



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

**Propuesta de una estrategia sustentable de deshumidificación de uso
residencial para la ciudad de Poza Rica, Veracruz.**

Trabajo escrito

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Arquitectura

Presenta
Arq. Grecia Díaz Muñiz

Dirigido por:
Dr. Héctor Ortiz Moroy

Querétaro, Qro. a enero 2021



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en arquitectura

**Propuesta de una estrategia sustentable de deshumidificación
de uso residencial para la ciudad de Poza Rica, Veracruz.**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Arquitectura

Presenta

Grecia Díaz Muñiz

Dirigido por:

M. C. Héctor Ortiz Monroy

M. C. Héctor Ortiz Monroy

Presidente

M. C. Verónica Leyva Picazo

Secretario

M. A. S. Aileen Mendoza Pérez

Vocal

M. A. S. José Granados Navarro

Suplente

M. Inés G. Germán Aguilar

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Fecha de aprobación por el Consejo Universitario, enero 2021, México

© 2021- Grecia Díaz Muñiz

Derechos Reservados

AGRADECIMIENTOS

En estas líneas quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que con su soporte científico y humano brindaron el apoyo necesario para hacer posible esta investigación.

En primero lugar, quiero agradecer inmensamente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) por su financiamiento y apoyo constante durante todo el proceso y por la gran oportunidad de crecimiento profesional que me permitieron durante todo el proceso de esta investigación.

De igual manera, expreso mi gratitud a mi Director de Tesis el Maestro Héctor Ortiz Monroy por su incesante ayuda y orientación durante todo el proceso de investigación; a los demás miembros del sínodo: la Maestra Verónica Leyva, la Maestra Aileen Mendoza, el Maestro José Granados y la Maestra Inés Germán, por su tiempo y dedicación. Las aportaciones de todos fueron de mucha importancia para la realización y culminación de este proyecto.

Así mismo, agradezco a toda mi familia, tíos, tíos, primos, todos, por su confianza y apoyo brindado desde lejos a lo largo de mis estudios, en especial a mis padres: Carolina y Javier, gracias infinitas por su cariño y soporte incondicional durante toda mi vida, que me ha incentivado a querer superarme día con día; a mi tío Joaquín, quien me ayudó a hacer realidad las ideas necesarias para lograr este proyecto, a ti Perfect sobre todo gracias por tu enorme paciencia, apoyo y motivación durante toda la maestría, y por ayudarme a asentar las ideas principales de esta investigación.

Finalmente, agradezco a todos mis compañeros de la maestría por su amistad y compañerismo, en especial a Vero, Gaby y Pepe; y a todas las personas que hicieron posible esta investigación, gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	4
ÍNDICE DE CONTENIDO	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	11
ÍNDICE DE FIGURAS.....	13
ABREVIATURAS Y SIGLAS	15
RESUMEN.....	16
ABSTRACT	17
1. INTRODUCCIÓN	18
2. ANTECEDENTES.....	20
2.1 Implicaciones energéticas	22
2.2 Implicaciones ambientales	24
2.3 Implicaciones económicas	25
2.4 Confort	26
2.4.1 Termorregulación del cuerpo.....	27
2.5 Caso de estudio: Poza Rica, Veracruz	28
2.5.1 Clima Aw¹ cálido subhúmedo	29
2.5.2 Sensación térmica	32
2.5.3 Estrategias clima cálido subhúmedo.....	34
2.6 Estrategias o sistemas activos de deshumidificación por desecantes utilizados para obtener confort higrotérmico	39
2.6.1 Tipo de desecante sólido.....	40

2.6.2 Regeneración del material desecante	41
2.6.3 Aplicaciones de tratamiento de aire con materiales desecantes	42
2.6.4 Ventilación mecánica controlada.....	46
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	47
3.1 Marco normativo	47
3.1.1 Normas nacionales.....	47
3.1.2 Normas internacionales.....	49
3.2 Marco conceptual	50
3.3 Confort higrotérmico	53
3.3.1 Principales variables ambientales que influyen sobre el confort higrotérmico	54
3.3.2 Estándares de confort higrotérmico	55
3.4 Deshumidificación	56
3.4.1 Deshumidificación por enfriamiento	57
3.4.2 Deshumidificación desecante	58
3.5 Metodología <i>design thinking</i>	60
4. HIPÓTESIS.....	61
5. OBJETIVOS.....	62
5.1 Objetivo general	62
5.2 Objetivos particulares	62
6. ANÁLISIS DE FACTORES RELEVANTES PARA EL CONFORT HIGROTÉRMICO	62
6.1 Deshumidificación desecante	64
6.1.1 Materiales desecantes	64
6.2 Ventilación mecánica controlada	65

7. METODOLOGÍA	67
7.1 Análisis y síntesis	67
7.1.1 Investigación de campo.....	67
7.1.2 Investigación documental	70
7.2 Ideación	71
7.2.1 Bocetaje	72
7.2.2 Diseño de la estrategia	73
7.3 Prototipado.....	74
7.3.1 Construcción del prototipo.....	74
7.4 Testeo	76
7.4.1 Validación confort higrotérmico.....	76
8. RESULTADOS	80
8.1 Análisis y síntesis	80
8.1.1 Investigación de campo	80
8.1.2 Investigación documental	84
8.2 Ideación	89
8.2.1 Diseño de la estrategia.....	89
8.3 Prototipado.....	95
8.3.1 Construcción del prototipo.....	95
8.4 Testeo	98
8.4.1 Validación confort higrotérmico.....	98
9. VALIDACIÓN ENERGÉTICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL	113
10. CONCLUSIONES.....	118
11. DISCUSIÓN, ALCANCES Y LIMITANTES	119

11.1 Alcances y Limitantes	119
11.2 Futuras investigaciones	119
11.3 Discusión.....	120
12. REFERENCIAS	122
14. ANEXOS	132
ANEXO 1. Encuesta sobre confort higrotérmico y uso de sistemas activos de enfriamiento en la ciudad de Poza Rica, Veracruz.	132
ANEXO 2. Resultados de la encuesta sobre confort higrotérmico y uso de sistemas activos de enfriamiento en la ciudad de Poza Rica, Veracruz.....	134
ANEXO 3. Registro de temperatura y humedad en diversas viviendas de la ciudad de Poza rica, Veracruz.	137
ANEXO 4. Pruebas de adsorción de vapor de agua por materiales desecantes propuestos.	140
ANEXO 5. Pruebas de adsorción y regeneración en un espacio de 50 cm³.	141

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites de confort térmico Fuente: Hinz, González, De Oteiza &Quiroz (1986) citado por Guzmán-Hernández, Franco & Roset (2019)	31
Tabla 2. Escalas de sensaciones térmicas asociadas a TE Fuente: Hetschell (1986) citado por Cervantes Pérez & Barradas Miranda (2010)	34
Tabla 3. Primeros bocetos de la estrategia de deshumidificación sustentable Fuente: Elaboración propia	72
Tabla 4. Encuesta sobre confort higrotérmico en Poza Rica durante el verano 2019 Fuente: Elaboración propia	81
Tabla 5. Promedio de temperatura y humedad al interior de las viviendas de la ciudad de Poza Rica, Ver. Fuente: Elaboración propia	84
Tabla 6. Ciclo de vida de los materiales desecantes propuestos Fuente: Elaboración propia a partir de: Subcretaría de Minería, Dirección General del Desarrollo Minero (2017), Gobierno de España (2020), Coordinación General de Minería, Dirección General de Desarrollo Minero (2013), Tovar & Chargoy, Asociación Mexicana de la Industria Salinera A. C. (2017), Gobierno de España (2019), El Confidencial (2018), Manzo (2020), SAGARPA (2017), Andrade, Campo, & Segura (2014), Ferrandis (2016).refrige	85
Tabla 7. Implicaciones del AC y de la estrategia sustentable de deshumidificación Fuente: Elaboración propia	116
Tabla 8. Registro de temperatura y humedad en vivienda uno Fuente: Elaboración propia	137
Tabla 9. Registro de temperatura y humedad en vivienda dos Fuente: Elaboración propia	137
Tabla 10. Registro de temperatura y humedad en vivienda tres Fuente: Elaboración propia	138
Tabla 11. Registro de temperatura y humedad en vivienda cuatro Fuente: Elaboración propia	138
Tabla 12. Registro de temperatura y humedad en vivienda cinco Fuente: Elaboración propia	139

Tabla 13. Pruebas de adsorción de vapor Fuente: Elaboración propia	140
Tabla 14. Pruebas del prototipo dentro de un espacio Fuente: Elaboración propia	141

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2. Adsorción de vapor de agua de la sal de mar. Fuente: Elaboración propia	88
Gráfico 1. Adsorción de vapor de agua del gel de sílice Fuente: Elaboración propia	88
Gráfico 3. Flujo de niveles de humedad durante el proceso de adsorción mediante gel de sílice 100 gr/10 min Fuente: Elaboración propia	98
Gráfico 4. Flujo de niveles de temperatura durante el proceso de adsorción mediante gel de sílice 100 gr/10 min Fuente: Elaboración propia	99
Gráfico 5. Flujo de niveles de temperatura y humedad durante el proceso de adsorción mediante gel de sílice 100 gr/10 min Fuente: Elaboración propia	100
Gráfico 6. Flujo de niveles de humedad durante el proceso de adsorción mediante gel de sílice 100 gr/60 min Fuente: Elaboración propia	100
Gráfico 7. Flujo de niveles de temperatura durante el proceso de adsorción mediante gel de sílice 100 gr/60 min Fuente: Elaboración propia	101
Gráfico 8. Flujo de niveles de humedad y temperatura durante el proceso de adsorción mediante gel de sílice 100 gr/60 min Fuente: Elaboración propia	101
Gráfico 9. Flujo de niveles de humedad durante proceso de adsorción mediante gel de sílice 200 gr/60 min Fuente: Elaboración propia	102
Gráfico 10. Flujo de niveles de temperatura y humedad durante proceso de adsorción mediante gel de sílice 200 gr/ 60 min Fuente: Elaboración propia	103
Gráfico 11. Flujo de niveles de temperatura durante proceso de adsorción mediante gel de sílice 200 gr/ 60 min.....	103
Gráfico 12. Flujo de niveles de humedad durante proceso de adsorción mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min Fuente: Elaboración propia.	104
Gráfico 13. Flujo de niveles de temperatura durante proceso de adsorción mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min Fuente: Elaboración propia	105
Gráfico 14. Flujo de niveles de temperatura y humedad durante proceso de adsorción mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min Fuente: Elaboración propia.....	105
Gráfico 15. Flujo de niveles de humedad durante proceso de adsorción mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min en un espacio Fuente: Elaboración propia.....	106

Gráfico 166. Flujo de niveles de temperatura durante proceso de adsorción mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min en un espacio	Fuente: Elaboración propia	107
Gráfico 177. Flujo de niveles de humedad y temperatura durante proceso de adsorción mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min en un espacio	Fuente: Elaboración propia	107
Gráfico 18. Flujo de niveles de humedad durante proceso de adsorción y regeneración mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min en un espacio	Fuente: Elaboración propia	108
Gráfico 19. Flujo de niveles de temperatura durante proceso de adsorción y regeneración mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min en un espacio	Fuente: Elaboración propia	109
Gráfico 20. Flujo de niveles de humedad y temperatura durante proceso de adsorción y regeneración mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min en un espacio	Fuente: Elaboración propia	109
Gráfico 21. Flujo de niveles de humedad durante proceso de adsorción y regeneración mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min en un espacio	Fuente: Elaboración propia	111
Gráfico 22. Flujo de niveles de temperatura durante proceso de adsorción y regeneración mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min en un espacio	Fuente: Elaboración propia	111
Gráfico 23. Flujo de niveles de humedad y temperatura durante proceso de adsorción y regeneración mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min en un espacio	Fuente: Elaboración propia	112
Gráfico 24. Filtros durante proceso de adsorción y regeneración	Fuente: Elaboración propia	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de viviendas equipadas con AC en diversos países, 2018 Fuente: The future of cooling, IEA	21
Figura 2. Valores mundiales de aire acondicionado, 1990-1950 Fuente: The future of cooling, IEA	22
Figura 3. Número de equipos de aire acondicionado en viviendas particulares habitadas por tipo de equipo de aire acondicionado Fuente: INEGI. Encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares 2018.....	23
Figura 4 Rango de temperatura anual de Poza Rica, Veracruz. Fuente: Elaboración propia con Climate Consultant.....	30
Figura 5. Humedad relativa y bulbo seco anual de Poza Rica, Veracruz. Fuente: Elaboración propia con Climate Consultant.....	30
Figura 6. Diagrama psicométrico de Olgay de la ciudad de Poza Rica, Ver. Fuente: Elaboración propia.....	32
Figura 7. Diagrama psicométrico de la ciudad de Poza Rica, Ver. Fuente: Elaboración propia con Climate Consultant.....	36
Figura 8. Estrategias de asoleamiento. Fuente: Climate Consultant.....	37
Figura 9. Estrategia de ventilación cruzada. Fuente: Climate Consultant.	38
Figura 10. Fachada desecante Fuente: Fernández, et al. (2015)	42
Figura 11. Estrategia de deshumidificación con sales desecantes. Fuente: Neila (2014)	45
Figura 12. Instalación en ventana del sistema de ventilación mecánica controlada Fuente: Instructivo Thesan (2018)	46
Figura 13. Dispositivo de ventilación mecánica controlada con intercambiador de calor. Fuente: Instructivo Aircare ES Thesan (2018).....	47
Figura 14. Proceso del Design Thinking Fuente: Desighnthinking en español	60
Figura 15. Fachada interior del prototipo de la estrategia de deshumidificación sustentable Fuente: Elaboración propia	75
Figura 16. Mapa de Poza Rica con las casas seleccionadas Fuente: Google Maps	83

