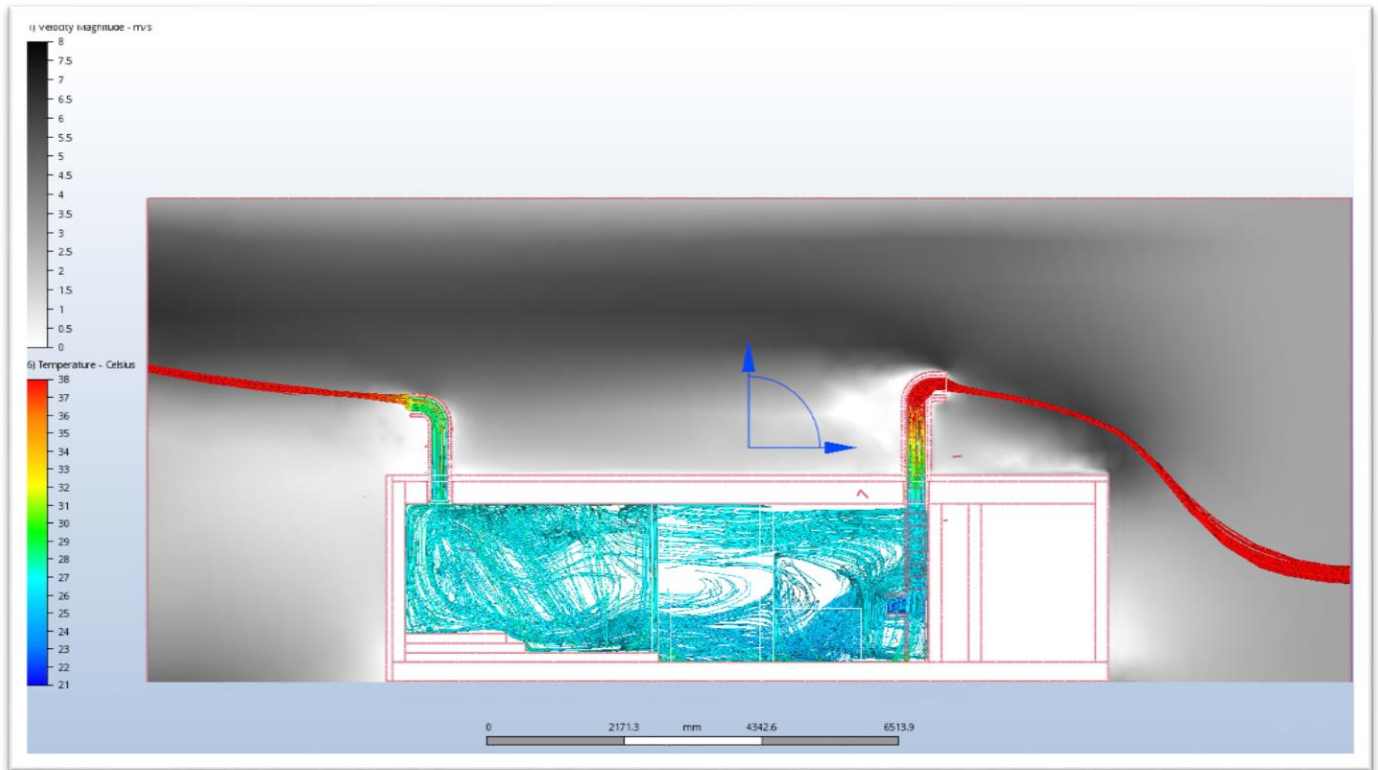
**Imagen 69.** Simulación #10, Magnitud de velocidad del aire interior.

### **Simulación #11**

La siguiente simulación presentada consideró las mismas variables de la simulación anterior, solamente con diferencia en la temperatura exterior de 38 °C, temperatura a la que rondan los promedios máximos durante el año de acuerdo al análisis bioclimático:

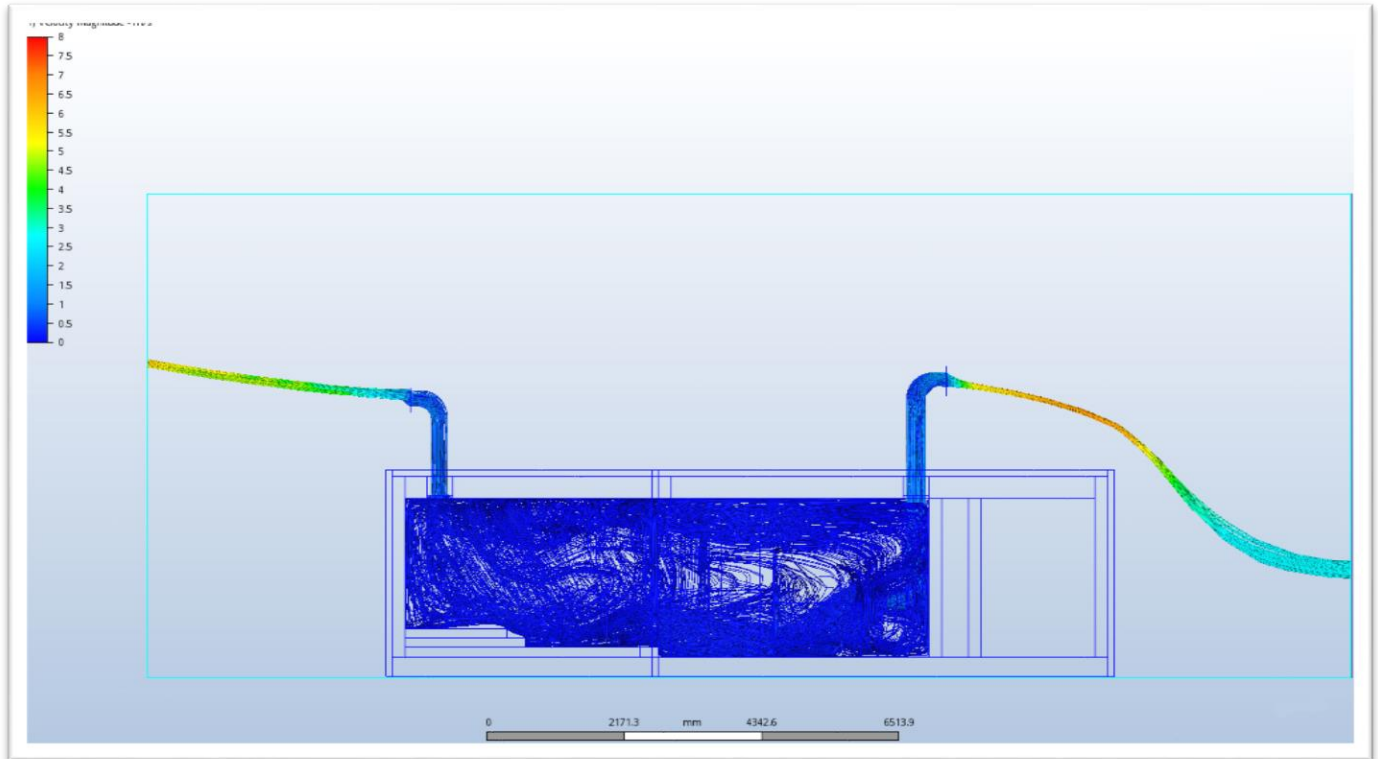
- Velocidad del viento exterior de: 2.8 m/s.
- Temperatura exterior: 38 °C
- Humedad relativa: 65%
- Configuración de serpentín: Tipo 2
- Radiación con datos de la ciudad de Los Mochis: Activa
- Aislamiento: Aislamiento exterior en torre de captación, techo y muros expuestos.

Las temperaturas alcanzadas al interior se encuentran entre 25°C y 27.5°C, la temperatura promedio y predominante sería de aproximadamente 26.5°C.



**Imagen 70.** Simulación #11, Magnitud de velocidad del viento exterior y temperatura de aire interior.

Las velocidades del viento al interior de la habitación se encuentran alrededor de 0.5 m/s como se muestra a continuación en la *Imagen 71*.



**Imagen 71.** Simulación #11, Magnitud de velocidad del aire interior.

Los resultados de las simulaciones #1 y #2 que fueron las que contemplaron una configuración de serpentín de Tipo 1 fueron las que obtuvieron la menor reducción de temperatura del aire, ya que aunque cuenta con mayor capacidad de volumen de agua en circulación, su distribución no permite que gran parte del volumen de aire, sobre todo el que pasa por el centro del tiro de la torre, tenga contacto con el serpentín, propiciando que sólo el aire que pasa cercano al perímetro logre perder calor, por lo tanto, se puede deducir que esta configuración limita la eficiencia del serpentín y aumenta los costos tanto del material para construirlo debido a que requiere mayor cantidad como de su uso ya que es un volumen de agua mayor que requiere ser puesto en movimiento.

En cuanto a las velocidades de aire exterior manejadas, que fueron de 2.8 m/s y 5 m/s, las diferencias en los resultados de temperatura interior alcanzada, en las simulaciones con las mismas variables determinadas, tienen una variación de aproximadamente 1 °C, por lo que podríamos suponer que, por lo menos en este rango de velocidades exteriores, no existe una diferencia muy significativa en la eficiencia del sistema.

La mayor diferencia en los resultados se presentó en lo referente a las ganancias de calor por radiación. Las simulaciones que no contemplaron este factor (#3 y#4) no se pueden considerar como resultados factibles ya que, de acuerdo a los resultados, la radiación solar juega un papel importante en el sobrecalentamiento de los espacios que no se puede omitir en el planteamiento de un sistema de enfriamiento de espacios interiores. En cambio, las mayores pérdidas de calor interior fueron alcanzadas por las simulaciones que presentaron mayor cantidad de aislamiento. En ese caso se tuvo que considerar, además de aislamiento en techo, aislamiento en muros ya que la habitación simulada cuenta con la desventaja de tiene la mayor área de sus fachadas expuestas, sin vecino colindante que lo proteja de la radiación solar y la intemperie. Para el caso de una habitación con colindancias no se necesitaría más que el aislamiento en techo.

## 4.6. Factibilidad y validación

### 4.6.1. Consumo energético y emisiones de GEI de Sistema de enfriamiento híbrido de torre de viento.

Para el funcionamiento adecuado del sistema propuesto se requiere el uso de una electrobomba de uso doméstico que se mantenga haciendo circular el agua por el serpentín durante el tiempo que se requiera mantener activo el sistema. El uso de este equipo representa un consumo de energía eléctrica que lo separa de los sistemas completamente pasivos. Para saber el verdadero impacto que tendría este sistema es necesario analizar el tipo de sistema que se propone para complementar el sistema de enfriamiento y así poder compararlo con un sistema totalmente activo como el de los aires acondicionados comunes.

La habitación cuenta con un área a enfriar de 20 m<sup>2</sup>, para determinar la capacidad que debe de tener un equipo de aire acondicionado común para este espacio específico, de acuerdo a Granados (2011), en “Brújula de compras” de PROFECO, se deben considerar varios factores como el área del espacio en el que quieres utilizar el equipo, el clima, el número de usuarios, el material de construcción del espacio, la cantidad de ventanas, entre otros. Algunos fabricantes en México recomiendan utilizar la tabla que se presenta a continuación, donde consideran solamente los metros cuadrados de la habitación a enfriar y el clima del lugar de acuerdo a una clasificación de zonas en México, como guía para elegir el equipo con la capacidad adecuada. Sinaloa está clasificada en la zona 4 y de acuerdo a los metros cuadrados de la habitación requiere un equipo con una capacidad de 21,600 BTU lo que equivale a 1.8 toneladas de refrigeración, según la tabla guía lo más adecuado para la habitación en cuestión es un equipo de 2 toneladas de refrigeración ya que comercialmente los equipos se fabrican en capacidades de ½ , 1 , 1 ½ , 2 , 3, 4 y 5 toneladas de refrigeración o su equivalente en BTU.

Metros cuadrados (m <sup>2</sup> )	Zona 1 BTU	Zona 2 BTU	Zona 3 BTU	Zona 4 BTU
0 a 4	6,000	5,400	6,600	7,200
4 a 8	8,000	7,200	8,800	9,600
8 a 12	10,000	9,000	11,000	12,000
12 a 16	12,000	10,800	13,200	14,400
16 a 20	14,000	12,600	15,400	16,800
20 a 25	18,000	16,200	19,800	21,600
25 a 30	24,000	21,600	26,400	28,800

**Tabla 8.** Capacidad de aires acondicionados recomendados de acuerdo a zona climática. Fuente: Granados (2011).

Toneladas	BTU
½	6,000
1	12,000
1 ½	18,000
2	24,000

**Tabla 9.** Equivalencias entre toneladas de refrigeración y BTU. Fuente: Granados (2011).

Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	
Aguascalientes	D.F.	Baja California Sur	Baja California	Quintana Roo
Colima	Edo. De México	Guerrero	Campeche	Sinaloa
Guanajuato	Hidalgo	Oaxaca	Chiapas	Sonora
Jalisco	Michoacán	San Luis Potosí	Chihuahua	Tabasco
Nayarit	Morelos	Tamaulipas	Coahuila	Yucatán
Tlaxcala	Puebla	Veracruz	Durango	Nuevo León
Zacatecas	Querétaro			

**Tabla 10.** Estados del país de acuerdo a su zona climática para equipos de refrigeración. Fuente: Granados (2011).

Un mini Split de 2 toneladas de refrigeración marca LG tiene una potencia de 2.308 kW, y se estima que el compresor trabaja solamente un 25% del tiempo en el que el equipo está encendido, cuenta con un ventilador que es el que funciona el 100% del tiempo de uso, pero de acuerdo al Ingeniero electricista especialista en aires acondicionados, Leobardo Briceño Ayala, su consumo energético no es significativo, por lo tanto, durante una hora de uso del mini Split se tendría un consumo de 0.60 kWh. Por otro lado, pasando al análisis energético del sistema de enfriamiento de torre de viento diseñado, el serpentín propuesto tiene una capacidad de 7.7 litros de agua; al ser un volumen de agua pequeño de recircular se considera el uso de una motobomba centrífuga de una potencia de 0.25 HP equivalente a 0.18 kWh, con capacidad de bombear 113.3 litros por minuto como máximo a una altura máxima de 15.17 metros. El uso de este tipo de bomba equivale sólo al 30% del consumo y de las emisiones de GEI que generaría un mini Split como el que se mencionó anteriormente. De acuerdo a la “Calculadora de Emisiones” de SEMADET (2018) las emisiones evitadas durante un año con el uso de un sistema híbrido de enfriamiento como el propuesto, si se considera su uso de 8 horas diarias promedio durante los 6 principales meses del año donde se requiere enfriamiento, equivalen a 0.2858 TON CO<sup>2</sup> al año, al ser un sistema escalable si se utiliza para más habitaciones al mismo tiempo o para un enfriamiento generalizado el ahorro de emisiones aumentaría dependiendo del tamaño de los espacios y de los equipos de aire acondicionado que se dejen de utilizar ya que la bomba tiene capacidad para bombear mucha más agua de la que necesita una sola habitación.

#### 4.6.2. Potencial de uso del sistema de enfriamiento híbrido de torre de viento de acuerdo a temperaturas horarias.

Hasta ahora, mediante la información recopilada y el uso del programa de simulación de fluidos Autodesk CFD, los resultados obtenidos se obtuvieron con la condicionante de temperaturas exteriores máximas de 35 °C y 38 °C. De acuerdo a la tabla de Temperaturas horarias presentada en el apartado de Análisis Bioclimático, del total de horas representativas anuales cerca del 40% del tiempo en la ciudad de Los Mochis se presentan horas de sobrecalentamiento (temperaturas superiores a los 28.1 °C en la temporada de calor). Si se utilizara el sistema propuesto, suponiendo que todo el tiempo existieran corrientes de viento de por lo menos 2.8 m/s, el tiempo que se encuentra en sobrecalentamiento, de acuerdo a las simulaciones realizadas, por lo menos hasta 38 °C podría ser mitigado.

Otro factor por tomar en cuenta es que, de acuerdo al análisis de viento, la región cuenta con un porcentaje de calmas de alrededor de 50%, esto quiere decir que la mitad del tiempo no hay viento, por otro lado, cuando se registra la mayor actividad del viento durante el día es a partir de mediodía, cuando se presentan las temperaturas más altas debido a la acción del sol, lo cual beneficia a la utilización del sistema de torre de viento.

#### 4.6.3. Potencial de ahorro de energía eléctrica.

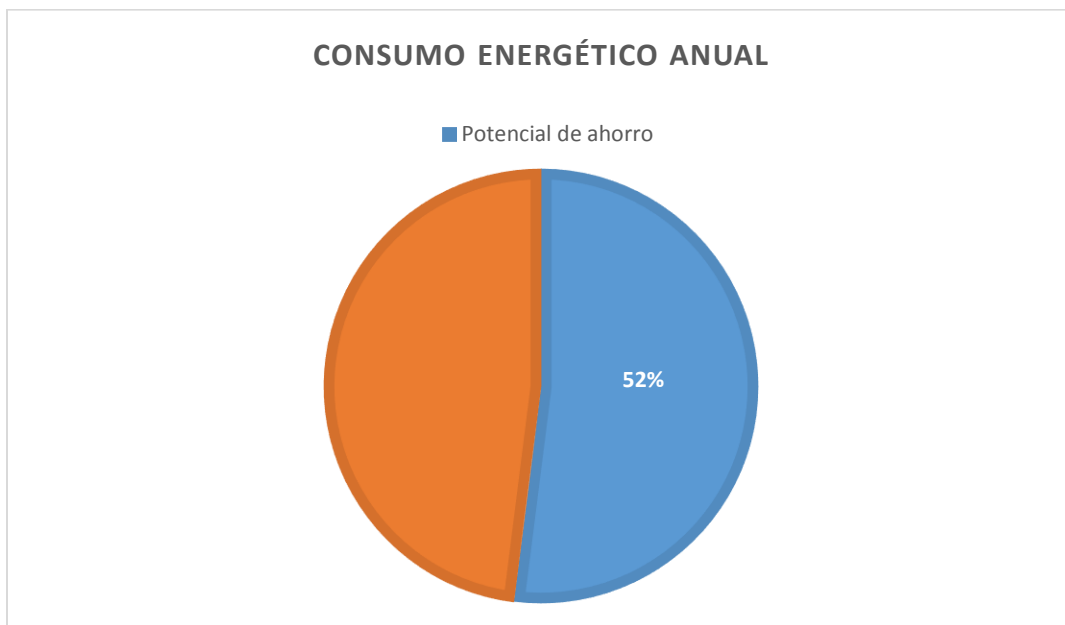
A continuación, se presenta una tabla del consumo de energía eléctrica de la vivienda de estudio a lo largo de un año, los datos presentados son del año 2017. Si relacionamos la gráfica anterior de temperaturas horarias y la tabla de consumo energético podemos ver que existe una relación directa entre el comportamiento térmico ambiental y el consumo de energía eléctrica en la vivienda. Los meses que se pueden identificar una mayor cantidad de horas de sobrecalentamiento coinciden con los meses de mayor consumo de energía, este periodo comprende de abril a octubre.

El promedio de consumo de energía eléctrica durante los meses que no se presentan horas de sobrecalentamiento es de 286 kWh. Si este consumo se mantuviera durante todos los meses el consumo anual sería de aproximadamente 3432 kWh, lo que nos hace suponer que la cantidad de 3696 kWh restantes del consumo real anual de 7128 kWh se le puede atribuir mayormente a la climatización de la vivienda. Durante el 2017 el precio que se pagó por este sobreconsumo fue cerca de \$1,656, parece no ser un precio muy alto a pagar a cambio de los beneficios de pasar la temporada de calor en confort térmico, pero el costo real de producción de esa energía está muy lejos de la cifra pagada. Esta accesibilidad al uso de la energía eléctrica se debe solamente al subsidio gubernamental, en caso de que este no existiera el uso de la energía eléctrica para fines de enfriamiento interior se limitaría para muchas personas. De acuerdo con la información recopilada durante este trabajo la desaparición de los subsidios gubernamentales a la energía eléctrica no es una loca idea poco probable de suceder, de hecho, se ha planteado en numerosas ocasiones su desaparición por los costos que representa y para abrirle las puertas al sector privado, por lo que de pagar \$7,500 anuales a pasar a pagar \$29,950 (más el 16% de IVA) puede suceder en cualquier momento no muy lejano impactando la economía de muchas familias.

Periodo	Consumo (kWh)	Costo de producción (\$)	Precio (\$)	Aportación Gubernamental (\$)
Dic 16 - Ene 17	290	1,224.06	500.00	792.91
Ene 17 - Feb 17	281	1,232.25	471.00	826.32
Feb 17 - Mar 17	266	1,260.50	422.00	896.60
Mar 17 - Abr 17	266	1,244.35	422.00	880.45
Abr 17 - May 17	402	1,744.82	289.00	1,495.80
May 17 - Jun 17	542	2,308.98	406.00	1,958.39
Jun 17 - Jul 17	1096	4,560.67	874.00	3,807.88
Jul 17 -Ago 17	977	4,006.97	758.00	3,340.57
Ago 17 - Sep 17	1120	4,538.31	893.00	3,768.09
Sep 17 - Oct 17	1132	4,614.39	893.00	3,835.46
Oct 17 - Nov 17	429	1,834.63	952.00	1,014.00
Nov 17 - Dic 17	327	1,380.23	620.00	845.41
<b>Total anual</b>	<b>7128</b>	<b>29,950.16</b>	<b>7,500.00</b>	<b>23,461.88</b>

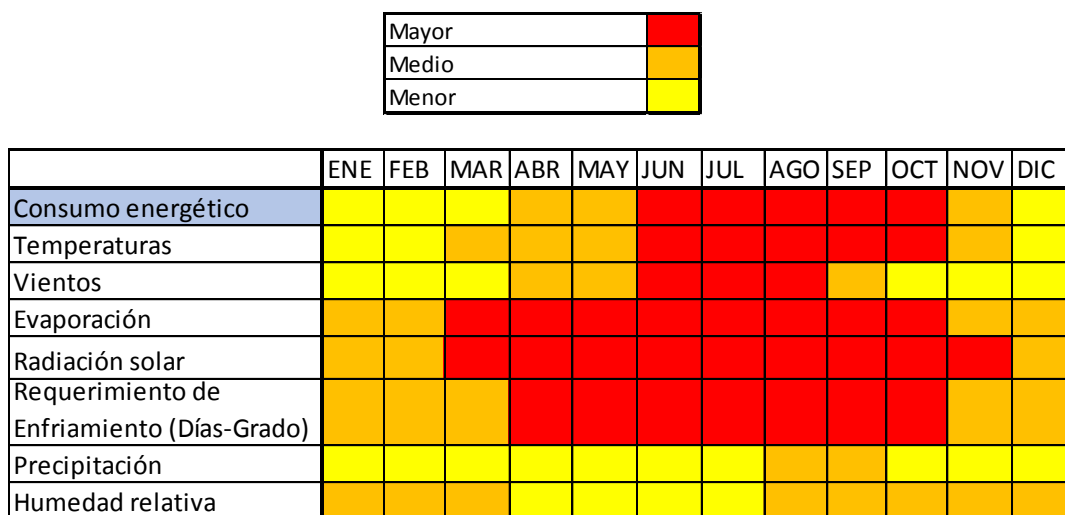
**Tabla 11.** Consumo energético de la vivienda de estudio durante el año 2017. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos con el uso del sistema de enfriamiento híbrido de torre de viento el sobreconsumo equivalente a 3696 kWh podría reducirse en cerca del 93%, equivalente al 48% de la energía anual consumida y a \$14,400 en costos de producción de energía eléctrica (costo aproximado de \$4.20/kWh), además se evitaría emitir 1.72 de Toneladas de dióxido de carbono.



**Gráfica 25.** Potencial de ahorro energético del consumo anual actual. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente gráfica se pueden identificar y comparar el comportamiento a lo largo del año de los distintos aspectos climáticos analizados anteriormente con el consumo energético de la vivienda elegida como caso de estudio. Se identifica como rojo los meses en los que cada factor tiene un efecto más elevado, por ejemplo, en el caso de la temperatura, los meses que aparecen marcados en rojo serían los meses que presentan temperaturas más altas sobrepasando los parámetros establecidos del confort, y así con cada aspecto incluyendo el consumo energético que, de acuerdo a los registros, en donde los meses en rojo serían los meses con mayor consumo energético. A partir de esta información podemos notar que existe una relación entre la radiación solar emitida, la temperatura, la evaporación, y, en consecuencia, el requerimiento de enfriamiento de los Días-Grado y el consumo energético para llevarlo a cabo. La velocidad del viento también está relacionada con el comportamiento solar, ya que cuando el sol calienta más una superficie que otra provoca corrientes de aire de un punto a otro. Se puede notar que parte del tiempo cuando hace más calor también se presentan los vientos más fuertes, representando una posibilidad y potencial de uso de este recurso para contribuir al enfriamiento que se requiere y a reducir el consumo energético.