Figura 17. Prototipo final de la estrategia de deshumidificación sustentable desde una vista en planta Fuente: Elaboración propia.....	90
Figura 18. Diagrama de la etapa 1 del ciclo de funcionamiento de la estrategia sustentable de deshumidificación desde una vista en planta Fuente: Elaboración propia.....	91
Figura 19. Primera etapa del ciclo de funcionamiento Fuente: Elaboración propia	92
Figura 20. Diagrama de la etapa 2 del ciclo de funcionamiento de la estrategia sustentable de deshumidificación desde una vista en planta Fuente: Elaboración propia.....	92
Figura 21. Segunda etapa del ciclo de funcionamiento Fuente: Elaboración propia	93
Figura 22. Tercera etapa del ciclo de funcionamiento Fuente: Elaboración propia.....	93
Figura 23. Diagrama de la etapa 3 del ciclo de funcionamiento de la estrategia sustentable de deshumidificación desde una vista en planta Fuente: Elaboración propia.....	93
Figura 242. Tercera etapa del ciclo de funcionamiento Fuente: Elaboración propia.....	94
Figura 25. Imágenes del prototipo construido Fuente: Elaboración propia	95
Figura 26. Imágenes representativas del prototipo instalado en una vivienda Fuente: Elaboración propia	96
Figura 27. Imágenes representativas del prototipo instalado en una ventana desde una vista en corte Fuente: Elaboración propia	97

Dirección General de Bibliotecas UACJ

ABREVIATURAS Y SIGLAS

CO2: Dióxido de carbono

CONAVI: Comisión Nacional de la Vivienda

COP 21: Conferencia de las Partes

HFC: Hidrofluorocarbonos

HVAC: Heating, Ventilation and Air Conditioning

IEA: International Energy Agency (Agencia Internacional de Energía)

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

OMS: Organización Mundial de la Salud

ONU: Organización de las Naciones Unidas

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

VMC: Ventilación Mecánica Controlada

RESUMEN

La búsqueda de confort térmico al interior de las viviendas ha provocado el aumento de uso de sistemas activos de enfriamiento, los cuales conllevan implicaciones energéticas, económicas y ambientales negativas por su alto consumo de energía; a pesar de que existen estrategias pasivas que podrían evitar o disminuir el uso de estos equipos, son frecuentemente ignoradas durante el proceso de diseño e implementarlas en viviendas existentes puede generar modificaciones costosas. Las regiones tropicales, con clima cálido húmedo, como el caso de la ciudad de Poza Rica, Veracruz, son uno de los principales consumidores de energía por sistemas de enfriamiento, debido a los altos niveles de humedad y temperatura que las caracterizan, lo que complica obtener confort térmico; es por esto que esta investigación plantea una estrategia basada en la deshumidificación y la ventilación mecánica controlada como parte de una propuesta sustentable alternativa a los sistemas de enfriamiento utilizados convencionalmente, y que igualmente sea viable para espacios nuevos o existentes sin involucrar grandes modificaciones en el diseño de la vivienda. Para lo cual se plantea mediante el uso de la metodología del *design thinking*, una serie de experimentos exploratorios con materiales desecantes y ventilación mecánica para determinar el nivel de adsorción de humedad del ambiente de los desecantes y el desempeño energético de la estrategia. El resultado de esta investigación es un prototipo sustentable que representa una menor impacto energético, económico y ambiental, y dinámico en cuanto a instalación por lo que pudiera aplicarse más fácilmente en viviendas existentes cumpliéndose así la hipótesis de la investigación.

(**Palabras clave:** Confort térmico, clima cálido húmedo, estrategias sustentables, deshumidificación, ventilación mecánica)

ABSTRACT

The search for thermal comfort inside homes has led to an increase in the use of active cooling systems, which have negative energy, economic and environmental implications due to their high energy consumption; Although there are passive strategies that could avoid or reduce the use of this equipment, they are frequently ignored during the design process and implementing them in existing homes can generate costly modifications. Tropical regions, with a hot humid climate, such as the case of Poza Rica, Veracruz, are one of the main cooling systems energy consumers, due to the high levels of humidity and temperature that characterize them, which complicates obtain thermal comfort; That is why this research proposes a strategy based on dehumidification and controlled mechanical ventilation as part of a sustainable alternative proposal to the conventionally used cooling systems, and that is also viable for new or existing spaces without representing major modifications in the design of the house. For which it is proposed through the design thinking methodology, a series of exploratory experiments with desiccant materials and mechanical ventilation to determine the level of moisture adsorption from the desiccants environment and the energy performance of the strategy. The result of this research is a sustainable prototype that represents a lower energy, economic and environmental impact, and a dynamic design in terms of installation, so it could be applied more easily in existing homes, thus validating the research hypothesis.

(Keyword: Thermal comfort, hot humid weather, sustainable strategies, dehumidification, mechanical ventilation)

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se diseña cualquier espacio arquitectónico es importante considerar todos y cada uno de los parámetros relacionados con el diseño, desde lo estético y lo funcional hasta pasar por las necesidades fisiológicas de los usuarios, todo esto con el fin de brindar el mayor confort posible a los usuarios.

Es el confort el que ayuda a los espacios arquitectónicos a brindar bienestar físico y fisiológico, por todos los factores biofísicos y constructivos que incorpora (Asiaín Alberich, 2003). Dependiendo del factor con el que se involucre, puede tratarse de un diferente tipo de confort, térmico si se involucra la temperatura, lumínico si se habla de luz o acústico en cuestión de sonidos, entre otros más. En el caso particular de esta investigación, el tipo de confort del que se hablará es el térmico, específicamente el higrotérmico. El confort higrotérmico, involucra dos parámetros ambientales importantes: la temperatura y la humedad, parámetros comunes de encontrar en ambientes de climas cálido-húmedos, ambos generalmente en grandes proporciones, ya que este tipo de climas se caracterizan por presentar altas temperaturas diurnas y nocturnas, sobre todo en verano, y por su elevada humedad ambiental casi todo el año (Asiaín Alberich, 2003).

La presencia de estos dos parámetros ambientales en grandes cantidades y al mismo tiempo, tiene como consecuencia una inconformidad higrotérmica para los usuarios, ya que como menciona Fernández (1994) cuando los niveles de humedad en el ambiente sobrepasan el 80% en un día de calor, la percepción de calor aumenta, lo que afecta negativamente la sensación higrotérmica en los espacios, al impedir la correcta evaporación de agua del cuerpo humano, dando paso al bastante inconfortable calor húmedo, conocido coloquialmente como sensación de bochorno. Esto mismo puede llegar a afectar negativamente el comportamiento humano, diferentes estudios, como los realizados por Tsutsumi, Tanabe, Harigaya, Iguchi, & Nakamura (2007) han comprobado que una humedad neutra (40-70%) es preferible para mejorar el confort y la productividad del usuario, ya que unos bajos niveles también pueden afectarlos negativamente. Es por esto que en regiones de clima cálido-húmedo los principales

consumidores de energía son los aires acondicionados, los cuales son altamente utilizados a pesar de los altos costos operativos, económicos y energéticos que implican (Bula & Méndez, 2004).

La ciudad de Poza Rica, Veracruz, lugar del caso de estudio, se trata de una zona de clima cálido subhúmedo en donde las condiciones higrotérmicas se encuentran generalmente fuera del rango de confort, por lo cual es importante tomar en consideración los parámetros ambientales al diseñar, de manera que se puedan implementar las estrategias pasivas existentes que permitan otorgar el confort higrotérmico con el menor uso de sistemas activos, como lo son el aire acondicionado, lamentablemente estos criterios bioclimáticos son frecuentemente ignorados en el proceso de diseño por diversas razones, económicas, de desconocimiento o a consecuencia de la globalización arquitectónica donde muchas veces se diseña y construye replicando tendencias universales e ignorando el contexto natural (Bravo, 2014), por lo que finalmente el espacio no cumple con las exigencias de los ocupantes, lo que contribuye al incremento masivo de los sistemas de aire acondicionado, sobre todo en los meses de verano, lo que afecta al consumo de energía de los usuarios.

Este aumento en el consumo de energía desemboca en un impacto económico y de huella de carbono negativo, y México se ha comprometido a reducir las emisiones de carbono negro en un 51% y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 22% para el 2030, según lo acordado en la ONU, COP 21 y el Acuerdo de Paris, sin embargo, esto aún no es suficiente ya que, en comparación con otros países, México, tiene la necesidad de apertura aún más políticas en cuestiones energéticas, con el fin de implementar el desarrollo sustentable en el país (Bautista Vargas et al., 2016). Países industrializados están optando por sistemas desecantes, que ayuden a disminuir el contenido de humedad en el ambiente, lo cual se refleja en una disminución del consumo de energía de los sistemas de aire acondicionado, al mismo tiempo que ayuda a alargar su vida útil, ya que los sistemas convencionales de aire acondicionado a pesar de tener la capacidad de combatir la carga sensible (variación de temperatura) y la carga latente (disminución de contenido de agua), usualmente la humedad, es decir, la carga latente, no está controlada directamente por el

sistema, sino que es el resultado involuntario al combatir la carga sensible.

Debido a lo anterior, la presente investigación muestra el proceso de creación de una estrategia de deshumidificación desecante para casas habitación, que busca brindar una alternativa fácil de utilizar y entender por el público general, y qué además sea sustentable y más económica en comparación con los sistemas tradicionales de aire acondicionado.

2. ANTECEDENTES

A medida que aumenta la población mundial, la demanda energética incrementa con ella y uno de los mayores causantes de este aumento es el uso de sistemas activos de enfriamiento (International Energy Agency, 2018) utilizados para combatir el incremento de ganancias térmicas al interior de las viviendas y para satisfacer las altas exigencias actuales de los ocupantes de los edificios y viviendas de alcanzar sus requisitos de confort térmico o higrotérmico, sobre todo en climas cálidos y en temporada de verano (Fernández García, 1994), donde el uso del aire acondicionado se ha vuelto bastante común.

El aumento de demanda energética va de la mano muchas veces con un impacto negativo tanto ambiental como económico. A pesar de que el uso de aire acondicionado como forma de mejorar el confort térmico o higrotérmico este concentrado en una pequeña cantidad de países, como se puede observar en la Figura 1, no implica que permanecerá así por siempre, de hecho, las ventas de aires acondicionados han aumentado rápidamente en países con economía emergente.

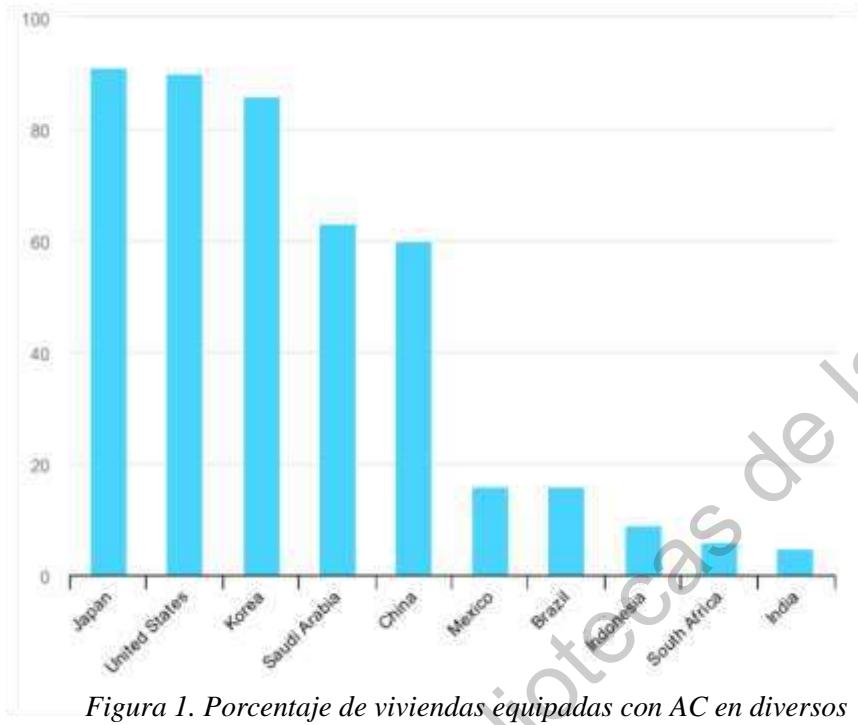


Figura 1. Porcentaje de viviendas equipadas con AC en diversos países, 2018 Fuente: *The future of cooling, IEA*

Las regiones de clima cálido y tropical representan la mayor demanda energética por uso de sistemas de enfriamiento, ya que en ellas las condiciones de calor son predominantes, por ejemplo, en México estas condiciones representan dos tercias partes de la superficie nacional, por lo que se concluye que el problema a resolver en cuanto a confort térmico es el calor (Morillón, 2011).

En la Figura 1 se aprecia que el porcentaje de viviendas equipadas con algún sistema de enfriamiento en México es de un 16%, por lo que no es de los más altos, pero considerando que el clima predominante en el país es el cálido, ya sea seco o húmedo, lo más probable es que no se conserve en esa cantidad si no que la aumente, de hecho de acuerdo con IEA (2018) para el 2050 alrededor de dos tercias partes de las viviendas alrededor del mundo contarán con aire acondicionado, con un estimado de 126 millones de unidades tan solo para México, representado con el color naranja en la Figura 2.

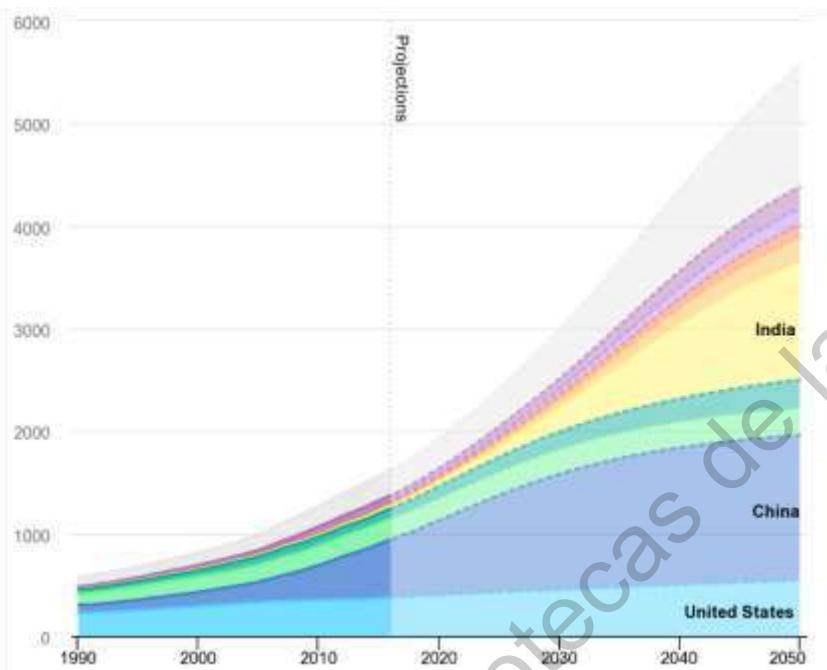


Figura 2. Valores mundiales de aire acondicionado, 1990-1950 Fuente: The future of cooling, IEA

2.1 Implicaciones energéticas

De acuerdo con la IEA el uso de energía para enfriamiento se ha duplicado desde el año 2000, lo que ha convertido a este tipo de uso final de energía en el de más rápido crecimiento en edificios. Tanto así que el uso de aires acondicionados y ventiladores eléctricos representa una quinta parte de la electricidad total en edificios en todo el mundo y el 20% de todo el consumo mundial de electricidad.

Y según las proyecciones para el 2050 la demanda energética para enfriamiento de hogares u oficinas se triplicará, siendo la de mayor crecimiento comparada con otros usos de energía eléctrica. Tan solo durante el 2018 fue de 2075 TWH.

México

En México el 45% de las viviendas habitadas en zonas urbanas y el 41% en zonas rurales cuentan con ventiladores para mejorar su nivel de confort higrotérmico, y en muchas viviendas cuentan con más de un equipo. En cuestión de sistemas de aire acondicionado se contabilizan alrededor de 7 millones de equipos en todas viviendas particulares del país, siendo el Mini Split el preferido por un 45% en todo el país, mientras que el Mini Split inverter el cual se considera una tecnología más eficiente se ubica en tercer lugar con solo el 16% de consumo (Instituto Nacional de Estadística y Geografía , 2018).



Figura 3. Número de equipos de aire acondicionado en viviendas particulares habitadas por tipo de equipo de aire acondicionado Fuente: INEGI. Encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares 2018

Como se observa existe una gran cantidad de equipos de enfriamiento el país, lo que acarrea una alta demanda de energía y tan solo el 0.25% de las viviendas utilizan energía solar como fuente alternativa de electricidad ya sea de manera exclusiva o híbrida (solar y red pública), por lo que se comprende la mayoría procede de redes públicas que generan grandes impactos ambientales.

2.2 Implicaciones ambientales

Los sistemas de enfriamiento de los espacios interiores son responsables de emisiones de HFC, otros refrigerantes, CO₂ y carbono negro, tan solo durante el 2019 fueron los causantes de aproximadamente 1 GtCO₂, incrementando exponencialmente la contaminación del aire, la cual puede afectar gravemente la salud de los seres humanos, de hecho en el año 2012 la OMS declaró la contaminación del aire como la responsable de 3.7 millones de muertes en el planeta derivado de diversas enfermedades como: enfermedad pulmonar obstructiva crónica, cáncer de pulmón, entre otras (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018).

La mayor parte de estos decesos se registraron en otras partes de mundo, por ejemplo, cerca del 70%, ocurrió en los países de la región Pacífico occidental y el sureste de Asia (1.67 millones y 936 000 muertes, respectivamente), sin embargo, en el continente americano no se queda atrás pues se registraron cerca de 58 000 decesos (WHO, 2014) debido a esto.

El problema del uso de sistemas de enfriamiento activos, es que a pesar de que existen equipos eficientes los consumidores no los están comprando, si no que de acuerdo con datos de la IEA (2018) los aires acondicionados más consumidos son dos o tres veces menos eficientes que el mejor modelo que se encuentre disponible, también posiblemente debido a la falta de mejores estándares de eficiencia energética para los aires acondicionados, y a que muchos usuarios se ven obligados a utilizar sistemas de enfriamiento activo debido a la falta de implementación de estrategias activas de enfriamiento en el diseño de sus viviendas.

México

México participa en acuerdos internacionales contra el cambio climático, participa en actividades de la Agenda 21, ONU. También, ha decretado la Ley General de Cambio Climático (2012), en la cual, se crea el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático; así mismo, la Ley de Transición Energética (2015), la cual establece las bases para un cambio

hacia las energías renovables, y ha entrado en el Acuerdo de París que entró en vigor en el 2016 y sustituirá al acuerdo de Kioto, el cual concluye su segundo periodo de compromisos en el 2020 (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2018).

2.3 Implicaciones económicas

Los sistemas de enfriamiento llegan a tener diferentes impactos en el ambiente económico, uno de ellos es debido a los problemas de salud que provocan a la población, los cuales representan un incremento del presupuesto debido a que los problemas de salud de la población generan tanto la disminución de la productividad como un incremento del presupuesto que debe destinarse a los gastos en salud, afectando finalmente la competitividad de los países. El Banco Mundial ha estimado que el impacto al Producto Interno Bruto (PIB) en los países de América Latina como consecuencia de las afectaciones a la salud por la emisión de contaminantes a la atmósfera es de alrededor del 2% (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales , 2018).

Otro es causado por el costo energético que representan, ya que el enfriamiento de una habitación puede suponer una subida en la factura de luz eléctrica (García, 2018).

México

De acuerdo con un informe de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales , 2018) en 2010 el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático evaluó el impacto económico y sobre la salud de la calidad del aire en las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey, encontrando que si se cumplieran los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud para la concentración de partículas PM se evitarían pérdidas económicas por 45 000 millones de pesos y 2 170 muertes prematuras.

Además del impacto económico por el uso energético que conlleva, de acuerdo con datos del INEGI (2018) en México el porcentaje del uso tanto de aires acondicionados como de otros sistemas de enfriamiento o de confort, como los ventiladores, ronda entre cinco y nueve horas al día, lo que aumenta considerablemente el uso de energía lo que consecuentemente eleva el consumo energético y aún más si se trata de sistemas convencionales sin control de humedad (Fernández, 2015).

Todas las implicaciones antes mencionadas se podrían disminuir si se incorporaran los criterios bioclimáticos o sustentables durante el proceso de diseño tanto de alguna vivienda como cualquier otro tipo de edificación, de hecho, los beneficios de incorporar estos criterios se han calculado, por ejemplo, durante el proyecto piloto del programa Vivienda Sustentable de CONAVI se estimaron los beneficios que se obtendrían por incorporar criterios de diseño bioclimático en 5000 viviendas de interés social en lugar de climatizarlas mediante aire acondicionado, cuya energía fuera de origen fósil; los resultados que se obtuvieron se reflejaron en un ahorro de energía de 4,807 MWh lo que se traducía en un ahorro económico arriba de nueve millones de pesos y además se dejaban de emitir 3,342.49 TON de CO₂ (Morillón, 2011). Todo esto demuestra las ventajas de utilizar estrategias bioclimáticas o sustentables, las cuales dan paso a nulas o menos implicaciones energéticas, ambientales y económicas comparándolas con los sistemas de enfriamientos actualmente utilizados.

2.4 Confort

El “confort” siempre ha sido una de las prioridades a la hora de construir cualquier refugio, pero su significado ha cambiado a través de los años, en los 60’s de acuerdo con el texto de “A Home is not a House” de Baham Reyner (2012) citado por Arrieta & Maristany (2018, pág. 01.24) se relacionaba con la idea de energía y tecnología y cómo éstas podrían resolver la vida de las personas, pero para los años 90’s inició un cambio de perspectiva, fue aquí cuando comenzaron los pensamientos hacia una “Arquitectura Verde” la cual tuviera una relación amigable con el entorno, es así que el término confort se empieza a relacionar con los parámetros ambientales.

Para comprender mejor se comenzará por definir confort térmico de acuerdo con distintos autores:

“El confort térmico se puede definir como la sensación de bienestar que brindan los espacios arquitectónicos” (Asiaín Alberich, 2003, pág. 2).

“Cuando el balance térmico arroja un valor cero, es decir cuando el cuerpo humano no gana ni cede calor, significa, según este enfoque, (Cuantitativo) que las personas experimentan objetivamente una sensación térmica de confort.” (Gómez-Azpeitia et al., 2007, p. 46) citado por (Arrieta & Maristany, 2018, pág. 01.24).

Y de acuerdo con Godoy (2012, pág. 1) en los últimos años se ha visto influenciado por los avances en ingeniería de enfriamiento artificial a pesar de que la arquitectura bioclimática presenta alternativas pasivas para lograr el confort, debido a su poca consideración en el proceso de diseño se ha acrecentado el uso de estos sistemas aumentando el consumo energético.

2.4.1 Termorregulación del cuerpo

El ser humano tiene la capacidad de mantener su temperatura interior, a 37°C, y la habilidad de adaptarse a las condiciones climáticas de la naturaleza gracias a mecanismos autorreguladores del cuerpo, los cuales generan respuestas fisiológicas para contrarrestar cualquier desequilibrio térmico. De acuerdo con estudios de la Universidad Politécnica de Catalunya (2018) el centro termorregulador del cuerpo, se localizan en la piel y en el cerebro específicamente en el hipotálamo, estos mecanismos autorreguladores que se activan para contrarrestar las inclemencias climáticas dependerán del tipo de clima, es decir, si es un ambiente caluroso o frío.

En un ambiente caluroso:

- Aumentará el flujo sanguíneo: la sangre actúa como el agua del radiador del coche, transporta el calor por nuestro organismo y se disipa a través de la piel al exterior.
- Se activa la sudoración: si el incremento del flujo sanguíneo no es suficiente, se activa la sudoración y mediante su evaporación nuestro cuerpo se refrigerará. Por cada gramo de sudor evaporado nos refrigeraremos unas 600 calorías. En un ambiente frío:
 - Disminuye el flujo sanguíneo: para conservar más el calor interno
 - Tremblamos para generar calor: El temblor es un mecanismo de defensa de nuestro organismo frente al frío (Universidad Politécnica de Catalunya, 2018).

Como se entiende, el balance térmico depende principalmente del metabolismo, pero en lugares de climas cálidos y húmedos como lo es en el caso de estudio, muchas veces estos mecanismos autorreguladores no son suficientes, por lo que es necesario el uso de estrategias pasivas o activas para lograr el confort térmico.

2.5 Caso de estudio: Poza Rica, Veracruz

Para obtener un análisis más detallado del problema de confort higrotérmico en las ciudades con climas cálido subhúmedo, se analizó el caso de estudio de la ciudad de Poza Rica, Veracruz, México.

En México existe una gran diversidad climática que se debe a la conjunción de diversas variables, como lo son el hecho de estar dividido por el Trópico de Cáncer, lo que se separa al país en dos zonas: tropical y templada, también cuenta con un relieve variado a lo largo de su extensión y la presencia de océanos, estas variables son las responsables de la existencia de diversos tipos de clima en el país.

El estado de Veracruz también presenta una gran diversidad climática en sí mismo, debido a su posición geográfica intertropical pero cerca (a un grado) del límite del Trópico de Cáncer, a su altitud y a su relieve característico por sus grandes contrastes. Veracruz tiene un tipo de clima cálido subhúmedo Aw (de acuerdo con la clasificación Köppen), este tipo de clima comprende tres subtipos que se distribuyen a lo largo del estado, los cuales son: Aw⁰ que es más seco, Aw¹ de nivel intermedio y Aw² que es el más húmedo, en los cuales el gradiente de humedad esta dado por el índice de humedad de Lang o P/T (Soto, Gama, & Gómez, 2001).

Poza Rica está ubicada en la zona centro del estado de Veracruz, en las coordenadas 20° 32" latitud norte y 97° 27" longitud oeste, a una altura de 50 msnm por lo que corresponde al subtipo Aw¹ (Soto, Gama, & Gómez, 2001), que representa al clima cálido subhúmedo de nivel intermedio.

2.5.1 Clima Aw¹ cálido subhúmedo

El clima cálido subhúmedo se caracteriza por temperaturas medias elevadas con poca oscilación entre el día y noche, con un alto nivel de humedad y con precipitaciones constantes a lo largo del año (Asiain Alberich, 2003).

La ciudad de Poza Rica tiene una temperatura promedio anual que ronda entre los 24° y 27° C de acuerdo con datos del *Climate Consultant* (Figura 4), sin embargo, la máxima puede alcanzar casi los 40° C. Las mayores temperaturas se registran entre los meses de abril y agosto, y un parte del mes de septiembre, lo que sería casi la mitad del año durante la cual el promedio de temperatura se encuentra fuera de la zona de confort marcada por el programa.