**Gráfica 26.** Comparativo de condiciones climáticas y energéticas anuales. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.6.4. Temperaturas interiores de diseño para verano

Para el diseño del acondicionamiento de aire de un espacio interior según INIFE (2015) las temperaturas a lograr se deben de calcular de acuerdo con el tiempo de permanencia en el espacio y a la temperatura exterior. Son de permanencia larga aquellos lugares de trabajo y permanencia media las circulaciones y vestíbulos. Para hacer el cálculo se aplican las siguientes ecuaciones:

a) Para permanencia larga,  $ti = 18 + 0.2 te$

b) Para permanencia media  $ti = 16 + 0.3 te$

donde:

$ti$  = Temperatura interior,

$te$  = Temperatura exterior.

Las variaciones permitidas dentro del espacio serán de  $\pm 1.7$  °C.

Si consideramos la habitación de estudio como espacio de permanencia larga el cálculo se realizaría de esta manera:

$$ti = 18 + 0.2 (35^{\circ}\text{C})$$

$$ti: 25^{\circ}\text{C}$$

\*Con el máximo de variación permitida,  $ti = 23.3$  °C a  $26.7$  °C

Estos cálculos se recomiendan cuando se realiza un diseño de refrigeración de interiores con equipos de aire acondicionado comunes. En el caso del sistema de enfriamiento híbrido de torre de viento, para cumplir con estas normas de cálculo, sólo los casos de las simulaciones #9 y #10, que son las que cuenta con la mayor cantidad de aislamiento (en torre, techo y muros expuestos) cumplirían con los requerimientos de enfriamiento al permanecer dentro del rango que proporciona la ecuación tomando en cuenta como temperatura exterior  $35$  °C como fue establecido en las simulaciones como condición de frontera.

#### 4.6.5. Análisis de inversiones iniciales del sistema de enfriamiento híbrido de torre de viento en comparación de un aire acondicionado común

De acuerdo a datos de la ENIGH (INEGI, 2016) cerca del 93% de las viviendas en la ciudad de Los Mochis cuentan actualmente con equipos de aire acondicionado comunes en sus viviendas, los cuales pueden tener distinta antigüedad y por lo tanto eficiencia, como sucede en la vivienda del caso de estudio, por lo que a continuación se analizan los costos iniciales de cada sistema tomando en cuenta equipos nuevos a ser instalados.

Los costos aproximados que representa un mini Split de 2 toneladas de refrigeración promedio se describen a continuación:

- Precio del equipo: \$11,500
- Instalación, incluyendo mano de obra y material eléctrico en la ciudad de Los Mochis: \$2,500.

Precio total: \$14,000.

Los costos aproximados que representa el sistema de enfriamiento híbrido de torre de viento para vivienda existente se describen a continuación:

- Precio del equipo de bombeo: \$1,000
- Instalación incluyendo mano de obra: \$3,000
- Material que lo compone:
  - Piezas de PVC: \$1,500
  - Serpentín de cobre: \$3,000
  - Piezas de tubo galvanizado: \$350
  - Otros: \$250.

Precio total: \$9,100.

Por otro lado, si la vivienda no cuenta ya con una cisterna es necesario considerar esa inversión, como un estimado se considera:

- Cisterna Rotoplas de 5,000 litros: \$12,000
- Instalación y extras: \$2,000

Precio total incluyendo cisterna: \$23,100.

Los costos iniciales de cada sistema antes mencionados son aproximados ya que puede haber una variación significativa dependiendo de las marcas de los equipos y los proveedores, pero ayudan a tener noción de lo que pueden costar. Aunque el sistema híbrido parece ser un poco menos costoso no representa un ahorro tan significativo en su adquisición e instalación como inversión inicial. Si aún no se cuenta con una cisterna instalada es necesario considerar esa inversión, lo que puede elevar el costo del sistema de manera significativa.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

Al realizar el análisis de resultados de las simulaciones realizadas mediante Autodesk CFD contenidas en este trabajo, se concluye que fue un experimento exitoso, pues se obtuvo una reducción de la temperatura del aire bastante significativa, al grado de alcanzar temperaturas de confort interior. Su mejor desempeño se obtuvo mediante la aplicación de aislamiento en el techo de la edificación y en los muros expuestos a la radiación solar, logrando reducir la temperatura, por lo menos, entre 8.5 y 10.5°C en esos casos.

Algunas de las condiciones climáticas principales que afectan en la operación efectiva del sistema de torre de viento son la temperatura exterior, la magnitud de velocidad de los vientos dominantes, la humedad relativa y la radiación solar. De acuerdo con el análisis climático Los Mochis presenta las temperaturas más elevadas entre los meses de mayo y octubre con temperaturas promedio máximas de 38°C. La humedad relativa es un factor muy importante para determinar el tipo de enfriamiento que funciona mejor en el lugar, aunque la ciudad no es considerada en su clasificación climática como húmeda, principalmente debido a su baja precipitación pluvial, es importante considerar la humedad que se percibe en el ambiente por consecuencia de su cercanía al mar, en este caso los registros de humedad promedio se encuentran dentro de los rangos de confort pero en algunos periodos los porcentajes se acercan a los límites superiores de los rangos, por lo cual, agregar más humedad al ambiente, como por ejemplo mediante un enfriamiento evaporativo, podría resultar contraproducente o generar otros problemas de confort higrotérmico. Durante ese mismo periodo de mayor calor también se presentan las velocidades de viento más elevadas del año lo que favorece la utilización del sistema cuando se requiere de enfriamiento, y de acuerdo a los resultados, no se necesitan velocidades muy altas de viento para el uso de un sistema de este tipo, pero es importante considerar las calmas.

En la actualidad la vivienda, a pesar de contar con un tratamiento térmico en el techo mediante un sistema de losa aligerada con placas de poliestireno expandido, sigue requiriendo de enfriamiento gran parte del año. De acuerdo a los monitoreos realizados, no se presenta gran diferencia de temperaturas en el interior en comparación con el exterior, en algunas ocasiones incluso, las temperaturas interiores superan a las del exterior. Este comportamiento deriva en la necesidad de uso de algún sistema que permita a los usuarios estar en confort térmico en el interior cuando las temperaturas son elevadas. Con el uso de equipos de aire acondicionado común el consumo energético de la vivienda se eleva alrededor de 4 veces el consumo de cuando no hace calor, y expone a los usuarios a cambios bruscos de temperatura cuando se desplazan de una habitación a otra.

Algunas de las características de la vivienda existente que se pueden aprovechar para el funcionamiento y adaptación de un sistema de enfriamiento híbrido de torre de viento son la existencia de un depósito de agua subterráneo, como las cisternas, para provechar su temperatura más baja para enfriar el aire mediante un intercambiador de calor; la configuración de losas nervadas permite una instalación de una torre de este tipo de manera menos invasiva permitiendo una fácil perforación; la colindancia con vecinos también es una característica que se puede aprovechar como aislamiento de los muros de la envolvente así como las configuraciones compactas de las edificaciones. Aunque para este trabajo se estudió y simuló solamente una habitación de la vivienda, un sistema de enfriamiento como el propuesto podría utilizarse en una mayor dimensión para un enfriamiento más general aprovechando los espacios de distribución de la casa como el cubo de la escalera para la instalación de la torre de captación. Actualmente cerca del 93% de las viviendas en la ciudad de Los Mochis cuentan con equipos de aire acondicionado lo que representa un gran potencial para la replicabilidad del sistema.

Aunque se han propuesto nuevos diseños de torres de viento contemporáneas, que contemplan distintas configuraciones, aditamentos y distintos tipos de enfriamiento como el evaporativo o el uso del suelo como disipador de calor, para mejorar su eficiencia, es necesario tomar en cuenta las características climáticas particulares de la región y las características físicas y constructivas de las viviendas existentes para poder desarrollar un sistema de este tipo que se pueda utilizar bajo esas condicionantes. De acuerdo con la recopilación de datos climáticos, al análisis bioclimático, así como a la observación directa de la vivienda existente en la ciudad de Los Mochis, conviene que el sistema a adaptar e instalar sea ligero y compacto para no comprometer la seguridad estructural de la edificación, al ser ligero se complica el enfriamiento por inercia térmica, y el enfriamiento evaporativo agregaría más humedad a un ambiente que ya presenta humedades relativas significativas. A partir de estas condicionantes identificadas es que se plantea el diseño de una torre compuesta por materiales ligeros, que cuenten con aislamiento que las proteja de las ganancias de calor por radiación y que logre el enfriamiento a través de un intercambiador de calor que en su proceso de enfriamiento no añada humedad al ambiente. Además, los tipos de torre que responden mejor a sus condiciones bioclimáticas son aquellas que son capaces de captar vientos de distintas direcciones, ya que sus vientos dominantes pueden ser variables a lo largo del año, y que eviten el ingreso de insectos como los mosquitos. Ninguna de las torres de viento identificadas en los antecedentes empíricos cumple con todos los requerimientos necesarios para su aplicación en una vivienda existente por lo que es necesario tomar de cada una sólo las características que cumplan con esos requerimientos y, de ser posible, buscar mejorar su eficiencia.

Para la construcción del sistema de enfriamiento híbrido de torre de viento se encuentra factible utilizar materiales que se pueden conseguir en cualquier lugar y que sean del conocimiento común para su manipulación, tratamiento y mantenimiento, como el PVC, tubería de cobre, tubería galvanizada, principalmente, que sean accesibles al no presentar altos costos y que sean ligeros para su fácil adaptación a la construcción existente. Los materiales propuestos son una posibilidad de uso debido a que cumplen con las características deseadas, pero pueden existir otros materiales que también funcionen que no hayan sido analizados durante este trabajo.

El sistema de enfriamiento híbrido de torre de viento representa un consumo energético del 70% menos en comparación de un sistema de enfriamiento activo como un mini Split promedio. Esta comparación corresponde en el caso de enfriar sólo una habitación con el sistema propuesto o con un equipo de aire acondicionado común. Se ha calculado así ya que fue el análisis que se realizó durante este trabajo, pero el sistema de enfriamiento híbrido propuesto es un sistema escalable que tiene la capacidad de ser utilizado en espacios de áreas mucho mayores o en distintos espacios a la vez y seguir utilizando la misma energía que para una sola habitación, es decir, el cálculo de la bomba utilizada para la circulación del agua no se encuentra aprovechada al máximo en este análisis, por lo que su uso, entre mayor el área a enfriar es mayor la eficiencia, ya que los sistemas de aire acondicionado convencionales requerirían un mayor tonelaje de enfriamiento para mayor área a enfriar, lo que representaría un mayor consumo energético.

De acuerdo a la estimación de inversión inicial de un sistema activo y del sistema híbrido de enfriamiento, los montos pueden ser bastante similares dependiendo de las marcas de equipos, de la calidad de los materiales que se adquieran, del espacio que se requiera enfriar y de si se cuenta ya con una cisterna. El principal ahorro económico y energético radica en el uso y mantenimiento de los sistemas. En cuanto a la aplicación técnica, la instalación de equipos de aire acondicionado activos es muy común en la ciudad, por lo que existe amplio conocimiento acerca de su instalación y funcionamiento, en cambio para cualquier sistema nuevo que se quiera implementar se requiere de un esfuerzo mayor inicial y de práctica, para esto, se requiere que el sistema sea construido e instalado en escala real para detectar los problemas que se puedan presentar y requieran perfeccionarse.

Actualmente existen numerosos programas de cómputo para simulación numérica CFD, en el caso de Autodesk CFD es un programa que es de fácil acceso, amigable con el usuario, gratuito para fines de investigación académica y que ya ha sido utilizado en otras investigaciones de carácter científico. Por otro lado, hay que considerar que muchos aspectos constructivos del modelo de la habitación tuvieron que ser

simplificados para poder ser resueltos debido a la alta demanda de memoria y procesamiento de ordenador que requiere el software, pero es de gran ayuda como estudio previo antes de la construcción física y a escala real para poder proponer materiales y configuraciones en menor tiempo y con una inversión baja. Para obtener resultados determinantes es necesario probar el sistema en la realidad y monitorear su operación.

El sistema propuesto nos acerca a la sustentabilidad ya que brinda la posibilidad de lograr que las personas tengan acceso a una vivienda habitable y confortable de una manera más económica pudiendo aumentar los rendimientos energéticos del edificio simultáneamente con la disminución de las emisiones de CO<sup>2</sup>, lo que representa un gran impacto positivo.

Como línea de investigación futura para el desarrollo de la investigación en una siguiente etapa se contempla el análisis del sistema de enfriamiento con la incorporación de un motor de velocidad variable que controle el flujo del aire, mediante un sensor, para contrarrestar los tiempos de calmas y que el uso del aire acondicionado no sea necesario en ningún momento, siempre y cuando después de esta incorporación el consumo de energía eléctrica y la cantidad de gases emitidos sigan siendo considerablemente menores que el uso de equipos de refrigeración convencionales.

## 6. Referencias bibliográficas

- Ahome, H. A. (s.f.). *Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Estado de Sinaloa*. Obtenido de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM25sinaloa/municipios/25001a.html>
- Al-Saffar, M. (mayo de 2015). Passive Cooling Strategies in Greening Existing Residential Building in Hot Dry Climate: Case Study in Bahrain. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 233-240. Obtenido de <http://www.davidpublisher.org/Public/uploads/Contribute/55b6d6ee77bf4.pdf>
- Aryan, A., Ehsan, Z., Amin, S., & Masoud, K. (2010). Wind Catchers: Remarkable Example of Iranian Sustainable Architecture. *Journal of Sustainable Development*, 3(2), 89-97. Recuperado el 2017
- Bahadori, M. N., & Dehghani-sanji, A. (2014). *Wind Towers, Architecture, Climate and Sustainability*. (A. Sayigh, Ed.) Springer. doi:10.1007/978-3-319-05876-4
- Barranco, O. (2015). La arquitectura bioclimática. *Módulo Arquitectura CUC*, 14(2), 31-40.
- Bojórquez Baez, I. (2004). Casa Romero (remodelación). En R. Lacomba, *Las Casas Vivas, Proyectos de arquitectura sustentable* (págs. 83-86). Ciudad de México: Trillas.
- Brown, P. (s/f). *P.S.S. WINGFIELD CASTLE - Bridge and ventilation funnels*. Recuperado el 28 de febrero de 2018, de Doc. Brown's Travel Pictures: <http://www.docbrown.info/docspics/northeast/nutpage33c.htm>
- Burlacu, A., Sosoi, G., Vizitiu, R., Barbuta, M., Lazarescu, C., Verdes, M., & Serbanoui, A. (2 de abril de 2018). Innovative system for heat recovery from used water in the building sector. *Procedia Manufacturing*(22), 722-729. Recuperado el 20 de abril de 2018, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918304001>
- CFE. (01 de diciembre de 2017). *Tarifa 1F (Diciembre 2017 - 2018)*. Recuperado el enero de 2018, de Comisión Federal de Electricidad (CFE): <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Tarifas/Tarifa1F.aspx>
- Cidad, E. (8 de abril de 2015). *Bombas de agua para uso doméstico*. Recuperado el 27 de febrero de 2018, de AGUA ECOSOCIAL: <https://aguaecosocial.com/bombas-de-agua-para-uso-domestico/>
- CONAVI. (2010). *Código de Edificación de Vivienda*. Obtenido de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/85460/Codigo\\_de\\_Edificacion\\_de\\_Vivienda.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/85460/Codigo_de_Edificacion_de_Vivienda.pdf)
- CONAVI. (2013). *NAMA Apoyada para la vivienda Sustentable en México - Acciones de Mitigación y Paquetes Financieros*. Recuperado el noviembre de 2016, de <http://www.conavi.gob.mx/viviendasustentable>

- CONSEJO PARA EL DESARROLLO ECONÓMICO DE SINALOA (CODESIN). (15 de abril de 2013). REPORTE DEL CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA EN SINALOA EN 2012. (25), 1-6. Culiacán, Sinaloa, México. Obtenido de <http://sinaloaennumeros.com/wp-content/uploads/2015/10/01-Reporte-del-consumo-de-energ%C3%ADa-electrica-en-Sinaloa-en-el-a%C3%B1o-2012.pdf>
- CONUEE. (2015). Retos para implementar las NOM en materia energética y ambiental. *Construyendo la Edificación Sustentable* (pág. 30). México D.F.: SEMARNAT. Recuperado el febrero de 2018, de [http://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Conferencias/Edificacion\\_Sustentable/M%C3%B3dulo\\_2/02\\_Ing\\_Od%C3%B3n\\_de\\_Buen\\_Rodr%C3%ADguez.pdf](http://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Conferencias/Edificacion_Sustentable/M%C3%B3dulo_2/02_Ing_Od%C3%B3n_de_Buen_Rodr%C3%ADguez.pdf)
- Davis, L. W., & Gertler, P. J. (27 de Abril de 2015). Contribution of air conditioning adoption to future energy use under global warming. (B. T. University, Ed.) *PNAS*, 112(19), 5962-5967. Obtenido de <http://www.pnas.org/content/112/19/5962>
- Deffis Caso, A. (1994). *Arquitectura Ecológica Tropical*. México D.F.: Árbol Editorial.
- Deffis Caso, A. (1994). *La Casa Ecológica Autosuficiente para climas Cálido y Tropical*. México D.F.: Árbol Editorial.
- Dehghani-sanij, A., Soltani, M., & Raahemifar, K. (2015). A new design of wind tower for passive ventilation in building to reduce energy consumption in windy regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 182-195.
- Diego Ayala, U., & Carrillo Baeza, J. G. (julio-septiembre de 2015). Estudio del comportamiento térmico de agua para uso residencial en tinacos de concreto y polietileno en un clima cálido-subhúmedo. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 16(3), 573-583. Recuperado el 8 de enero de 2018, de <http://www.journals.unam.mx/index.php/ingenieria/article/view/52547/46782>
- Echeverría Aguilar, A. (2015). *Estrategia de Transición para promover el uso de Tecnologías más limpias en el tema de ahorro de energía y eficiencia energética en las edificaciones de México. Documento base*. Obtenido de [www.gob.mx: http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/91593/AE\\_EDIF.pdf](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/91593/AE_EDIF.pdf)
- Echeverría Aguilar, A. (29 de Agosto de 2016). *CONUEE*. Obtenido de Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía: [http://www.conuee.gob.mx/pdfs/AE\\_EDIF.pdf](http://www.conuee.gob.mx/pdfs/AE_EDIF.pdf)
- Escriva De Balaguer Mira, M. (11 de septiembre de 2017). *In House: Las personas pasan más tiempo dentro de casa que fuera*. Obtenido de Forbes México: <https://www.forbes.com.mx/in-house-las-personas-pasan-mas-tiempo-dentro-de-casa-que-fuera/>
- Espinosa Cancino, C., & Cortés Fuentes, A. (2015). Confort higro-térmico en vivienda social y la percepción del habitante. *INVI, versión online*, 227-242. Recuperado el Junio de 2016, de <http://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/903/1213>

- Evans, J. M. (2000). Técnicas Bioclimáticas de Diseño: Las 'Tablas de Mahoney' y lo 'Triángulos de Confort'. *ReviCyHLUZ*, 26-33. Recuperado el abril de 2017, de <http://www.produccioncientifica.luz.edu.ve/index.php/portafolio/article/view/12752/12740>
- Fernández Zayas, J. L., & Estrada-Cajigal, V. (1983). *Cálculo de la radiación solar instantánea en la república mexicana*. UNAM.
- Fuentes Freixanet, V. A. (2004). *Clima y Arquitectura*. México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- G.A.T.E.P.A.C. (1932). Lo que entendemos por vivienda mínima. *AC. Documentos de Actividad Contemporánea*(6), 21. Obtenido de <http://www.numerossueltos.com/revistas/ac/ac-documentos-de-actividad-contemporanea-06.html>
- García Chávez, J. R., & Fuentes Freixanet, V. A. (1985). *Arquitectura Bioclimática y Energía Solar; Viento y arquitectura*. México D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Givoni, B. (1998). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. Nueva York: Van Nostrand Reinhold.
- González Osorio, L. M., & Beele, A. (marzo de 2016). *Estudio de Caracterización del uso del aire acondicionado en vivienda de interés social*. México D.F., México: Conuee/GIZ. Obtenido de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/182038/Estudio\\_de\\_Caracterizaci\\_n\\_del\\_uso\\_de\\_Aire\\_Acondicionado.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/182038/Estudio_de_Caracterizaci_n_del_uso_de_Aire_Acondicionado.pdf)
- Google. (junio de 2017). *Maps*. Obtenido de <https://www.google.com.mx/maps/place/Fuente+de+Apolo+206,+Las+Fuentes,+81223+Los+Mochis,+Sin./@25.8042356,-108.9834151,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x86ba28b36b8106ff:0xc2bcaa7f98ac582d!8m2!3d25.8042356!4d-108.9812264?hl=en>
- Granados, L. (13 de junio de 2011). *PROFECO*. Recuperado el 3 de marzo de 2018, de Brújula de compra. Cómo comprar aires acondicionados: [https://www.profeco.gob.mx/encuesta/brujula/bruj\\_2011/bol195\\_aires.asp](https://www.profeco.gob.mx/encuesta/brujula/bruj_2011/bol195_aires.asp)
- Grupo de Investigación Reconocido de la Universidad de Valladolid. (15 de julio de 2014). *GIR de TERMOTECNIA*. Obtenido de ¿CUÁNDO HAY MÁS HUMEDAD EN EL AMBIENTE, EN INVIERNO O EN VERANO?: <http://girtermotecnia.blogs.uva.es/2014/07/15/cuando-hay-mas-humedad-en-el-ambiente-en-invierno-o-en-verano/>
- H. Ayuntamiento de Ahome. (2010). *Reglamento de Construcción del Municipio de Ahome Sinaloa*. Los Mochis, Ahome: Periódico Oficial del Estado de Sinaloa.
- Heras, S. (2011). *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas* (Primera ed.). Barcelona, Cataluña, España: Universitat Politècnica de Catalunya. Recuperado el 4 de marzo de 2018, de <http://ebookcentral.proquest.com.ezproxy.iteso.mx/lib/biblioitesosp/reader.action?docID=3229099&query=>

- IMCO. (22 de abril de 2016). *México ratifica el Acuerdo de París sobre el cambio climático*. Recuperado el 20 de abril de 2018, de Instituto Mexicano para la Competitividad A.C.: [https://imco.org.mx/medio\\_ambiente/mexico-ratifica-el-acuerdo-de-paris-sobre-el-cambio-climatico/](https://imco.org.mx/medio_ambiente/mexico-ratifica-el-acuerdo-de-paris-sobre-el-cambio-climatico/)
- IMSS. (1993). Normas de Proyecto de Arquitectura. En *VII Tomo, Normas Bioclimáticas*. Ciudad de México, México: Instituto Mexicano del Seguro Social. Recuperado el Marzo de 2017, de <https://angelsegioasa.files.wordpress.com/2013/02/tomo-vii.pdf>
- INEGI. (2016). *Hogares y vivienda*. Recuperado el 19 de abril de 2018, de Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2016: <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/enchogares/regulares/enigh/nc/2016/>
- INEGI. (s.f.). *Cuéntame INEGI*. Obtenido de <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/sin/territorio/clima.aspx?tema=me&e=25>
- INIFE - Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa. (17 de junio de 2015). *Tomo III, Instalaciones Aire Acondicionado*. Recuperado el 15 de febrero de 2018, de [gob.mx](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105552/Tomo_III_Instalaciones_Aire_Acondicionado_V_2.0.pdf), Tu gobierno en un solo punto: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105552/Tomo\\_III\\_Instalaciones\\_Aire\\_Acondicionado\\_V\\_2.0.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105552/Tomo_III_Instalaciones_Aire_Acondicionado_V_2.0.pdf)
- Jiménez , A. (16 de julio de 2011). *Aire acondicionado: los cambios bruscos de temperatura ponen a prueba nuestro sistema inmune*. Obtenido de LA RAZÓN: [https://www.larazon.es/historico/6184-aire-acondicionado-los-cambios-bruscos-de-temperatura-ponen-a-prueba-nuestro-sistema-inmune-ILLA\\_RAZON\\_387404#.Tt1WCVkYLg92pp](https://www.larazon.es/historico/6184-aire-acondicionado-los-cambios-bruscos-de-temperatura-ponen-a-prueba-nuestro-sistema-inmune-ILLA_RAZON_387404#.Tt1WCVkYLg92pp)
- Kristianto, M. A., Utama, N. A., & Fathoni, A. M. (2014). Analyzing Indoor Environment of Minahasa Traditional House Using CFD. *Procedia Environmental Sciences*(20), 172 – 179. Recuperado el 22 de febrero de 2018, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029614000243>
- Lim, C., Saadatian, O., Sulaiman, Y. M., Mat, S., & Sopian, K. (2011). Performance of Wind-Induced Natural Ventilation Tower in Hot and Humid Climatic Conditions. *Recent Researches in Chemistry, Biology, Environment and Culture*, 125-131.
- Limón Rodríguez, B., Martínez Turanzas, G., & Alfaro Barbosa, J. (2014). *Ambiente y sustentabilidad: por una educación ambiental*. México, D.F., México: Larousse-Grupo Editorial Patria.
- López López, V. M. (2003). *Sustentabilidad y desarrollo sustentable; origen precisiones conceptuales y metodología operativa*. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- Lyon, M. (2009). Photo 16 BedZED's village square. *BedZED seven years on, The impact of the UK's best known eco-village and its residents*. BioRegional, Londres, Reino Unido. Recuperado el 20 de marzo de 2018, de [https://www.bioregional.com/wp-content/uploads/2014/10/BedZED\\_seven\\_years\\_on.pdf](https://www.bioregional.com/wp-content/uploads/2014/10/BedZED_seven_years_on.pdf)