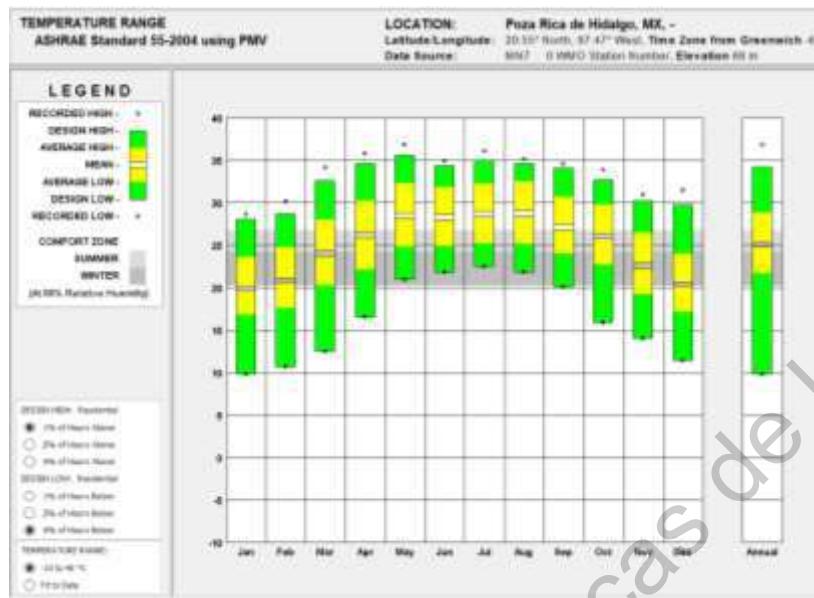
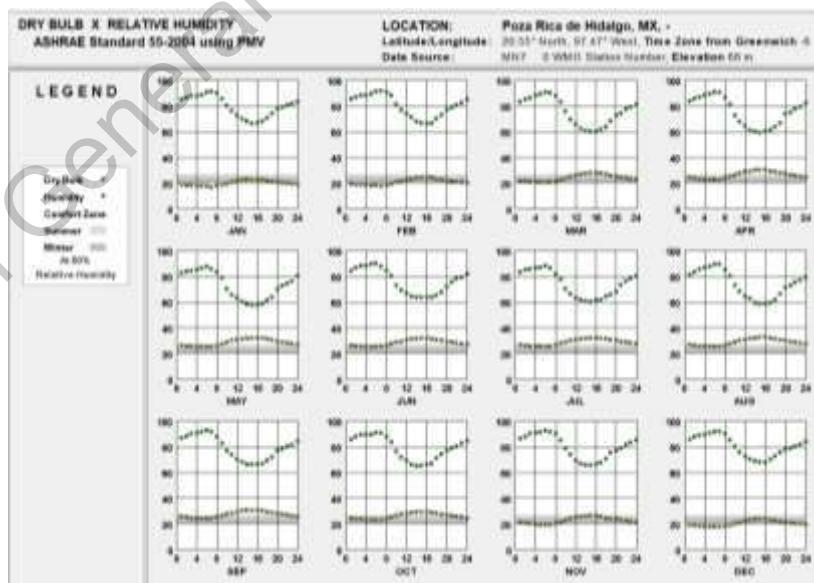


Figura 4 Rango de temperatura anual de Poza Rica, Veracruz. Fuente: Elaboración propia con Climate Consultant.

En cuanto a los datos de porcentaje de humedad todos los meses del año cuentan entre 60 y 90% de humedad relativa, sobre todo por las mañanas, donde sobre pasa el 80%, lo que la convierte en humedad absoluta.



*Figura 5. Humedad relativa y bulbo seco anual de Poza Rica, Veracruz.
Fuente: Elaboración propia con Climate Consultant.*

A pesar de que en México no existe por el momento un estándar para el confort térmico y mucho menos higrotérmico, el confort térmico ha sido ampliamente estudiado no solo en el ámbito de la arquitectura, sino también en otros campos, por lo que existen diversos estándares para lograrlo que han sido determinados por diferentes autores (Guzmán-Hernández, Franco, & Roset, 2019), como los que se muestran a continuación:

<i>Autor</i>	<i>Temperatura °C</i>	<i>Humedad</i>	<i>Aplicación</i>
<i>Giovoni</i>	21-26	5-17 mmHg	General
<i>Olgay</i>	23.9-29.5	20-75% HR	Trópicos
<i>ASHRAE</i>	21.6-26.6	4-14 mmHg	General
<i>Yaglou</i>	18.8-23.8	30-79% HR	USA
<i>ISO 7730</i>	20-26	50%	España

Tabla 1. Límites de confort térmico Fuente: Hinz, González, De Oteiza & Quiroz (1986) citado por Guzmán-Hernández, Franco & Roset (2019)

Como mencionan Guzmán *et al.* (2019), Víctor Olgay fue quien propuso los límites de confort térmico que mejor se adaptan al tipo de clima cálido subhúmedo, dado que está definido para los trópicos, y de acuerdo con este, para que el usuario encuentre un ambiente confortable higrotérmicamente hablando, la temperatura debe rondar entre los 23.9° C y los 29.5 ° C, mientras que la humedad relativa debe estar en los 20 y 75%. Al comparar los datos establecidos como límites de confort por Olgay, con los arrojados por el programa *Climate Consultant* sobre la ciudad de Poza Rica, se observa que el rango de humedad sobrepasa los límites de confort térmico de Olgay prácticamente todo el año.

De la misma forma, al ingresar los datos climáticos de un año típico en la ciudad de Poza Rica, Veracruz al diagrama psicométrico de Olgay (Figura 6), se observa que la mayor parte del año se encuentra fuera de la zona de confort marcada en el diagrama, sobre todo en temporada de verano, de hecho, solo los meses de noviembre, diciembre y enero alcanzan unos pocos momentos de confort climático.

Lo expuesto anteriormente nos indica que en climas ubicados en los trópicos la temperatura y la humedad son variables predominantes, por lo que es importante que se consideren si se desea obtener el confort adecuado.

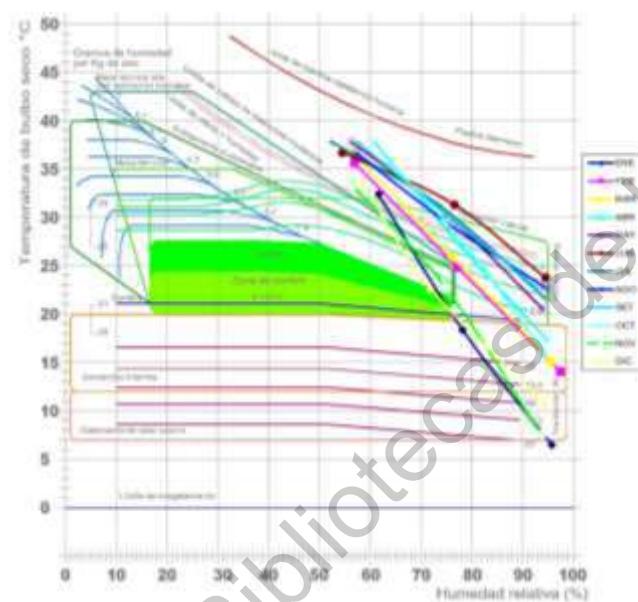


Figura 6. Diagrama psicométrico de Olgyay de la ciudad de Poza Rica, Ver. Fuente: Elaboración propia.

2.5.2 Sensación térmica

El hecho de que el ser humano encuentre el confort adecuado involucra muchos factores, como los físicos, fisiológicos, emocionales, sociales, entre otros. Siendo las variables meteorológicas que mayor influencia tienen sobre él, las siguientes: temperatura del aire, velocidad del viento y humedad, (Cervantes Pérez & Barradas Miranda, 2010) siendo dos de ellas las de mayor influencia en climas cálido-húmedos, como se ha mencionado previamente.

Por esto mismo, se realizó un cálculo de sensación térmica de la ciudad de Poza Rica, por medio de los índices de sensación térmica empírica Temperatura Efectiva (TE) propuestos por Missernard (1937) citado por Cervantes Pérez & Barradas Miranda (2010), los cuales

involucran las dos variables físicas en este tipo de clima, la temperatura y la humedad. La Temperatura Efectiva (TE) se calcula de la siguiente manera:

$$TE = T - 0.4(T-10)(1 - HR/100) [^{\circ}C] -$$

Donde:

T= Temperatura del aire (°C)

HR= Humedad relativa del aire (%)

Para el análisis se realizaron dos ejemplos, en el primer caso se eligió un día promedio y se contrastó con un día extremo, tomando los datos arrojados por el programa *Climate Consultant* como base. Para el día promedio la temperatura correspondiente es de 27°C y la humedad relativa de 80%, obteniendo así una Temperatura Efectiva de 25.64; ahora tomando el día más extremo, la temperatura máxima alcanzada es de 38°C y la humedad relativa máxima de 95% aproximadamente, lo que da como resultado una Temperatura Efectiva de 37.44.

Considerando estos resultados de TE en una escala de sensación térmica (Tabla 2) se aprecia que tanto el día promedio como el día extremo se encuentran fuera del rango considerado como confort térmico.

Rangos de la TE	Sensación Térmica
>30	Calor pesado
24 a 30	Calor moderado
18 a 24	Calor placentero
12 a 18	Placentero
6 a 12	Fresco
0 a 6	Muy fresco
-6 a 0	Frío ligero
-12 a -6	Frío

-18 a -12	Muy frío
-24 a -18	Frío intenso
< -24	Peligro de congelación

Tabla 2. Escalas de sensaciones térmicas asociadas a TE Fuente: Hetschell (1986) citado por Cervantes Pérez & Barradas Miranda (2010)

2.5.3 Estrategias clima cálido subhúmedo

Cuando se comienza a diseñar es importante tener como objetivo lograr el bienestar térmico, acústico y lumínico de los usuarios. Esto es posible lograr mediante técnicas de acondicionamiento ambiental pasivas, las cuales cumplirán con el aprovechamiento óptimo de los recursos climáticos, aprovechándolos cuando sean favorables o brindando protección de ellos.

Existen estrategias pasivas de climatización aplicables para los climas cálidos y húmedos, que ayudan a generar un menor impacto ambiental y energético, al permitir el reducir el uso de sistemas de enfriamiento mecánicos.

Asiain (2003) menciona en “Estrategias Bioclimáticas en la Arquitectura” algunos aspectos importantes a considerar en el diseño en climas cálido húmedos y sus subtipos, como lo son:

- Protección de la radiación directa y difusa: persianas, celosías, voladizos, entre otros.
- Ventilación diurna y nocturna
- En climas muy húmedos es recomendable las edificaciones elevadas sobre el terreno, para favorecer la circulación del aire lo que ayudará a disminuir el nivel de humedad en el interior.
- Formas dispersas (poco compactas) para facilitar la ventilación y aumentar la refrigeración nocturna.
- Cubiertas y fachadas sobrepuestas y ventiladas para el enfriamiento del edificio.
- Grandes alturas para la estratificación del aire caliente.

Guimarães (2008) también menciona la ventilación cruzada como el método más apropiado para dicho clima, puesto que esta estrategia contribuye a lograr una buena circulación y renovación del aire lo que mejora las condiciones de temperatura y humedad del ambiente.

En el caso de que las estrategias sustentables no hayan sido aplicadas o no consigan mejorar el confort, se puede optar por sistemas activos de enfriamiento. Aunque de acuerdo con Fonseca *et al.* (2009) los sistemas HVAC de climatización, ventilación y aire acondicionado de uso comercial y residencial por lo general no logran reducir los niveles de humedad por debajo del 60%, y la posibilidad de reducir aún más estos niveles implicaría un aumento de costo.

Las estrategias previamente mencionadas, tanto activas como pasivas, son recomendadas de manera general para todas las zonas con este tipo de clima, en cuanto a las estrategias específicas para la ciudad del caso de estudio Poza Rica, Veracruz, de acuerdo con sus datos climáticos obtenidos de la base de datos de *Meteonorm*, el programa *Climate Consultant* nos arroja un diagrama psicométrico con distintas estrategias de diseño recomendadas para mejorar el confort al interior de los espacios durante todo el año.

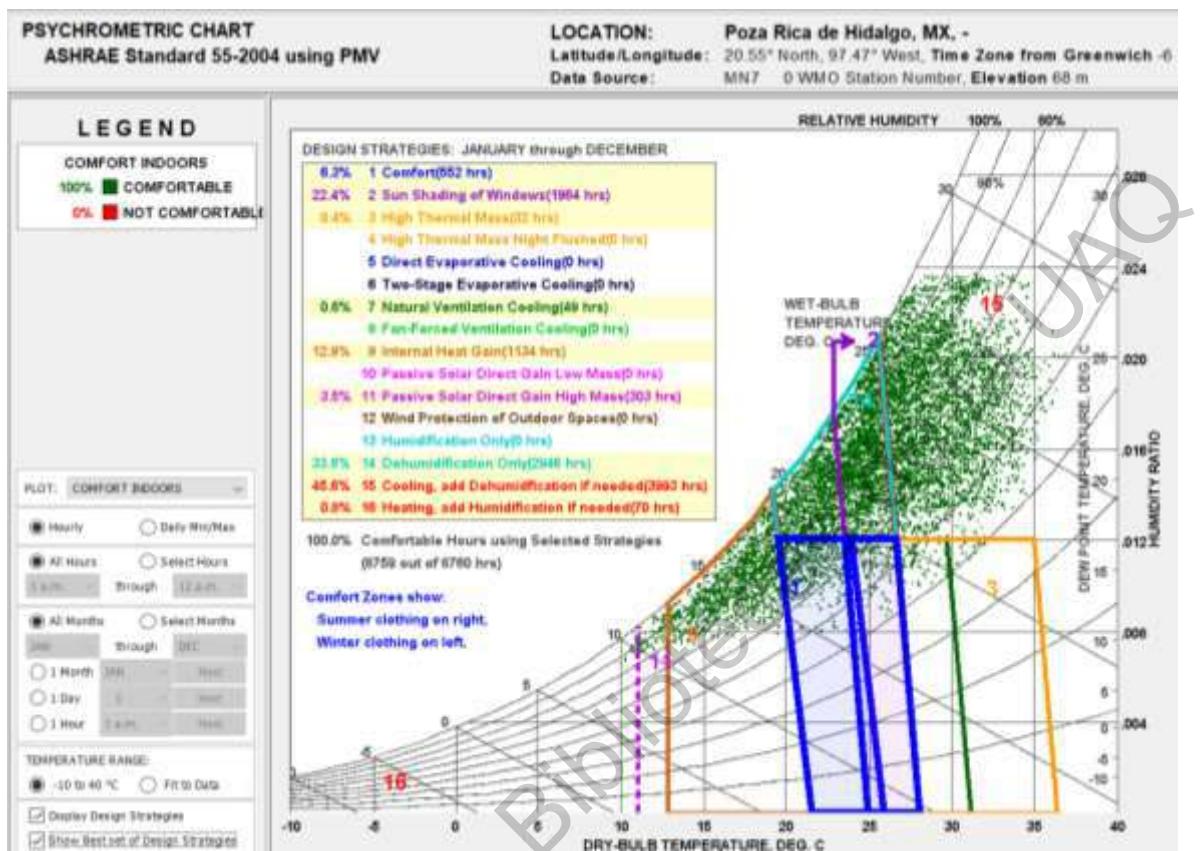


Figura 7. Diagrama psicométrico de la ciudad de Poza Rica, Ver. Fuente: Elaboración propia con Climate Consultant.