- Mayorga Cervantes, J. R. (2012). *Arquitectura y confort térmico. Teoría, cálculo y ejercicios*. Madrid: Plaza y Valdes Editores.
- Mazidi, M., Dehghani-sanij, A., & Aghanajafi, C. (2007). The Study of the Airflow in Wind Towers for the Old Buildings Air Conditioning. *Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics*, (págs. 76-81). Queensland, Australia. Recuperado el 2017
- Meana, S. (12 de enero de 2016). Subsidios a la luz en peligro de extinguirse. *El Financiero*. Recuperado el diciembre de 2017, de <http://www.elfinanciero.com.mx/economia/subsidios-a-la-luz-en-peligro-de-extinguirse>
- Meteored. (junio de 2017). *meteored.mx*. Obtenido de Histórico del clima en Los Mochis: [https://www.meteored.mx/clima\\_Los+Mochis-America+Norte-Mexico-Sinaloa-MMLM-sactual-22308.html](https://www.meteored.mx/clima_Los+Mochis-America+Norte-Mexico-Sinaloa-MMLM-sactual-22308.html)
- Montazeri, H., Azizian, R., & Montazeri, F. (Enero de 2010). Two-sided wind catcher performance evaluation using experimental, numerical and analytical modeling. *Renewable Energy*, 35, 1424–1435. doi:10.1016/j.renene.2009.12.003
- Morillón Gálvez, D. (2004). Prólogo. En R. Lacomba, *Las casas vivas. Proyectos de arquitectura sustentable* (págs. 5-8). Ciudad de México: Trillas.
- Mourad, M., Abdel-Rahman, A. K., & Ali, A. H. (2014). Wind Catcher Earth Air Tunnel for Passive Cooling: Annual Energy Performance of Residential Home in New Cities of Egypt. *The Fourth Asian Conference on Sustainability, Energy and the Environment, 12th to 15th June 2014, Osaka, Japan*. Osaka, Japón: The International Academic Forum. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/283349429\\_Wind\\_Catcher\\_Earth\\_Air\\_Tunnel\\_for\\_Passive\\_Cooling\\_Annual\\_Energy\\_Performance\\_of\\_Residential\\_Home\\_in\\_New\\_Cities\\_of\\_Egypt](https://www.researchgate.net/publication/283349429_Wind_Catcher_Earth_Air_Tunnel_for_Passive_Cooling_Annual_Energy_Performance_of_Residential_Home_in_New_Cities_of_Egypt)
- Moya Acosta, S. L. (2013). Conferencia B - Simulación del flujo de aire en una casa de interés social sin/con Torre de Viento. *Investigación e innovación en CENIDET*. CENIDET. Obtenido de <https://sites.google.com/site/iicenidet/programa/conferencia-b>
- Naboni, E., Lee, D. S.-H., & Fabbri, K. (2017). Thermal Comfort-CFD maps for Architectural Interior Design. *Procedia Engineering*(180), 110 – 117. Recuperado el 6 de febrero de 2018, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817316776>
- OCDE México. (s.f.). Obtenido de <http://www.ocdemexico.org.mx/Sinaloa/Los-Mochis/>
- Olgay, V. (1998). *Arquitectura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Oropeza Pérez, I., & Morillón Galvez, D. (2011). Potential of Natural Ventilation in Mexico According to Its Hours of Hygrothermal Comfort. *Smart Grid and Renewable Energy*, 417-426. doi:10.4236/sgre.2011.24048

- Poo Rubio, A. (2003). El Sector de la Construcción en México. *Arquitectura, CYAD, Administración para el Diseño*, 121-140. Obtenido de [http://www.azc.uam.mx/cyad/administracionytecnologia/publicaciones/2003/6\\_2003.pdf](http://www.azc.uam.mx/cyad/administracionytecnologia/publicaciones/2003/6_2003.pdf)
- Reyes Herrera, V. A. (2016). *Determinación de la Capacidad de las Torres de Viento para producir confort térmico en el interior de Edificaciones de Zonas Áridas y Semiáridas de México*. Acapulco: VIII Congreso Anual Conjunto de Asociaciones del Sector Energético y XVIII Congreso Aual de la AMEE. Obtenido de [http://www.groups2go.com.mx/SALON2/3\\_presentacion\\_AМЕЕ.pdf](http://www.groups2go.com.mx/SALON2/3_presentacion_AМЕЕ.pdf)
- Reyes, V., Moya, S., Morales, J., & Sierra-Espinosa, F. (2013). A study of air flow and heat transfer in building-wind tower passive cooling systems applied to arid and semi-arid regions of Mexico. *Energy and Buildings*, 66, 211–221.
- Rivas-Martínez, S. (1 de diciembre de 2008). *Global Bioclimatics (Clasificación Bioclimática de la Tierra)*. Obtenido de Worldwide Bioclimatic Classification System : [http://www.globalbioclimatics.org/book/bioc/global\\_bioclimatics-2008\\_09.htm](http://www.globalbioclimatics.org/book/bioc/global_bioclimatics-2008_09.htm)
- Samadiyan, S. (junio de 2013). *Chopoghi Wind-catcher*. Recuperado el 28 de noviembre de 2017, de Google Maps: <https://www.google.com.mx/maps/place/%D8%A8%D8%A7%D8%AF%DA%AF%DB%8C%D8%B1+%DA%86%D9%BE%D9%82%DB%8C+%D8%B3%DB%8C%D8%B1%D8%AC%D8%A7%D9%86%E2%80%AD/@29.4466096,55.6735316,3a,113.2y,90t/data=!3m8!1e2!3m6!1sAF1QipO-iqQLJDEQefdcAGpei9GUA1YfTuGovKE6iG3a!2e10!3e1>
- Sánchez Viveros, L. A., & Maqueda Zamora, M. R. (04 de 2011). Curvas de demanda de energía eléctrica en el sector doméstico de dos regiones de México. *Instituto de Investigaciones Eléctricas*, 172-180. Recuperado el 06 de 2016, de [www.iie.org.mx/boletín042011/investiga.pdf](http://www.iie.org.mx/boletín042011/investiga.pdf)
- Santamouris, M. (2005). Passive cooling of buildings. *Advances of Solar Energy*, 3-40.
- Secretaría de Energía (SENER). (2017). *Balance Nacional de Energía 2016* (Primera ed.). México. Obtenido de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/288692/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energ\\_a\\_2016\\_2\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/288692/Balance_Nacional_de_Energ_a_2016_2_.pdf)
- Secretaría de Energía. (2 de marzo de 2016). *Evaluación Rápida del Uso de la Energía en las ciudades, mediante la implementación de TRACE en ciudades de la República Mexicana*. Obtenido de Evaluación Rápida del Uso de la Energía - Culiacán, Sinaloa México: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/170650/9\\_\\_Culiac\\_n.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/170650/9__Culiac_n.pdf)
- SEDESOL. (octubre de 2015). *Catálogo de localidades*. Obtenido de Sistema de Apoyo para la Planeación del PDZP: <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/contenido.aspx?refnac=250010001>
- SEMADET- Secretaria de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial. (marzo de 2018). *Calculadora de Emisiones*. Obtenido de <http://siga.jalisco.gob.mx/calculadoraco2/>

- SENER, S. d. (2 de marzo de 2016). *Evaluación Rápido del Uso de la Energía*. Obtenido de <http://www.gob.mx/sener/documentos/evaluacion-rapida-del-uso-de-energia-en-las-ciudades-mediante-la-implementacion-de-trace-en-ciudades-de-la-republica-mexicana>
- Serra, R. (1989). *Clima, lugar y arquitectura*. CIEMAT, Ministerio de industria y energía.
- Serra, R. (1989). *Manual de Diseño Bioclimático*. Secretaría General Técnica del CIEMAT.
- Sosa Griffin, M. (1999). *Ventilación natural efectiva y cuantificable*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico.
- Tsoi, E., & González, E. (Enero-Junio de 2006). La ventilación natural en la vivienda bioclimática VBP-1: Un método para su caracterización. *Portafolio 13*, 6(13), 40-49. Recuperado el Noviembre de 2016
- Wassouf, M. (2014). *De la casa pasiva al estándar: la arquitectura pasiva en climas cálidos*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili.
- Yetman, D. a. (2002). *Mayo Ethnobotany : Land, History, and Traditional Knowledge in Northwest Mexico*. . Berkeley: University of California Press.

## 7. Anexos

### 7.1. Manual CFD

Simulación de captación de viento del exterior hacia el interior de una habitación.

Para realizar el siguiente proceso de simulación de fluidos (en este caso viento) es necesario tener instalados los programas de computadora: Revit y Autodesk CFD, en ese orden de instalación, ya que el Add-In de Autodesk CFD se instala automáticamente en la versión de Revit más reciente que encuentre instalado durante su proceso de instalación.

1. Realizar modelo de CFD en Revit, simplificándolo lo más posible, con poco detalle y sólo lo indispensable.
2. En la pestaña de **Add-Ins**, en la sección de *Autodesk CFD 2017* seleccionar **Launch Active Model**.  
Con este paso el modelo se exportará y abrirá automáticamente al programa de Autodesk CFD.