En el diagrama psicométrico se muestra un listado con 16 estrategias diferentes tanto activas como pasivas, siendo solo 9 las absolutamente necesarias para un confort higrotérmico del 100% durante todo el año. Las estrategias incluyen tanto la temporada de verano como la de invierno, pero como esta investigación solo está enfocada en la temporada de verano, se cambia la opción de todos los meses a solo los meses de mayo a septiembre, por ser los que registran las temperaturas máximas, reduciéndose a 5 estrategias de diseño necesarias para lograr el 100% de confort higrotérmico, las cuales se analizan a continuación con sus pros y contras.

Asoleamiento

Se recomienda la protección solar de ventanas para evitar o minimizar ganancias de calor a causa de la radiación solar directa en la construcción. El programa arroja una serie de pautas

de diseño para aprovechar o evitar el asoleamiento, dependiendo de la época del año: el uso de vegetación (árboles, arbustos, entre otros.) como protección del sol, específicamente en el lado oeste, también recomienda el voladizo en ventanas o sombrillas operables, la eficacia de dichas protecciones depende del ángulo de incidencia y la latitud de la ubicación, por lo que deben ser diseñadas específicamente para cada caso de edificación y su ubicación geográfica.

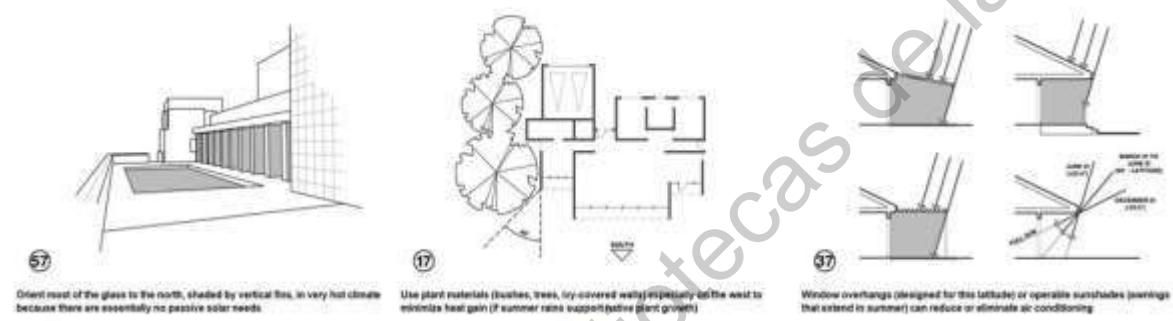


Figura 8. Estrategias de asoleamiento. Fuente: Climate Consultant.

En algunos casos estas protecciones pueden representar un obstáculo para la correcta ventilación natural o la entrada del sol en época de invierno, por lo que si se opta por protección por vegetación lo correcto es elegir arboles de hoja caduca que protejan en verano, pero permitan la entrada solar en invierno. En el caso de los volados o saledizos se debe estudiar profundamente el movimiento solar a lo largo del año para que igualmente permitan la entrada solar en invierno, mientras que en verano mantenga el interior correctamente protegido. Teniendo en cuenta todo lo anterior mencionado, se considera que las sombrillas operables podrían ser la mejor opción, ya que estas además de estar diseñadas específicamente para cada edificación y ubicación geográfica pueden ser manipuladas a preferencia del usuario o de manera automatizada por sensores de luz o movimiento.

Ventilación natural (cruzada)

Una buena ventilación natural puede ayudar a reducir o evitar el uso del aire acondicionado, sobre todo si las ventanas de la edificación están correctamente sombreadas y orientadas para

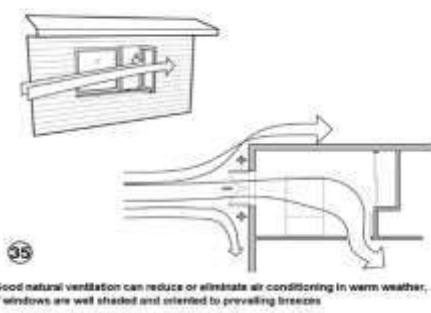


Figura 9. Estrategia de ventilación cruzada. Fuente: Climate Consultant.

se encuentra al interior, lo que ayuda a higienizar el espacio. Este tipo de ventilación si se implementa desde el inicio del diseño no requiere de ningún consumo energético por lo que no afecta la economía ni la ecología.

La ventilación natural tiene dos problemas principales, uno de ellos es que es necesario que la temperatura exterior sea menor que la interior para generar un cambio positivo en el ambiente térmico, de lo contrario solo aportaría ganancia térmica al interior (Fuentes Freixanet & Rodríguez Viqueira, 2004) y el segundo problema es que, aunque la ventilación natural sirve para renovar el aire viciado del interior, introduce humedad, lo que afecta negativamente el confort higrotérmico de los usuarios, produciendo el inconfortable calor húmedo; lo ideal para solucionar este último problema sería intentar deshumidificar el aire antes de su entrada a la edificación.

Deshumidificación

La deshumidificación es muy importante en este tipo de clima, ya que como se ha mencionado anteriormente se caracterizan por sus altos niveles de humedad. Existen diferentes tipos de deshumidificadores, por ejemplo, el método mediante serpentín de enfriamiento, el cual logra reducir los niveles de humedad hasta menores del 50% sin embargo, su costo comparable con los costos de sistemas HVAC en operación y mantenimiento, resulta altamente costoso (Fonseca Díaz, Niño Serna, & Gutiérrez, 2009).

permitir la entrada de los vientos dominantes. Para lograr una correcta ventilación es necesaria la ventilación cruzada (Fuentes Freixanet & Rodríguez Viqueira, 2004) la cual consiste en tener una o más aberturas en fachadas opuestas hacia el exterior, donde de preferencia una de ellas este orientada para permitir la entrada de corrientes de aire fresco que circulen por todo el espacio arquitectónico deshaciéndose del aire viciado que

De acuerdo con Sánchez (2015), existen otros sistemas deshumidificadores de rueda desecante que ya han sido aplicados en países europeos, en la India, en China y en Estados Unidos, estos permiten reducir la humedad relativa del ambiente, sin embargo, su eficiencia es mejor en climas fríos ya que su proceso de enfriamiento calienta los espacios lo que los descarta para climas cálidos, donde aparte de disminuir la humedad se busca mitigar las altas temperaturas, sin embargo, existen sistemas híbridos de enfriamiento con desecantes, que usualmente son una combinación del sistema de comprensión de vapor y la rueda desecante giratorio (Flores & Dibene 2012) que si puede ser apto para el clima cálido subhúmedo.

Enfriamiento

El diagrama psicométrico de Climate Consultant el enfriamiento acompañado con deshumidificación de ser necesario, tienen un porcentaje muy alto (76%) cubriendo un total de 2790 horas aproximadamente para mantener un confort higrotérmico en verano. Lo cierto es que los sistemas HVAC de climatización, ventilación y aire acondicionado de uso comercial y residencial son una opción muy común en la búsqueda de condiciones de confort térmico o higrotérmico, sobre todo en este tipo de climas

Estos sistemas de enfriamiento, por lo general no logran reducir los niveles de humedad por debajo del 60% HR, y la posibilidad de reducir aún más estos niveles implicaría un aumento de costo (Fonseca, et al., 2009).

Estado del arte

2.6 Estrategias o sistemas activos de deshumidificación por desecantes utilizados para obtener confort higrotérmico

El proceso de deshumidificación por desecantes tiene como objetivo absorber la humedad del medio ambiente, mediante materiales, conocidos como desecantes, los cuales tratan de equilibrar la humedad del ambiente con la humedad de ellos mismos (Velasco, 2016),

Hasta el momento la deshumidificación por desecante ha sido ampliamente estudiada, por lo que existen diversas líneas de investigación sobre el tema, siendo las más importantes para el tema de investigación que compete a este documento las siguientes:

- Tipo de desecante
- Regeneración del material desecante
- Aplicaciones de tratamiento de aire con materiales desecantes

2.6.1 Tipo de desecante sólido

Cuando es necesario combatir elevados niveles de humedad es común utilizar desecantes para minimizar el contenido de humedad en el aire (Velasco, 2016). Existen desecantes sólidos y líquidos, ambos se comportan de la misma forma, lo único que los diferencia es su reacción a la humedad; mientras que la mayoría de los sólidos simplemente recogen la humedad, los líquidos normalmente experimentan un cambio físico o químico cuando atrapan la humedad, a los primeros se les conoce como adsorbentes y a los segundos absorbentes (Carbonell & Quesada, 2003).

Al momento de elegir el mejor tipo de desecante, se deben considerar dos variables importantes, su capacidad de adsorción y su habilidad para regenerarse (Fernández, 2015).

Las tecnologías desecantes o deshidratantes más utilizadas actualmente son a base de Alúmina Activada, Gel de Sílice y Tamiz Molecular (Aguirre Ramírez, 2015), en especial el gel de sílice, el cual tiene la ventaja de un menor costo y menor temperatura de regeneración.

A lo largo de los años el gel de sílice ha sido estudiado por diferentes autores, quienes han descubierto y puesto a prueba todas sus propiedades, por ejemplo recientemente Zhang, Fu,

Yang, & Xu (2014) han estudiado el coeficiente de rendimiento de la rueda desecante con diez materiales desecantes diferentes, entre ellos el gel de sílice, estos fueron sometidos a diferentes condiciones higrotérmicas del aire de entrada y de regeneración, siendo el gel de sílice el que ha presentado mejores resultados. También Bula Silvera & Juvinao (2004) realizaron una serie de experimentos al implementar un filtro con gel de sílice en un sistema de acondicionamiento de aire por compresión de vapor, donde se logró una disminución considerable de la humedad que pasa a través del sistema de acondicionamiento de aire, lo cual implica una disminución de la carga latente del sistema.

2.6.2 Regeneración del material desecante

Para la regeneración del material desecante es necesario retirar la humedad adsorbida por este, esto puede lograrse ya sea por calor o por la reducción de presión, siendo el primero el elegido para procesos comerciales y la segunda opción para procesos industriales (Dibene & Flores, 2013), siendo que el caso de investigación es la implementación de viviendas se estudiará la regeneración por calor.

Como se ha mencionado en el apartado anterior el gel de sílice es el material desecante mayormente empleado por sus distintas propiedades, y aunque el sistema de regeneración más comúnmente utilizado es la rueda desecante, en donde es necesaria una fuerza térmica que sea capaz de aportar el calor necesario para calentar el aire de regeneración a un mínimo de 50-60°C (Dibene & Flores, 2013), este material también puede ser regenerado por medio de energía solar, como el uso de colectores solares de placa plana o por medio algún combustible, como gas, entre otros (Spotorno, Busso, Osiska, Pochettino, & Benítez, 2012). Ejemplo de ello es el sistema desarrollado por Fernández, Cejudo, Domínguez, & Carillo (2015) en donde el gel de sílice, material desecante implementado en su propuesta, es regenerado mediante el flujo de aire exterior que ya se encuentra a una temperatura elevada y además es recalentado mediante calentadores solares. Spotorno, *et. al.* (2012) también presentan otro sistema de regeneración, el cual se realiza mediante energía solar y el

aprovechamiento del calor residual del condensador en sistemas de climatización por compresión de vapor.

2.6.3 Aplicaciones de tratamiento de aire con materiales desecantes

Dentro de esta línea de investigación se demuestra el interés de estudio en este tipo de tecnologías con una serie de ejemplos de propuestas de climatización más eficientes.

Recientemente Fernández, Cejudo, Domínguez, & Carillo (2015) desarrollaron un nuevo sistema de tratamiento de aire exterior de ventilación con materiales desecantes sólidos, el cual puede ser adaptado a la fachada, al cual denominaron “sistema de fachada desecante”. El sistema se compone de una fachada ventilada estructurada por dos capas de material desecante, por lo que el aire circula a través de la cámara de aire poniéndose en contacto con el material desecante transmitiéndole así su masa y energía, a la salida de la cámara el aire es introducido en una climatizadora convencional. Dentro de su proyecto también añadieron la opción de regeneración del desecante que entra en función una vez que el material desecante se encuentra saturado y no puede adsorber más humedad, el sistema de regeneración consiste en el flujo de aire exterior caliente, el cual es calentado por medio de

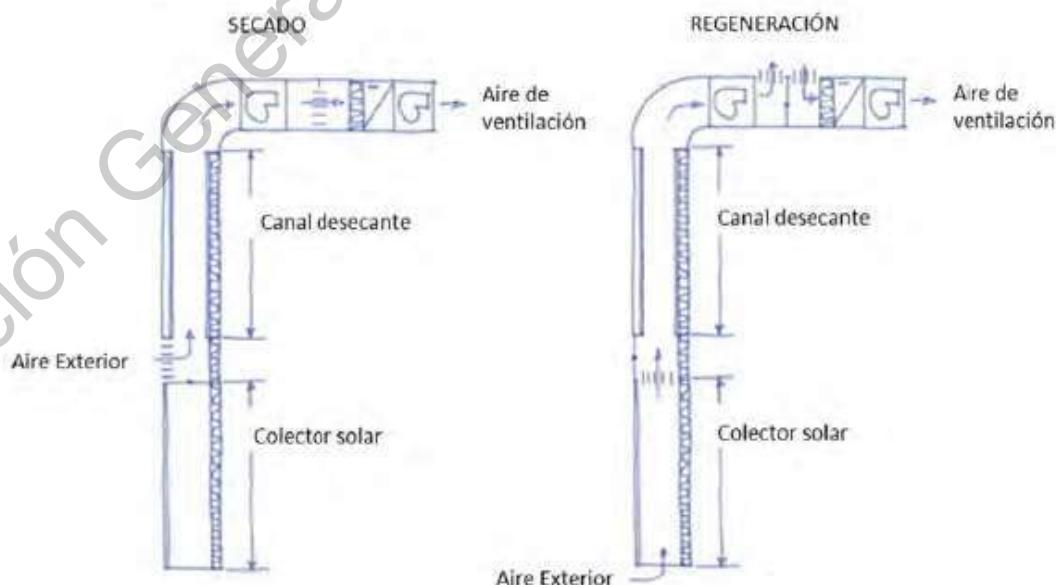


Figura 10. Fachada desecante Fuente: Fernández, et al. (2015)

un captador solar que forma parte del sistema de fachada desecante. El diseño de dos columnas de material desecante permite mantener el flujo de aire constante hacia el interior, ya que al contar con dos columnas es posible alternar los sistemas de adsorción y regeneración.

Aunque este proyecto se presenta como una propuesta más eficiente y sustentable al buscar una climatización que utilice menor cantidad de energía e involucra la combinación de estrategias pasivas con sistemas activos, tiene como desventaja que su implementación en casas ya existentes puede llegar a requerir de grandes modificaciones, dependiendo del diseño de cada caso, lo cual representa un alto impacto económico.

Bula & Méndez (2004) realizaron una serie de pruebas en donde anexaron un filtro desecante a un sistema de acondicionamiento de aire, con la intención de comprobar si este representaría un ahorro energético para la unidad de acondicionamiento de aire. Su experimentación se conformó a partir de la elaboración de un filtro desecante, en este caso seleccionaron el gel de sílice (SiO_2) como su material desecante, el cual ubicaron al interior de una red plástica que fungió como soporte mecánico, el filtro fue aislado y ubicado de manera que abarcara únicamente al aire de suministro (aire exterior a tratar). Las pruebas para comprobar su eficacia consistieron primeramente en la instalación de un contador eléctrico para medir el consumo de energía del equipo y en segundo lugar en la comparación del peso del material desecante al inicio y final de cada prueba; para la regeneración del desecante se optó por una regeneración externa al funcionamiento del equipo, al someter el filtro a un calentamiento dentro de un horno de microondas.

Los resultados fueron exitosos cuando los niveles de humedad son altos, en este caso se observó un ahorro energético del 14% al utilizar el filtro desecante, la reducción se debe principalmente a que el equipo de aire acondicionado requiere menor tiempo para llegar a las condiciones ideales, ya que el filtro desecante disminuye la carga latente que llega al evaporador. Esta propuesta tiene la ventaja de que su instalación no implica grandes modificaciones o costos de instalación, ya que se trata de un filtro que puede acondicionarse

dentro del sistema de aire acondicionado a base de enfriamiento por compresión con el que se cuente, sin embargo, aún queda pendiente como regenerar el material desecante dentro del mismo sistema.

Neila (2004) menciona el uso de las sales desecantes como una de las pocas formas que existen para reducir la humedad sin recurrir a la energía y/o enfriamiento. En su libro Arquitectura Bioclimática en un Entorno Sostenible muestra el uso de estas sales en combinación con estrategias pasivas como la ventilación cruzada y el asoleamiento a manera de mejorar el confort al interior de la vivienda reduciendo la humedad del aire antes de que este entre en la vivienda o cualquier otra edificación.

La estrategia consiste en un doble muro entre el cual se encuentran bancadas de sales absorbentes situadas sobre mallas, de manera que el aire pueda circular entre ellas de forma natural antes de entrar a la vivienda, por lo que el aire que finalmente penetrará en la vivienda será un aire con menor humedad. Para que las sales recuperen su estado inicial una vez que ya hayan absorbido la humedad, éstas se deberán calentar y someter de nuevo a una corriente de aire, esto se logrará al hacer que el aire interior salga de la vivienda por el otro extremo donde también habrá unas bancas de sales previamente utilizadas.

Este doble muro debe habilitarse en dos fachadas contrarias para que sea posible el proceso anteriormente explicado, y el ciclo de entrada y salida del aire se alternará según la hora del día, para que ambas fachadas puedan realizar las funciones de deshumidificación del aire y de regeneración.

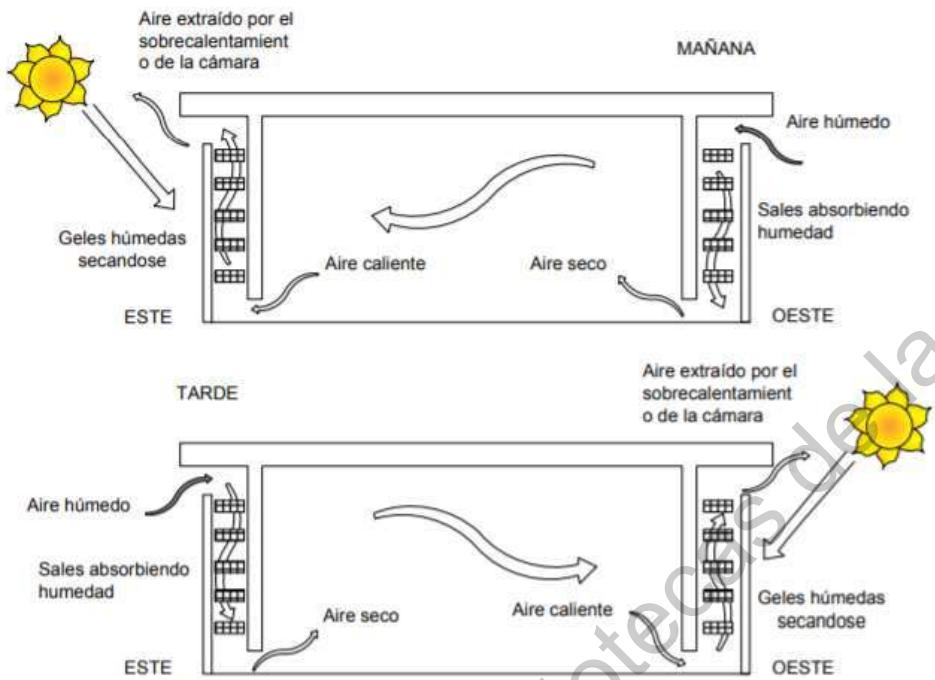


Figura 11. Estrategia de deshumidificación con sales desecantes. Fuente: Neila (2014)

El hecho de que no involucre ningún sistema activo de enfriamiento la convierte en una buena opción sustentable para obtener el confort higrotérmico en ciudades de clima cálido-húmedo, sin embargo, si no es considerada desde el inicio del diseño o construcción su implementación en estos casos puede resultar en considerables modificaciones constructivas y de diseño que acarreen grandes costos.

A continuación, se explica un tratamiento de aire por medio de la ventilación mecánica controlada y un intercambiador de calor, puesto que se tomó como base para el diseño de la estrategia de deshumidificación sustentable propuesta en esta investigación.

2.6.4 Ventilación mecánica controlada

Balbo di Vinadio junto con Thesan S.p.A (Italia Patente nº 14172154.8, 2015) presentaron un dispositivo de ventilación mecánica controlada descentralizado adaptable para ventanas y puertas. Este dispositivo cuenta con filtro de aire y asegura un intercambio de aire adecuado entre el interior y el exterior de la vivienda, además de que su diseño descentralizado le permite adaptarse fácilmente tanto a nuevas construcciones como a las ya existentes.

Posteriormente el mismo inventor, Balbo di Vinadio en compañía de Palazzetti (Italia Patente nº 102015000037796, 2015) presentaron una nueva versión de este dispositivo, al cual se le integró un intercambiador de calor. El dispositivo cumple con la misma función de filtración e intercambio de aire, mientras que al mismo tiempo asegura una recuperación de energía por medio del intercambiador de calor, lo que hace factible para zonas de clima frío.

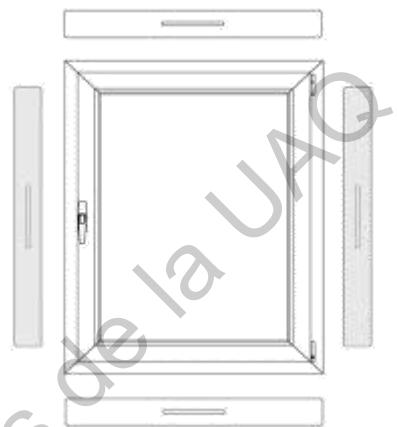


Figura 12. Instalación en ventana del sistema de ventilación mecánica controlada Fuente: Instructivo Thesan (2018)

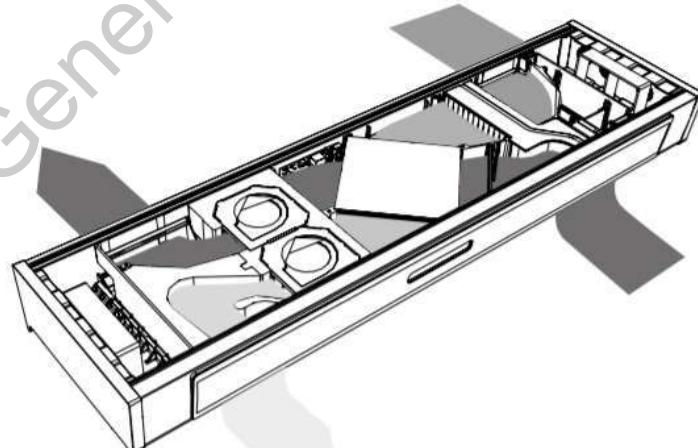


Figura 13. Dispositivo de ventilación mecánica controlada con intercambiador de calor. Fuente: Instructivo Aircare ES Thesan (2018).

La ventaja de este dispositivo se encuentra en su practicidad de diseño, lo que lo convierte en una versión viable para espacios nuevos o ya existentes, ya que su instalación no requiere de grandes modificaciones, sin embargo, su desventaja se centra principalmente en que está diseñado para zonas de clima frío, por lo que no cuenta con ningún elemento desecante que pudiese combatir los altos niveles de humedad característicos de las regiones de clima cálido húmedo.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 Marco normativo

Existen diversas normas tanto nacionales como internacionales que han contribuido a regular el confort térmico dentro de los espacios arquitectónicos y los requisitos necesarios de las tecnologías de enfriamiento. A continuación, se mencionan algunas de las que más competen al tema de investigación.

3.1.1 Normas nacionales

NOM-020-ENER-2011 “Eficiencia energética en edificaciones, Envoltorio de edificios para uso habitacional”

Esta norma según el Diario Oficial de la Federación (2011) al igual que la anterior busca el lograr el confort térmico de edificaciones de uso habitacional, buscando limitar la ganancia de calor mediante la envoltorio para obtener un ahorro de energía al disminuir el uso de sistemas de enfriamiento.

NOM-021-ENER/SCFI2017 “Eficiencia energética y requisitos de seguridad al usuario en acondicionadores de aire tipo cuarto. Límites, métodos de prueba y etiquetado”

Esta norma establece las especificaciones y métodos de prueba de la Relación de Eficiencia Energética Combinada (REEC) y modo de espera, así como las de seguridad al usuario y los métodos de prueba para verificar las especificaciones en esta establecidas para los aires acondicionados tipo cuarto nuevos, con o sin calefacción, con condensador enfriado por aire y con capacidades de enfriamiento hasta de 10 600 Wt que se comercialicen en el país (Secretaría de Energía, 2017).

NOM-023-ENER-2010 “Eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo dividido, descarga libre y sin conductos de aire. Límites, método de prueba y etiquetado”

De acuerdo con lo establecido en el Diario Oficial de la Federación (Secretaría de Energía, 2010) esta norma es la encargada de regular la Relación de Eficiencia Energética (REE) mínima a cumplir por los aires acondicionados tipo dividido, descarga libre y sin conductos de aire (conocidos como minisplit y multisplit), de ciclo simple (solo frío) o con ciclo reversible (bomba de calor), que utilizan condensadores enfriados por aire.

NOM-026-ENER-2015 “Eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo dividido (Inverter) con flujo de refrigerante variable, descarga libre y sin ductos de aire. Límites, métodos de prueba y etiquetado”.

Esta norma al igual que la anterior, busca establecer el nivel mínimo de REE que deben cumplir los aires acondicionados, solo que esta es aplicable para los acondicionadores de aire tipo dividido (Inverter) con flujo de refrigerante variable (Diario Oficial de la Federación, 2016).

3.1.2 Normas internacionales

Normas de la Organización Internacional de Estandarización – ISO

Norma ISO 7730:1994. “*Moderate thermal environments. Determination of PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*”

La norma en español conocida como “Ambientes térmicos moderados. Determinación de los índices del PMV y PPD y especificaciones de las condiciones de confort térmico” basándose en lo dicho por Fanger en 1970 tiene como índices de confort térmico al PMV y PPD para establecer condiciones ambientales térmicamente adecuadas (Bravo, 2014, págs. 13-15).

Norma ISO 10551: 1995. “*Ergonomic of the thermal environment. Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales*”

La norma ISO “Ergonomía del ambiente térmico – Evaluaciones de la influencia del ambiente térmico usando las escalas subjetivas de valoración” se trata de un conjunto de experiencias directas sobre evaluación subjetiva de confort o desconfort en distintos ambientes climáticos y cuenta con una escala aplicable para espacios de ambiente térmico moderado (Bravo, 2014, págs. 13-15).