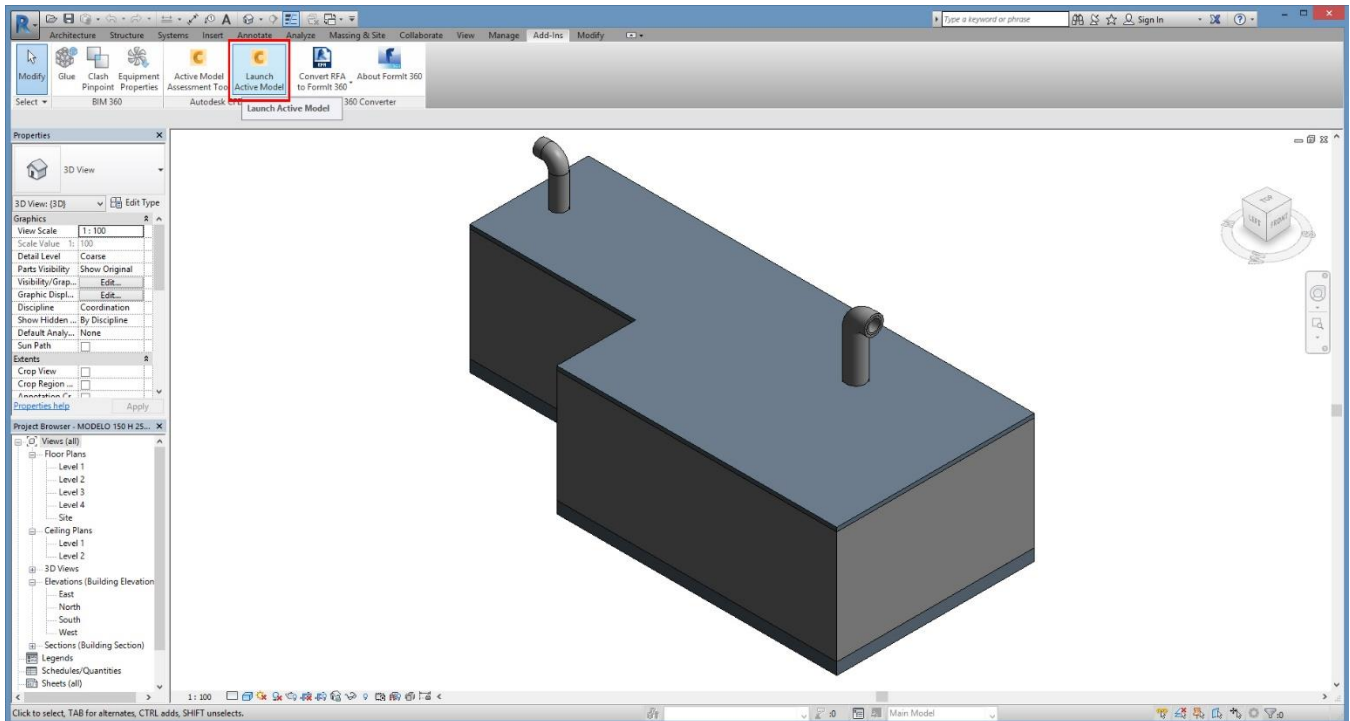


Imagen 1. Modelo en Revit. Lanzar Modelo Activo a Autodesk CFD

- Una vez en Autodesk CFD lo primero que se requiere hacer es fusionar los bordes (*Merge Edges*) y eliminar los objetos pequeños (*Small objects removal*) del modelo para facilitar la simulación simplificando del modelo las formas que no tienen relevancia para el comportamiento del viento en la geometría pero que pueden complicar el simulado. Para realizar esto el cuadro de *Geometry Tools* (Herramientas de geometría) se abre automáticamente al abrirse el modelo en el programa Autodesk CFD, y siempre se puede volver a él desde la pestaña de *Setup*, *Setup Tasks*, *Geometry Tools*.

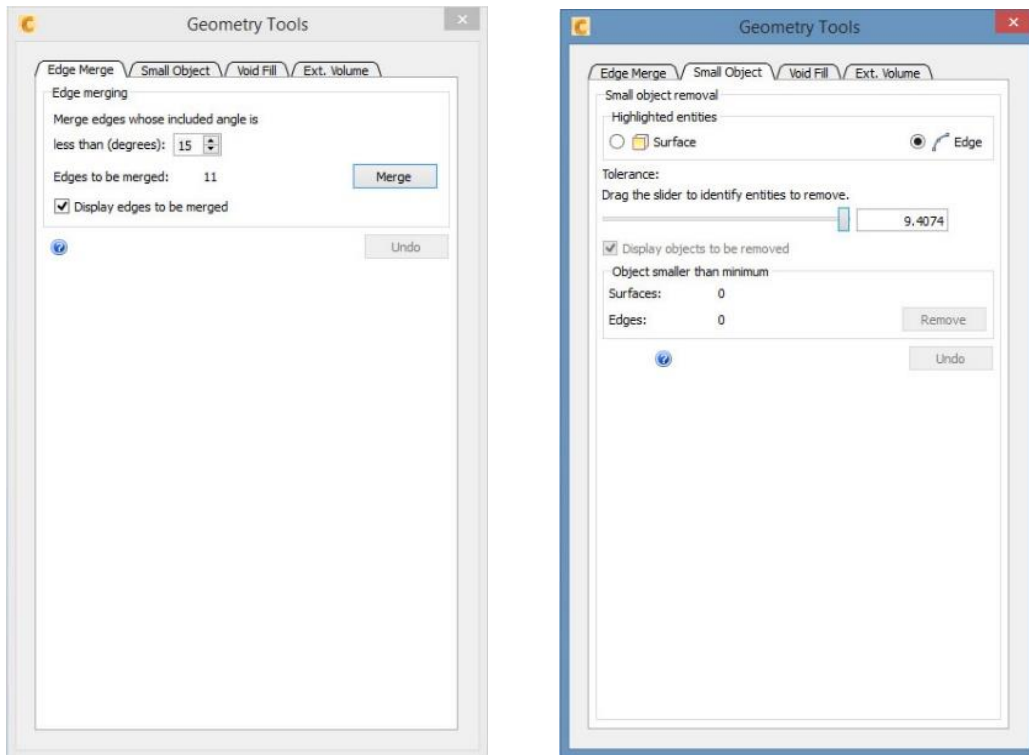


Imagen 2. Geometry Tools. Fusionar bordes y eliminar objetos pequeños.

- Para modelar las condiciones exteriores es necesario tener un volumen que represente el aire circundante, este paso puede ser realizado desde Revit mediante *Model in place* creando un componente de masa con las dimensiones requeridas. O directamente en CFD en *Setup Tasks*, *Geometry Tools*, *Ext. Volume*.

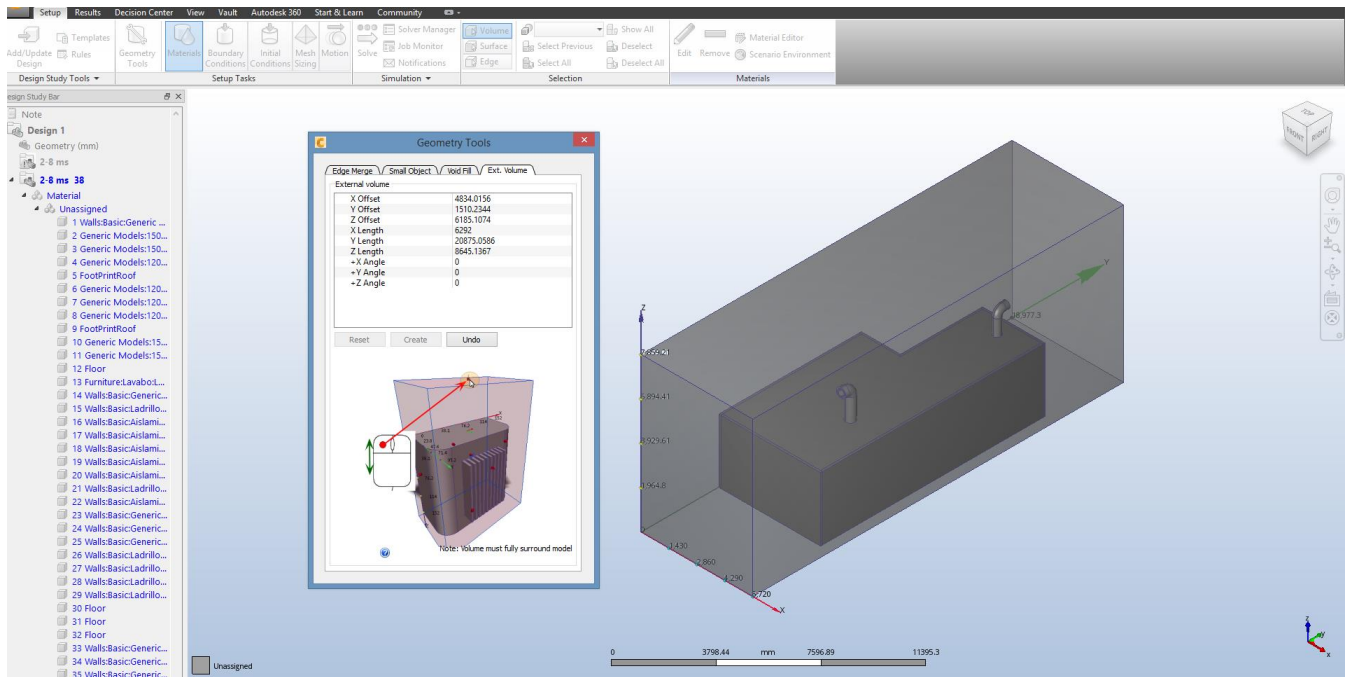


Imagen 4. Geometry Tools. Crear geometría para representar las condiciones ambientales exteriores.

- El siguiente paso consiste en asignar de material a cada uno de los componentes del modelo. La opción de Materiales se encuentra en **Setup Tasks, Materials**, y se va seleccionando los diferentes volúmenes que representan distintos materiales, se presiona **Edit** desde el apartado de **Materials**, y primero se elige el tipo de material, en este caso utilizamos dos tipos: Sólidos y Fluidos. Para el caso del volumen que representa el exterior se asigna Fluido para el tipo de material, **Moist Air** para representar el aire con humedad y en **Environment, Set**, activar **variable** por ser condiciones que no son controladas.

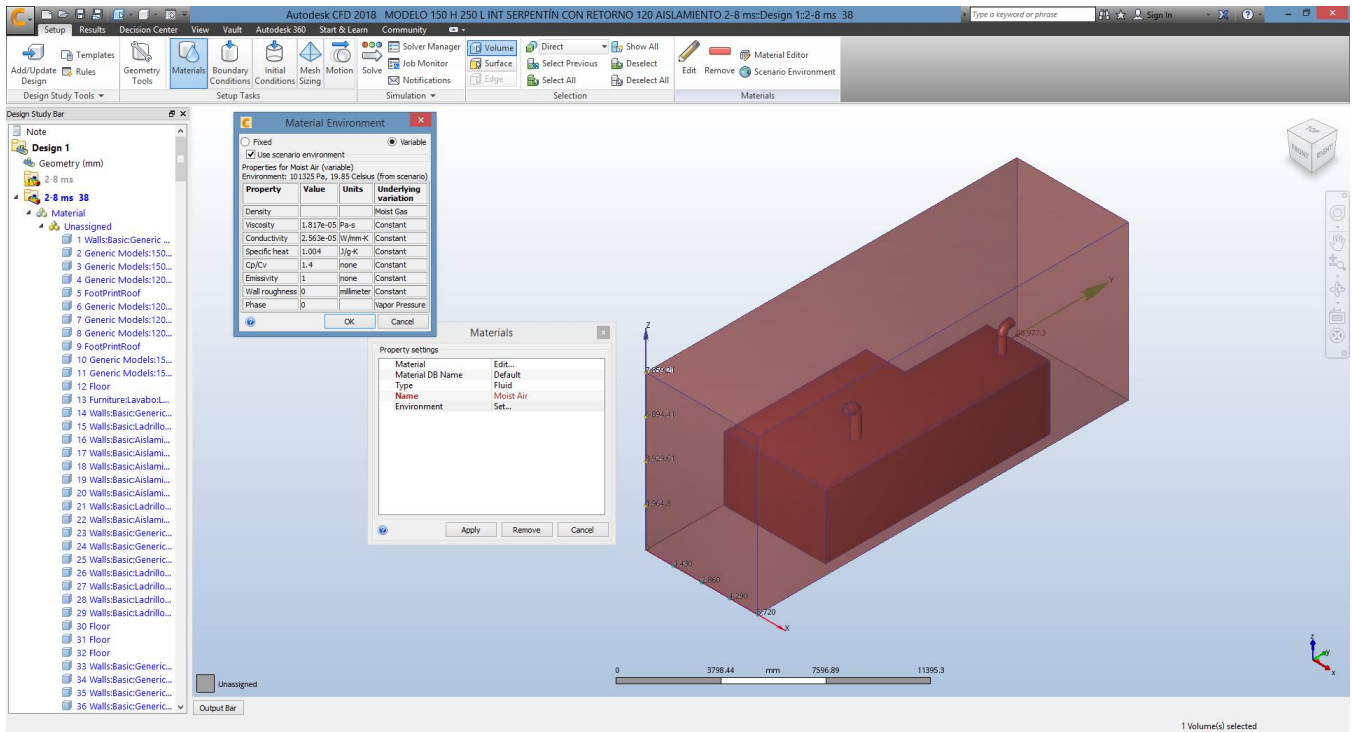


Imagen 5. Asignar materiales. Material para exterior.

El resto de los materiales son de tipo Sólido, como ladrillo, concreto, PVC, etc., de acuerdo con las condiciones del modelo que se esté simulando.

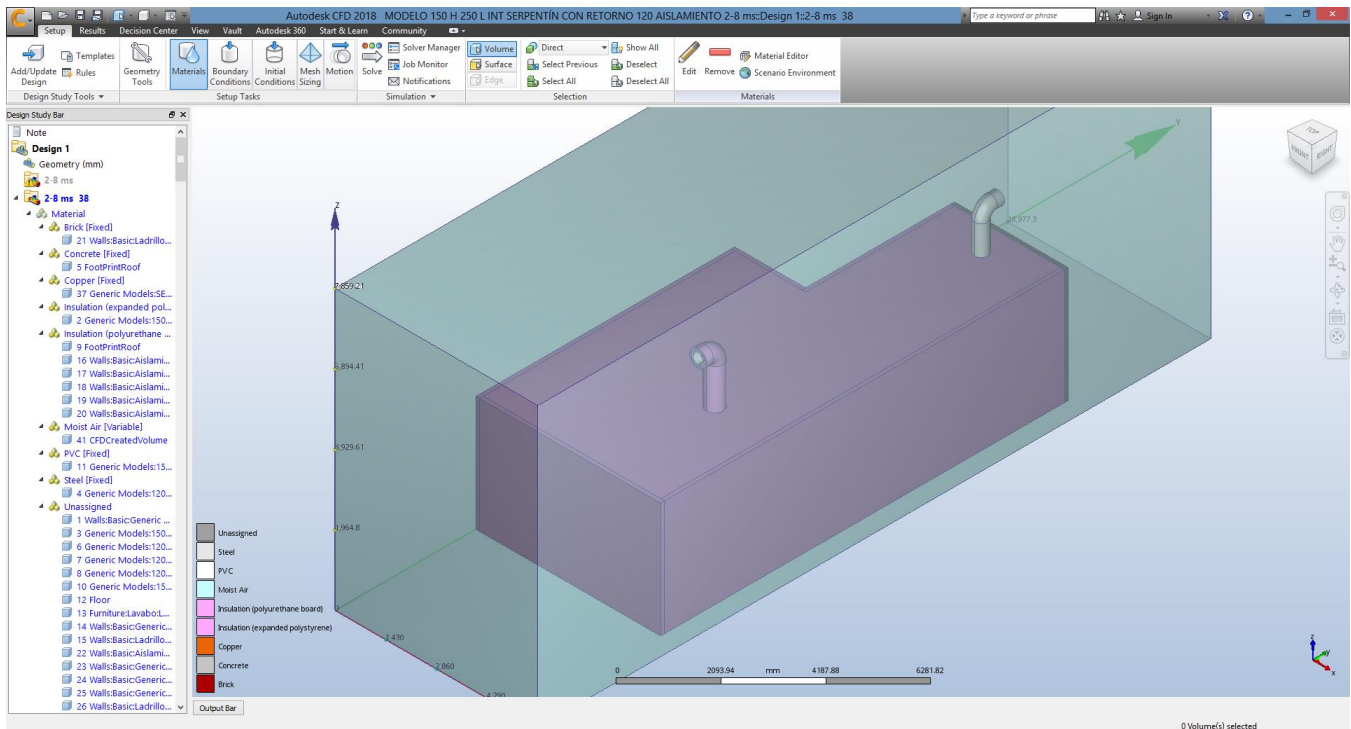


Imagen 6. Asignar materiales.

6. A continuación, se asignarán las Boundary Conditions (condiciones de frontera) a la geometría de aire, se realizó de la siguiente manera:

- Cara de la dirección del viento:

Tipo: velocidad

Unidad: m/s

Magnitud de velocidad: 5\*

\* De acuerdo a los datos bioclimáticos obtenidos previamente en la investigación, en la zona de estudio se registra una velocidad promedio mensual de 5 m/s o 2.8 m/s.

\*Se repite el procedimiento para las variables de humedad relativa y temperatura sobre la misma cara.

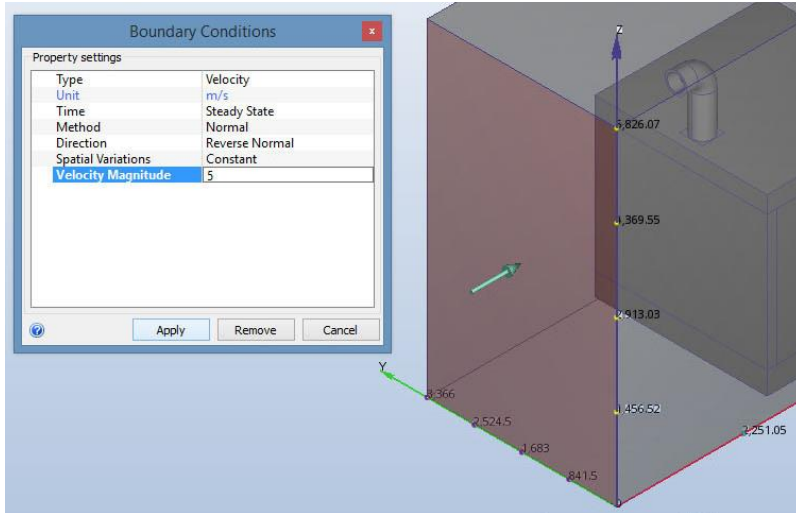


Imagen 7. Boundary Conditions. Velocidad en la cara de la dirección del viento.

- Cara opuesta de la dirección del viento:

Tipo: Presión.

Unidad: Pa

Presión: 0

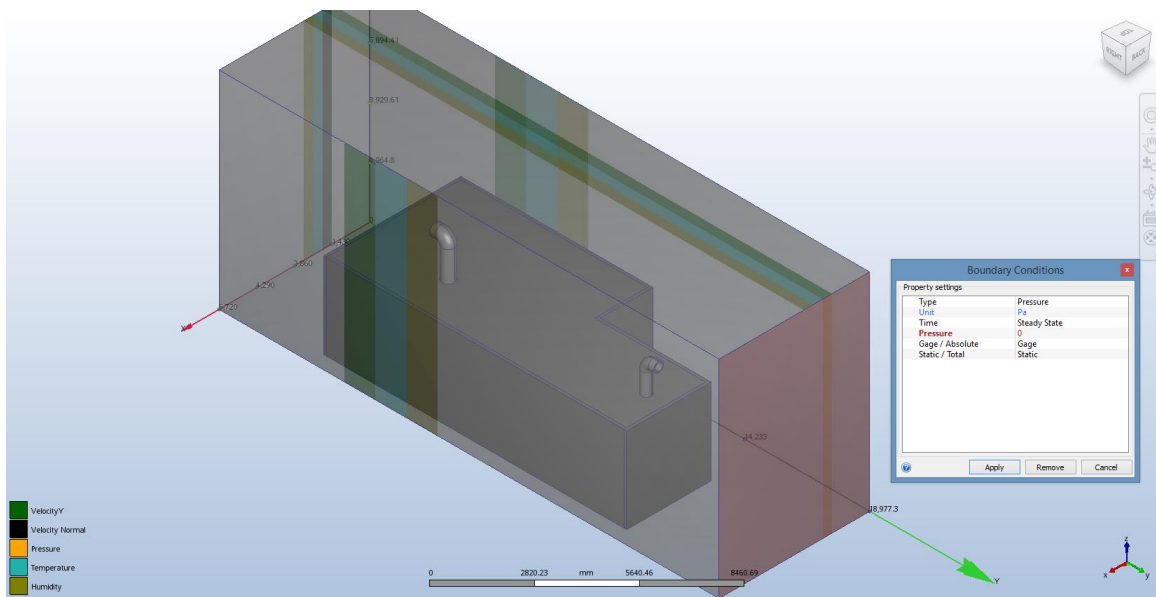


Imagen 8. Boundary Conditions. Presión 0 en la cara opuesta a la dirección del viento.

- Cara superior y laterales:  
Velocidad en Y: 5 m/s,  
Humedad relativa: 0.65,  
Temperatura: 35 °C.

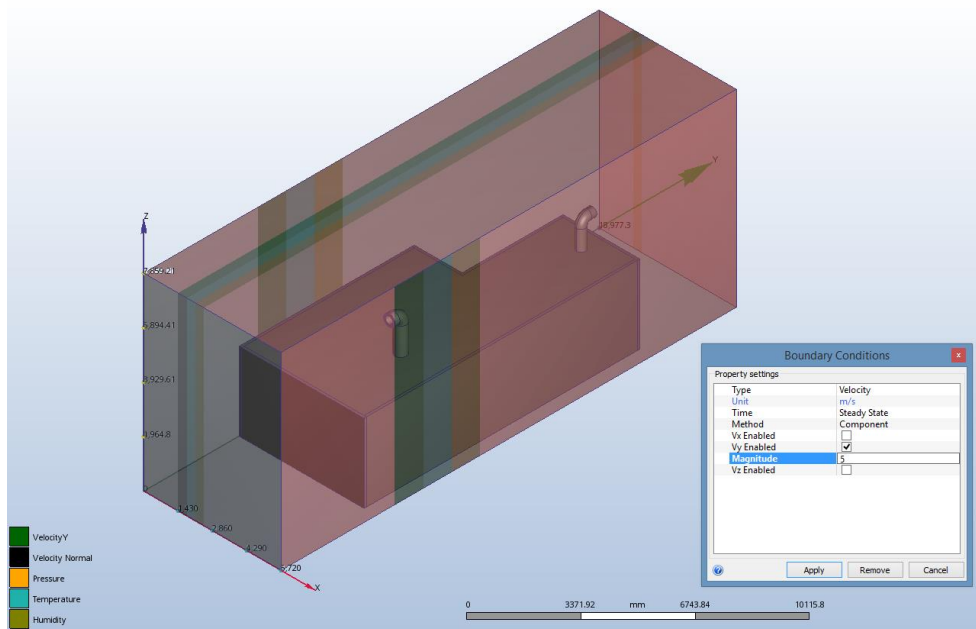


Imagen 9. Boundary Conditions laterales y superior.

- A la cara inferior no se le asigna ninguna condición ya que el viento no se mueve físicamente por el suelo.
7. Se presiona la opción **Mesh** y después **Autosize**, y en **Edit** se puede refinar la malla para las geometrías con mayor detalle.

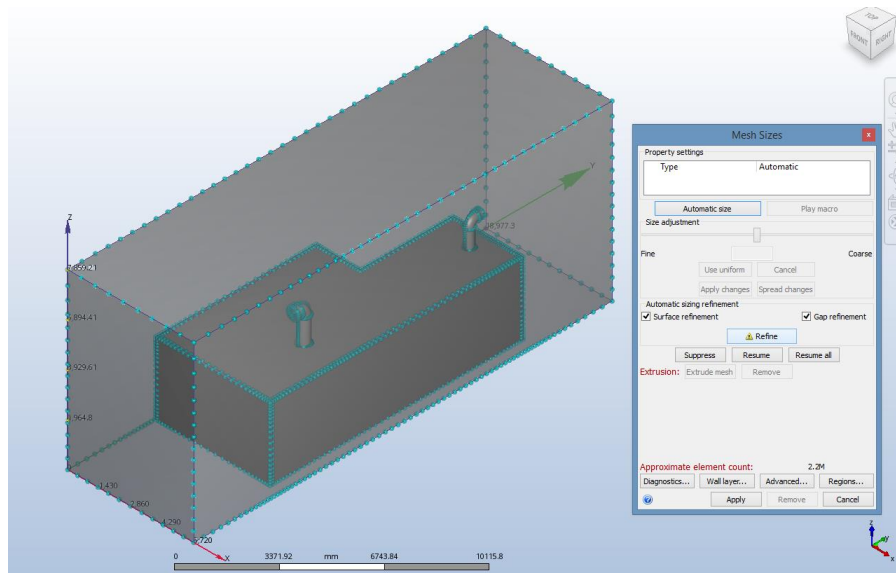


Imagen 10. Mesh Sizing refining.

8. Después se selecciona **Solve**. Aparece la siguiente ventana donde se modifican algunos valores. El máximo permitido de número de **Iterations to Run** (Iteraciones) son 750. Para este caso se correrán 100 o la cantidad que sea necesaria para alcanzar la estabilidad.

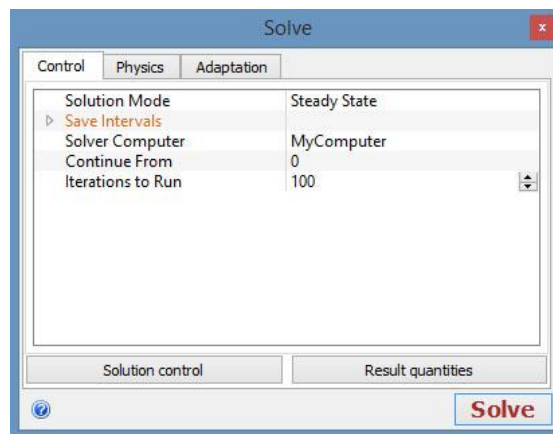


Imagen 11. Solve, Control.