ASHRAE 55, 2004 “*Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*”

La norma ASHRAE 55, conocida en español como “Condiciones térmicas ambientales para ocupantes humanos” está basada en el balance térmico del cuerpo humano en espacios climatizados o climas templados para personas sedentarias o con una actividad ligera, asumiendo que la sensación térmica está directamente relacionada con los factores ambientales: temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del aire y temperatura media radiante, y establece un rango de condiciones de confort interior aceptable para un 80% de los ocupantes del espacio (ASHRAE STANDAR 55, 2014).

Además de las normas, también existen metodologías que buscan ayudar a calcular con los gases de efecto invernadero (GEI) con la intención de tener un punto de referencia básico para el inicio de acciones para la reducción del consumo de energía y para la utilización de recursos y materiales con menor impacto ambiental, el Ministerio para la Transición Ecológica del Gobierno Español (2018) hizo un recopilado de las metodologías y normas con mayor reconocimiento internacional, y a continuación se mencionan las más relacionadas con el tema de investigación:

Greenhouse Gas Protocol Corporate Standard (GHG Protocol): Es uno de los protocolos más utilizados a nivel internacional para cuantificar las emisiones de GEI. Este marco metodológico da pautas de trabajo para la determinación de softwares de cálculo de emisiones de GEI (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2010).

IPCC 2006 GHG Workbook: Se trata de una guía completa para calcular GEI provenientes de diferentes sectores y fuentes, además incluye una detallada lista de factores de emisión.

ISAE 3410: Es una norma internacional sobre Contratos de Aseguramiento de Informes de GEI.

ISO 14.067: Este standard apunta a la normalización de la Huella de Carbono de productos, además esta norma retoma los resultados de *GHG Protocol* (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2010).

3.2 Marco conceptual

En esta parte de la investigación se definen ciertos conceptos importantes para la comprensión del tema de investigación.

Confort Térmico

La ASHRAE define al confort térmico como:

Esa condición de la mente en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico (ASHRAE, 2004).

Al tratarse de una definición muy general se presenta otra un poco más explícita definida por Araujo, Castejón & Royo (2007):

Podríamos decir que existe «confort térmico» cuando las personas no experimentan sensación de calor ni de frío; es decir, cuando las condiciones de temperatura, humedad y movimientos del aire son favorables a la actividad que desarrollan.

Sustentable

La Comisión Brundtland (1987) definió el término sustentable como:

El desarrollo que satisface las necesidades actuales, sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades (1987).

Temperatura

Nuevamente Araujo *et al.* presentan una definición de temperatura:

La temperatura seca del aire es la temperatura a la que se encuentra el aire que rodea al individuo (2007).

Humedad

La humedad es descrita por Mondelo (2001) como:

En este apartado se tratará la humedad relativa, la cual puede ser definida como la relación expresada en tanto por ciento, entre la presión parcial de vapor de agua en el aire y la presión de vapor de saturación del vapor de agua a una temperatura dada, citado en (Herrera Zavaleta, 2015).

Deshumidificar

El término deshumidificar se define de la siguiente manera:

El término se refiere a la disminución de la percepción de humedad lograda a través de la ventilación natural, parámetro que cumple con nuestra preferencia por el uso eficiente de las energías pasivas (Noguera Londoño, 2015).

Estrategias Activas

Sanabria da una pequeña explicación de lo que son las estrategias activas:

Estrategias Activas, aquellas que se implementan en medio mecánicos y eléctricos que permiten mejorar las condiciones de confort interior y de temperatura operativa, tales como equipos de aire acondicionado, calentadores eléctricos y calderas (Sanabria Contreras, 2018).

Estrategias Pasivas

Sanabria también describe cómo funcionan las estrategias activas:

Estrategias Pasivas como aquellas que se tienen en cuenta en la disposición del diseño y se proyectan para mejorar las condiciones

de operación sin el uso de equipos complementarios o adicionales que incurran en consumos energéticos. Estas estrategias pasivas tienen en cuenta las condiciones de implantación, clima, topografía y estructura del entorno natural (Sanabria Contreras, 2018).

Material Desecante

Pilatowsky menciona que existen dos tipos de material desecante: líquidos o sólidos y explica su función:

Tienen como función extraer el vapor líquido de la masa gaseosa (Pilatowsky Figueroa, 2002).

3.3 Confort higrotérmico

De acuerdo con Jiménez (2014), el confort higrotérmico puede definirse como: “la situación en que el cambio de calor con el medio es equilibrado”, menciona también que este intercambio de calor puede ocurrir mediante diversas maneras: radiación, convección y conducción.

El confort higrotérmico es influenciado por dos parámetros ambientales, la temperatura y la humedad, y estos a su vez pueden ser determinados por diferentes factores, como las condiciones climáticas del exterior, las propiedades térmicas del edificio y por fuentes de calor o vapor (Kraus, 2017). Fue Heberden (Fuentes Freixanet V. , 2009) quien relacionó el término confort con estos parámetros ambientales por primera vez, naciendo así el confort higrotérmico, el cual se considera una parte esencial para la calidad interior del aire, IAQ en sus siglas en inglés, y en general para brindar bienestar a los usuarios al interior de los espacios arquitectónicos.

3.3.1 Principales variables ambientales que influyen sobre el confort higrotérmico

Como se ha venido mencionando a lo largo de esta investigación, las variables que mayormente tienen influencia sobre el confort higrotérmico son la humedad, la temperatura y el movimiento del aire.

Humedad

La humedad es la encargada de regular la evaporación (Fernández García, 1994), por lo que cuando existen altas temperaturas genera un alto impacto sobre el confort higrotérmico debido a que la sudoración es el mecanismo más importante en estos casos, y si la humedad es baja este mecanismo será posible, sin embargo, si la humedad se encuentra en un nivel alto, la sudoración se producirá, pero la evaporación de esta no, lo que genera el incomodo calor húmedo.

Temperatura

La temperatura del aire es un parámetro importante en el confort higrotérmico, ya que esta influye sobre la temperatura del ser humano, según menciona Jendritzky (1991) las sensaciones de temperaturas extremas pueden afectar negativamente al ser humano, reduciendo los esfuerzos físicos y mentales.

Movimiento del Aire

Fernández (1994) menciona que el movimiento del aire aumenta la disipación de energía por evaporación convección, esto será posible siempre y cuando la temperatura de la piel sea menor que la temperatura del aire, en el caso contrario, este solo aumentará la sensación de calor.

3.3.2 Estándares de confort higrotérmico

Existen diferentes herramientas y estándares ya establecidos, los cuales pueden ayudar a determinar el nivel de confort higrotérmico al interior de un espacio.

Temperatura Efectiva

La temperatura efectiva, es un índice empírico en el cual se utilizan fórmulas estadísticas, y según González (1986) se define como “la temperatura del termómetro seco que para una humedad del 50% haría sudar a una persona con la misma intensidad que en las condiciones ambientales dadas” y es uno de los índices mayormente aceptados por la ASHRAE.

Para su formulación original, solo eran necesarios los parámetros de humedad relativa y temperatura del termómetro seco, aunque más tarde se añadieron también la temperatura radiante y la velocidad del viento.

Cartas Bioclimáticas

Las cartas bioclimáticas son diagramas psicométricos relacionados con los parámetros ambientales de temperatura y humedad en el aire, y es a partir de ellos que se puede determinar las zonas de confort térmico.

Carta bioclimática de Olgay

El diagrama de Olgay está compuesto por una cuadrícula donde se representan las líneas de datos de las variables del entorno a considerar, las cuales son: temperatura del aire, humedad relativa, radiación y movimiento del aire.

Dentro de él se puede ubicar la zona de confort con referencia a la temperatura y humedad ideal para una persona en reposo, y las estrategias a implementar en caso de que los niveles

de temperatura y humedad salgan de la zona de confort, donde el límite de confort mínimo es 21°C y el máximo dependerá de la humedad relativa (Olvera Arévalo, 2013).

Carta bioclimática de Giovoni

Según menciona Olvera (2013) carta se diseña con la intención de cubrir aspectos olvidados por la carta bioclimática de Olgay, se extiende hasta abarcar las condiciones de confort aplicables para climas cálidos y húmedos. Dentro de ella también se mencionan distintas estrategias para lograr el confort térmico considerando las variables ambientales.

Abaco psicométrico

De acuerdo con Simanca (2003) gráfica muestra la relación de la temperatura y el contenido de vapor de agua (es decir la humedad) en el ambiente, y se trata de una de las herramientas mayormente utilizadas debido a su sencillez de manejo.

Índice de Fanger

Este método numérico aparte de analizar los parámetros físicos ambientales, también analiza el confort térmico desde la percepción humana al tomar factores como la actividad, resistencia térmica de la ropa y su factor cubierto, teniendo como variables dependientes la temperatura de la piel y la cantidad de energía debida a la secreción de sudor (Simanca Yovann, 2003).

3.4 Deshumidificación

La deshumidificación es una estrategia que puede implementarse de manera activa o pasiva y consiste en retirar cierta cantidad de humedad del ambiente con la intención de mejorar el confort higrotérmico, es comúnmente recomendada para zonas que se caractericen por sus altos niveles de humedad, ya sea de clima frío o cálido.

El Dehumidification Handbook (Munster Corporation, 2002) nos explica que existen tres maneras de poder eliminar la humedad del aire: la primera consiste en enfriar el aire para condensar el vapor de agua que este contenga, la segunda se realiza mediante el aumento de la presión total del aire, lo que también causa condensación, y por último mediante el uso de algún material desecante, el cual extrae la humedad del aire a través de diferencias en las presiones de vapor entre el aire y el material.

La primera y la última son las dos formas mayores utilizadas por lo que se explicaran cada una de ellas de manera más detallada a continuación.

3.4.1 Deshumidificación por enfriamiento

La deshumidificación por enfriamiento se logra mediante el proceso de condensación, el cual consiste en el cambio de materia de estado gaseoso a estado sólido o líquido, esto es posible mediante el enfriamiento del aire, el cual es enfriado debajo de su temperatura de punto de rocío, lo que produce el cambio de materia de vapor de agua a un estado líquido.

Este proceso es el principio operativo de la mayoría de los sistemas de aire acondicionado, ya que estos enfrián el aire, después drenan parte de la humedad e introduce un aire más frío y seco al espacio. La cantidad de humedad eliminada depende de qué tan frío puede enfriarse el aire: cuanto más baja es la temperatura, más seco el aire (Carbonell & Quesada, 2003). A pesar de que la mayoría de estos sistemas convencionales de aire acondicionado son capaces de combatir la carga sensible (variación de temperatura) y la carga latente (disminución de contenido de agua), el proceso de combatir la carga latente se produce como resultado involuntario al enfriar el aire por debajo de su punto de rocío para combatir la carga sensible, lo que provoca que el consumo de energía aumente (Fernández, 2015).

3.4.2 Deshumidificación desecante

Los deshumidificadores desecantes son bastante diferentes de los deshumidificadores basados en enfriamiento. Estos en lugar de enfriar el aire para condensar su humedad, controlan los niveles de humedad al atraparla por medio de un área de baja presión de vapor en la superficie del desecante; esto funciona debido a que la presión ejercida por la humedad en el aire es más alta, por eso sus moléculas se desplazan desde el aire hasta el desecante logrando así deshumidificarlo (Carbonell Morales & Quesada Ramos, 2003), este proceso es continuo y repetitivo, y se compone de dos etapas importantes:

Adsorción: El desecante frío y seco atrapa humedad del aire; a medida que va absorbiendo humedad se va calentando y humedeciendo hasta que su presión de vapor es igual a la del aire que lo rodea, a partir de entonces, ya no puede absorber más agua.

Desorción: El desecante es apartado del aire húmedo, calentado y colocado en un flujo de aire diferente, tiene ahora una presión de vapor muy alta en su superficie, la humedad sale de él, se llega a un punto en que el material adsorbente está seco pero caliente (Carbonell Morales & Quesada Ramos, 2003).

Para que este proceso sea posible es necesario el uso de materiales desecantes, los cuales serán los encargados de absorber la humedad. Munster Corporation (2002) menciona que existen diversos materiales desecantes, de hecho, se podría decir que la mayoría de los materiales sólidos son capaces de atraer la humedad, ejemplo de esto pueden ser los plásticos como el nylon, el cual puede absorber hasta el 6% de su peso seco en vapor de agua, o la placa de yeso que también puede almacenar una porción de vapor de agua, entre otros más, la diferencia principal entre estos materiales es la capacidad, mientras que los desecantes diseñados para la recolección de vapor de agua atraen y retiene de diez a más de diez mil por

ciente de su peso seco en vapor de agua, donde otros materiales tienen mucho menor capacidad de humedad.

Materiales desecantes

Los materiales implementados en el proceso de deshumidificación desecante, también son conocidos como materiales desecantes, estos materiales en realidad son sustancias higroscópicas, lo que significa que tienen la capacidad de absorber el agua circundante del ambiente (Fernández, 2015), ya sea que esta se encuentre en forma líquida o de vapor (como lo es el caso de la humedad relativa). Los desecantes capturan la humedad hasta alcanzar el estado de equilibrio con el aire circundante, es decir, la absorción de la humedad del aire hacia el desecante es cuando la presión de vapor en el aire es más alta y la eliminación de vapor de agua del material se realiza cuando la presión de vapor es menor que en el material, y finalmente se alcanza el equilibrio cuando la presión de vapor es la misma tanto en el aire como en el material desecante, por lo que se detiene el proceso de absorción (Dibene & Flores, 2013).

Carbonell & Quesada (2003) mencionan que existen materiales desecantes sólidos y líquidos, ambos se comportan de la misma forma, la única sutil diferencia que poseen es su reacción a la humedad, mientras que algunos simplemente recogen la humedad como una esponja sin sufrir ningún cambio de ninguna forma, en otros si se produce un cambio ya sea físico o químico cuando atrapan la humedad, a los primeros se les conoce como adsorbentes y por lo general se trata de materiales sólidos y a los segundos se les denomina absorbentes y normalmente se trata de materiales líquidos o sólidos que se transforman en líquidos.