En la pestaña **Physics** (Física) se seleccionan las opciones de **Flow** (Flujo), **Heat Transfer** (Transferencia de calor) y **Gravity Method** (Método de gravedad), asegurándonos de que esté seleccionada la opción **Earth** (Tierra) y modificando **Gravity Direction** (Dirección de gravedad) a

0, 0, -1, de este modo se proporcionan los valores y condiciones que se asemejen a la realidad del problema a resolver.

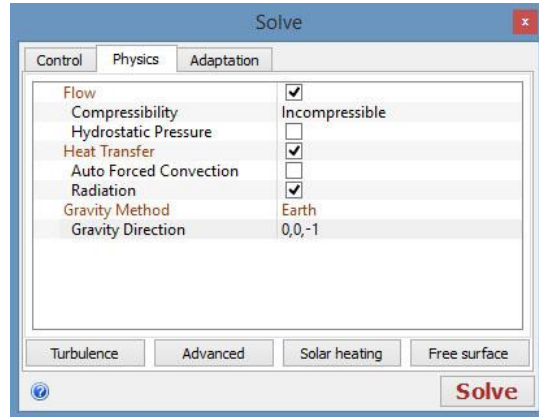


Imagen 12. Solve, Physics.

Se presiona la opción de **Solar heating** y se activa **Enable solar heating** para activar la acción del sol en una ubicación geográfica en específico, seleccionando de las opciones que se pueden desplegar esta ubicación geográfica determinada para la simulación; de no encontrarse por default se puede hacer de manera manual proporcionando la latitud, longitud y GMT del lugar específico, una vez llenados los datos correspondientes se selecciona el botón **OK**.



Imagen 13. Solve, Solar Heating Dialog.

A continuación, se presiona la opción **Advanced** para activar la humedad en **Humidity (moist air)** y se presiona **OK**.

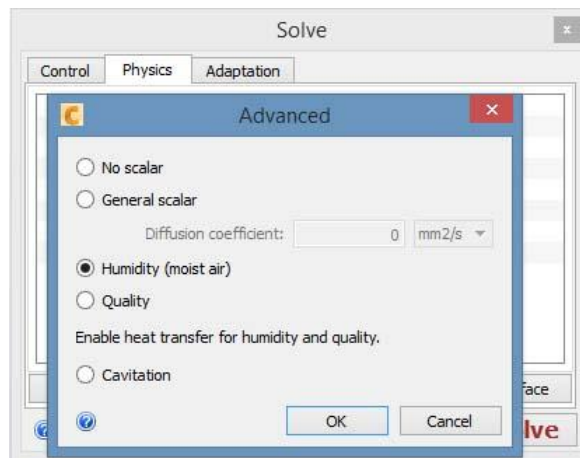


Imagen 14. Solve, Humedad.

Una vez realizados estos cambios se presiona el botón **Solve** para comenzar el proceso de resolver el problema, este proceso puede llevar varias horas dependiendo de la capacidad del equipo, de la cantidad de información, el número de variables consideradas, de los requerimientos solicitados y del número de iteraciones solicitadas.

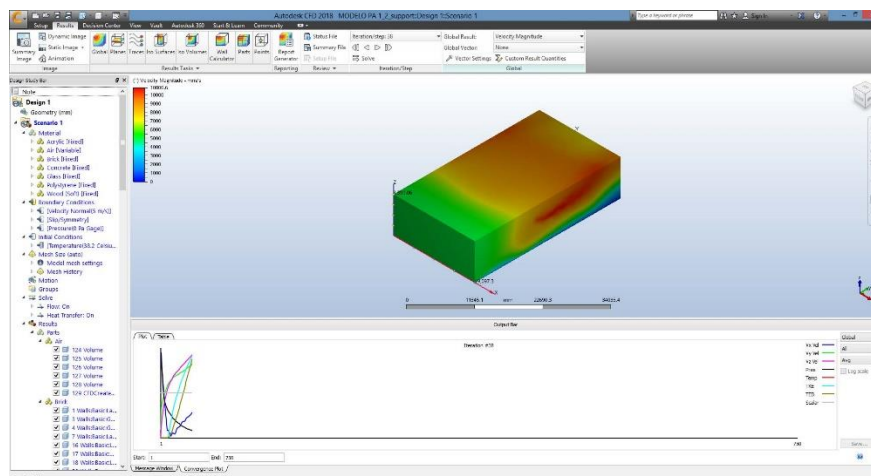


Imagen 15. Proceso de Solve.

9. Una vez terminado el proceso de Solve el programa te manda automáticamente a los resultados, para este paso se selecciona el volumen representativo del viento y con click derecho se selecciona

**Outlines** para poder ver su interior. En la sección de resultados **Results** en **Result tasks**, **Global**, **Global Results** se selecciona la opción de **Velocity Magnitude** o de la variable que se quiera ver representada.

- Después se procede a crear un plano, para esto se selecciona la opción **Planes**, y el símbolo de + de color verde, y se crear el plano, este plano puede ser editado manualmente cambiando su dirección y ubicación, de tal modo que quede a un extremo de la geometría de viento del lado de la dirección del viento.

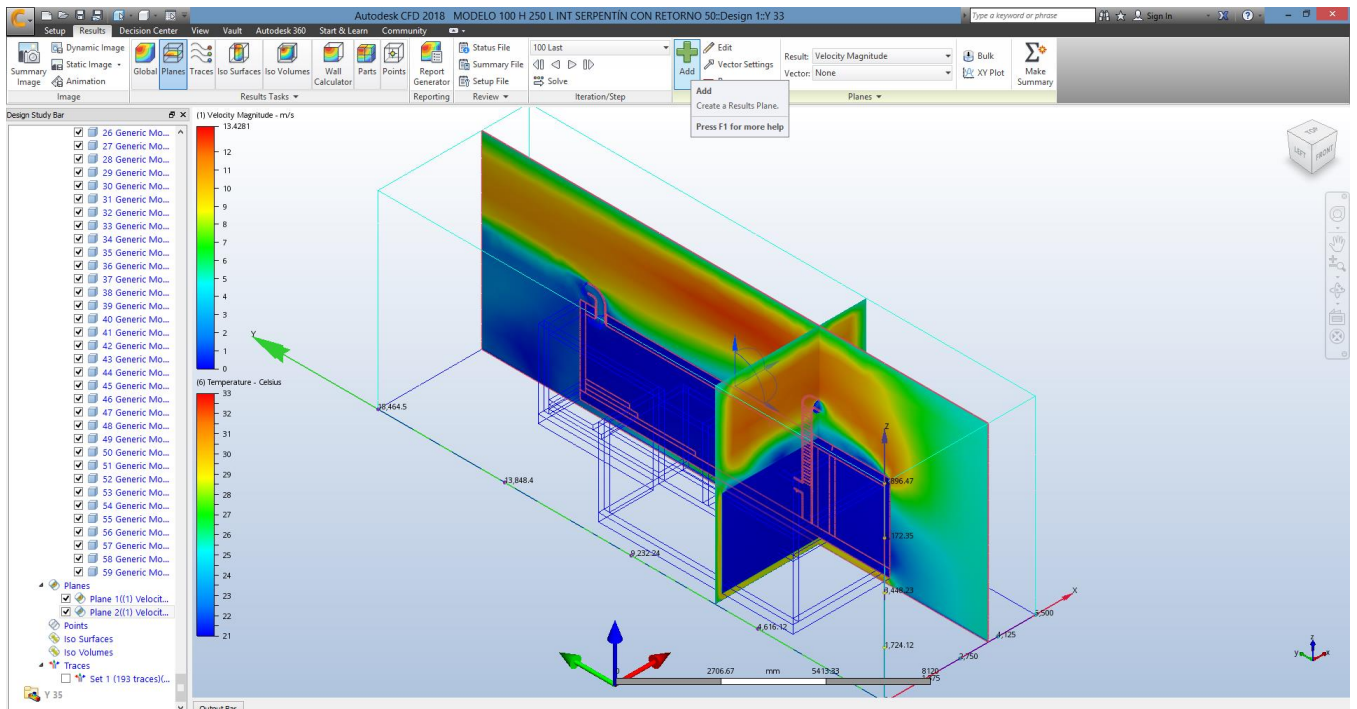


Imagen 16. Crear planos.

- Después de esto se presiona la opción **Traces**, se selecciona el + verde, asegurándose de estar en **Grid Type: Rectangular** o **Points**, y se comienza a dibujar el grid sobre el plano previamente creado. En cuanto se termina de dibujar automáticamente aparece la simulación del viento, la cual se puede editar de tal forma que pueda representarse por líneas, listones, cilindros, etc., de diferentes grosores. Al lado izquierdo aparece una escala de la velocidad del viento de acuerdo con los colores de representación.

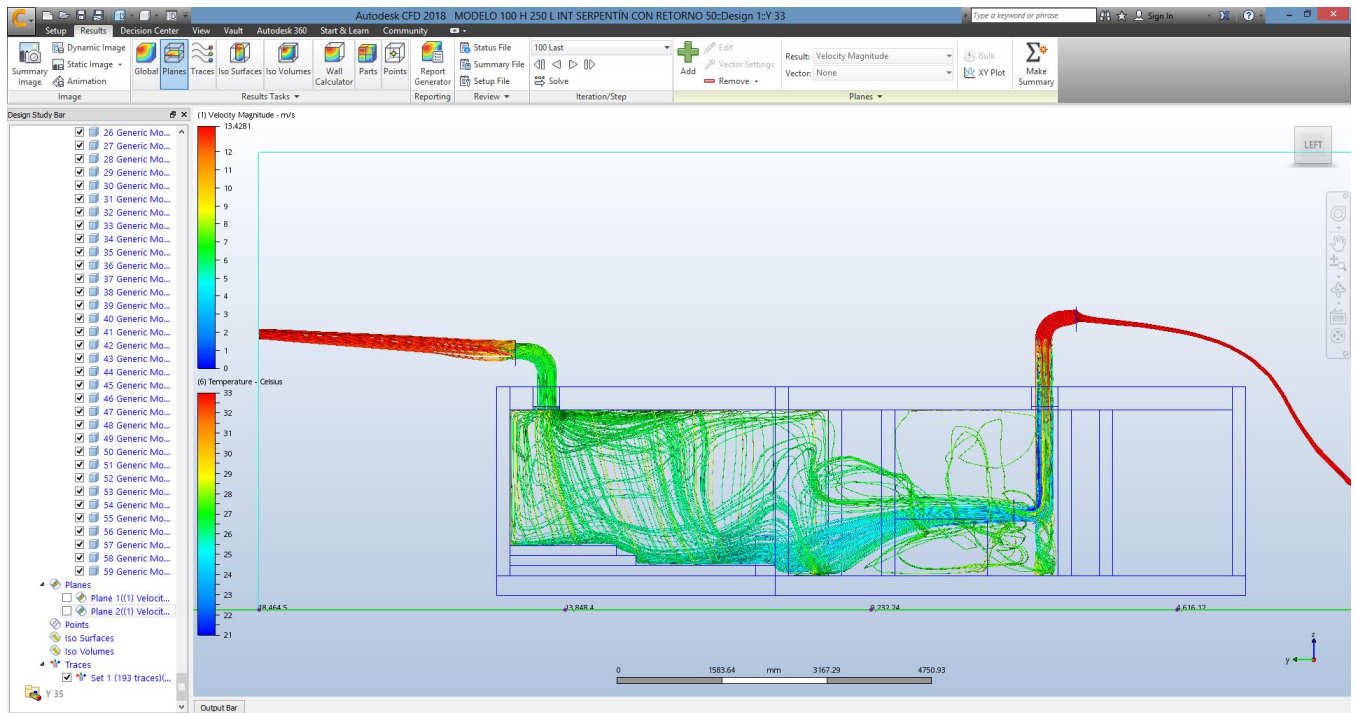


Imagen 17. Resultado.

12. Desde el **Desing Study Bar** que es la barra que se encuentra a la izquierda de la pantalla se pueden realizar modificaciones de las variables, así como ocultar o activar alguna vista o variable. Así como sobre la escala de colores para los resultados, presionando clic derecho con el mouse puedes realizar modificaciones de presentación de resultados como cambiar de gama de colores, unidades, ajustar escalas o modificar leyendas.

Nota: se pueden hacer distintas representaciones de los resultados en un orden y metodología distinta a la presentada aquí, pero en este caso fue la metodología utilizada en el proceso de simulación de este trabajo.