Aguirre (2015) menciona que actualmente las tecnologías desecantes más utilizadas son a base de alúmina activada, gel de sílice y tamiz molecular, siendo las dos primeras más capaces de desecar el aire a punto de rocío más bajos, mientras que el tamiz molecular está relacionado mayormente a técnicas de cromatografía por lo que no se recomienda particularmente para fines distintos, quedando así únicamente la alúmina activa y el gel de

sílice, sin embargo el gel de sílice muestra mayores ventajas sobre la alúmina ya que esta última es raramente utilizada para atmosferas cerradas, al contrario del gel de sílice, el cual también se caracteriza por ser menos costoso.

3.5 Metodología *design thinking*

La metodología del *design thinking* proviene de la forma en que trabajan los diseñadores de producto y proporciona herramientas para resolver diversos tipos de problemas a través de la observación (Dinngo, 2020).

Las etapas que componen a esta metodología (Figura 14) son: empatía, definición, ideación, prototipado y testeo (Serrano & Bláquez, 2015), estas etapas no son lineales, ya que en cualquier momento de la metodología se puede avanzar hacia atrás o hacia adelante si se considera oportuno.

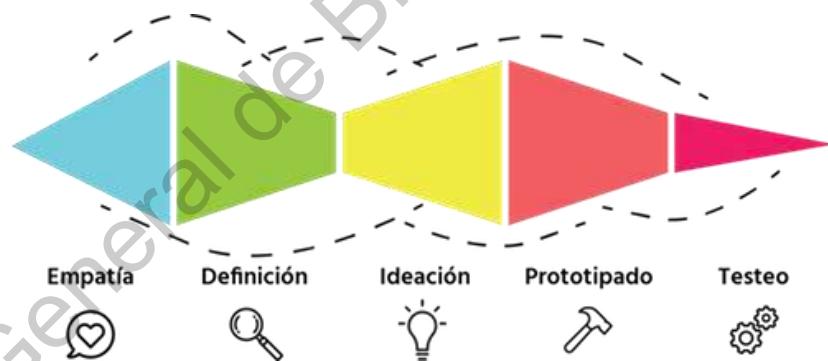


Figura 14. Proceso del Design Thinking Fuente: Designthinking en español

De acuerdo con lo mencionado por Castillo-Vegara *et al.* (2014), a continuación, se explican cada una de ellas:

- Empatía. En esta etapa se busca adquirir conocimientos básicos sobre los usuarios y el problema general, a partir de la observación y el acercamiento con el usuario para comprender sus necesidades y comportamiento.

- Definición. Durante esta etapa se selecciona y analiza la información recopilada durante la primera etapa que aporte mayor valor a la solución del problema, así como identificar los problemas claves para la obtención de una solución innovadora.
- Ideación. Dentro de esta etapa se busca generar todas las ideas posibles que puedan representar una solución al problema, para finalmente evaluar todas y determinar la mejor solución propuesta.
- Prototipado. La etapa de prototipado está enfocada en volver las ideas realidad.
- Testeo. En esta etapa son evaluados los prototipos construidos mediante la interacción con los usuarios implicados. Esta etapa es crucial, ya que ayudara a observar posibles cambios y mejoras para la evolución final de la solución que se propone.

4. HIPÓTESIS

Si se diseña una estrategia alternativa de deshumidificación sustentable que mejoren las condiciones de confort térmico y sea viable para espacios ya construidos, disminuirá el impacto económico, energético y de huella de carbono provocado por el uso excesivo de sistemas de enfriamiento.

VARIABLES

Variables Independientes

- Humedad
- Temperatura
- Accesibilidad del material desecante

Variable Dependiente

- Estrategia sustentable de deshumidificación que permita reducir la huella de carbono.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Diseñar una estrategia de deshumidificación sustentable viable para espacios ya construidos para lograr el confort térmico y disminuir el uso de sistemas de enfriamiento y deshumidificación de alto impacto económico, energético y de huella de carbono, en la Ciudad de Poza Rica, Ver.

5.2 Objetivos particulares

- Estimar las implicaciones que conllevan el uso de sistemas activos de enfriamiento y deshumidificación en el ámbito energético, económico y ambiental.
- Seleccionar, con base en el análisis del comportamiento, el material desecante no tóxico que contenga con la mayor cantidad de los requisitos y cumpla la función de deshumidificación.
- Diseñar un experimento de simulación con los valores de temperatura y humedad obtenidos del lugar de objeto, en este caso la Ciudad de Poza Rica, Veracruz para comprobar si la estrategia generada logra disminuir la sensación de bochorno a la vez que reduce los impactos energético, ambiental y económico.

6. ANÁLISIS DE FACTORES RELEVANTES PARA EL CONFORT HIGROTÉRMICO

Partiendo de la información presentada anteriormente en los apartados de Antecedentes, Estado del Arte y Fundamentación Teórica, se determinaron los factores más relevantes para el diseño y la creación de la estrategia sustentable de deshumidificación, los cuales son: la

deshumidificación desecante y materiales desecantes, junto con un nuevo apartado en donde se procederá a explicar la ventilación mecánica controlada (VMC).

En este capítulo se analizan los factores mencionados, ya que son la base para el diseño de la estrategia de deshumidificación sustentable de uso residencial para la ciudad de Poza Rica, Veracruz que se propondrá en esta investigación, por lo que se procede a explicar cómo se combinaran sus ventajas para mejorar el confort higrotérmico al interior de las viviendas del caso de estudio.

El factor principal de la estrategia a proponer en esta investigación, se trata de la deshumidificación, ya que como se ha mencionado anteriormente es la estrategia recomendada para zonas donde los niveles de humedad sean elevados, por su capacidad de absorber o eliminar de alguna forma la humedad del ambiente, sin importar si las temperaturas sean altas o bajas, sin embargo, en el caso particular es importante considerar que las temperaturas son altas. El segundo factor en importancia es la ventilación, la cual también es ampliamente recomendada para combatir los altos niveles tanto de humedad como de temperatura.

El problema principal de la ventilación natural se basa en que para su mayor eficiencia es recomendable que los niveles de temperatura y humedad al exterior sean menores que los del interior de la vivienda, de lo contrario únicamente estaría contribuyendo a introducir aire caliente y húmedo, que es lo opuesto a lo que se busca. Y en cuanto a la deshumidificación, el problema principal consiste en que a pesar de que la deshumidificación se puede implementar de manera bioclimática, es decir, sin medios mecánicos, las propuestas que existen hasta el momento están pensadas para construcciones nuevas, no porque no se puedan implementar en las ya existentes, sino porque el hacerlo puede conllevar grandes modificaciones en el diseño, dependiendo de cada caso; y por el lado de los medios activos de deshumidificación existentes para viviendas, las recomendaciones para agilizar el proceso se basan en mantener el espacio cerrado, impidiendo una correcta ventilación, ya que esta introduciría nueva humedad al interior del espacio que se encuentra en proceso de deshumidificación.

Con este panorama de las estrategias recomendadas para las zonas de clima cálido húmedo, esta investigación busca tomar las ventajas de cada una para diseñar una propuesta que ayude a mejorar el confort higrotérmico al interior de las viviendas del caso de estudio.

Es por esto que se determinó de acuerdo con todo lo mencionado en el marco teórico, que los sistemas a combinar serían la deshumidificación desecante, la cual se puede adaptar tanto de forma pasiva como activa, y la ventilación mecánica controlada, ya que esta permitiría mantener un control del intercambio de aire entre interior y exterior, como se explicará más adelante, de manera que se logre deshumidificar el aire antes de ingresar a la vivienda.

6.1 Deshumidificación desecante

Como se ha afirmado hasta ahora, la deshumidificación desecante fue la seleccionada para el diseño de la estrategia de deshumidificación sustentable de esta investigación, sobre los demás tipos de deshumidificación debido a su practicidad en cuanto a aplicación.

Este tipo de deshumidificación consiste en absorber la humedad del ambiente mediante el uso de materiales higroscópicos, los cuales se caracterizan por su capacidad de adsorción, siendo el gel de sílice el mayormente utilizado debido a sus diferentes propiedades y características, sin embargo, existen otros materiales a los que diversos autores les atribuye esta propiedad de higroscopia, a continuación, se mencionan algunos:

6.1.1 Materiales desecantes

Gel de sílice

El gel de sílice es el material sólido más comúnmente utilizado actualmente en los sistemas desecantes, ya que cuenta con numerosas ventajas, tales como: su alta capacidad de adsorción (en este caso se le llama adsorción ya que no sufre cambios físicos al adsorber la humedad) que puede llegar hasta el 40% de su peso, su estabilidad de temperatura, propiedades físicas

estables, alta resistencia térmica, además las temperaturas para su regeneración son relativamente bajas al compararse con la de otros materiales desecantes, y por su alta disponibilidad en el mercado consigue un bajo precio (Spotorno, Busso, Osiska, Pochettino, & Benítez, 2012).

Arroz

El grano de arroz se considera altamente higroscópico de acuerdo con Ferro, Castillo, & Obregón (2014), es por esto que se propone como uno de los materiales desecantes a analizar dentro de esta investigación.

Cal

Existen diversos estudios que han declarado a la cal con propiedades higroscópicas, por ejemplo, Bauzá, Justo, & Durand (2016) hicieron un estudio sobre el efecto de secado que produce la cal sobre el suelo arcilloso, obteniendo resultados positivos

Sal marina

Las propiedades más trascendentales de la sal marina se refieren a que un producto soluble en agua y que se considera un mineral higroscópico en un 86% (por el cloruro de sodio), dentro de su integrante químico (Maldonado, 2019), de hecho que se ha comprobado en diversos estudios como el realizado por Maldonado (2019) en donde se realizó un deshumidificador casero con sal marina para adsorber la humedad de los muros, obteniendo resultados favorecedores ya que los niveles de humedad se redujeron durante el periodo

6.2 Ventilación mecánica controlada

Uno de los aspectos más importantes que contribuyen al confort higrotérmico al interior de un espacio, es la ventilación, además de que permite el intercambio de aire entre exterior e interior. Este intercambio puede producirse de tres maneras distintas: ventilación natural, por

infiltração o por ventilación forzada como lo explican Fuentes Freixanet & Rodríguez Viqueira (2004):

- La ventilación natural se da de manera intencionada a través de ventanas, puertas o demás aberturas, y es originada ya sea por presiones debidas al viento y por diferencias de temperatura.
- La ventilación por infiltração se manifiesta de manera incontrolada e intencional a través de las diversas aberturas, fisuras o ranuras que existan, sin embargo, al no ser controlada es poco confiable como fuente de ventilación.
- En cuanto a la ventilación forzada, es aquella que utiliza sistemas mecánicos para el intercambio de aire. Sobre este tipo de ventilación existe más control, tanto en flujo de intercambio de aire, distribución y acondicionamiento artificial.

Es importante que las viviendas dispongan de una buena ventilación, ya sea que se logre de manera natural con estrategias pasivas o en el caso de estas no se puedan implementar debido a diferentes razones, por medio de algún sistema de ventilación ya sea hibrida o mecánica, lo importante es que se aporte un caudal suficiente de aire de renovación y se garantice la extracción y expulsión del aire al exterior, el cual ya se ha convertido en aire viciado por los diversos contaminantes.

Como se menciona anteriormente, la ventilación mecánica controlada (VMC) permite controlar el flujo e intercambio de aire en un ambiente delimitado por la envolvente de un edificio (Mattotea, 2018), en pocas palabras se podría decir que brinda los beneficios de la ventilación al mismo tiempo que permite controlar los factores involucrados con la ventilación.

Existen sistemas denominados MVHR, se trata de unidades de ventilación de doble flujo, es decir un conducto extrae el aire viciado, mientras un segundo conducto es el encargado de introducir aire fresco y limpio, logrando el correcto intercambio de aire (SAVIO THESAN S. p. A., 2020). A pesar de que la ventilación mecánica controlada inicialmente se utilizaba

de manera centralizada, por lo que requería de gran espacio para su instalación, sin embargo, en los últimos años existen sistemas sin ductos, lo que facilita su instalación, incluyendo las viviendas ya existentes. Por esto se considera una buena opción para la propuesta de la estrategia sustentable de deshumidificación de esta investigación.

7. METODOLOGÍA

A lo largo de este proyecto se utilizó la metodología del *design thinking*, con cada una de las etapas que la compone, conjuntando las primeras dos etapas de empatía y definición en una llamada análisis y síntesis, como se muestra a continuación:

1. Análisis y síntesis: Se separa en una investigación de campo enfocada en determinar el confort higrotérmico actual de los usuarios, y una investigación documental, compuesta por revisión de literatura.
2. Ideación: En esta etapa se presentan los bocetos, modelos y primeras ideas.
3. Prototipado: Durante el prototipado se crea el prototipo de manera virtual y física.
4. Testeo: Finalmente en el testeo, se realiza la validación de confort higrotérmico y de las implicaciones energéticas, económicas y ambientales del prototipo.

7.1 Análisis y síntesis

La primera etapa de la investigación consistió en determinar el grado de confort higrotérmico de los usuarios al interior de sus viviendas y el uso de sistemas activos de enfriamiento, tal como los aires acondicionados. Esta etapa fue dividida en dos partes, una dedicada a la investigación de campo y otra a la investigación documental.

7.1.1 Investigación de campo

La investigación de campo consistió en la realización de una encuesta en línea (la cual se puede observar en el Anexo 1) donde se les cuestionó a los habitantes de la ciudad del caso

de estudio Poza Rica, Veracruz sobre su percepción de temperatura y humedad al interior de sus viviendas, durante la temporada de verano y el uso de sistemas activos ya sea aires acondicionados o deshumidificadores, entre otros. Aunado a esto se midieron y registraron los niveles de temperatura y humedad en diferentes zonas de la ciudad, con el fin de corroborar estos datos con la percepción de los usuarios.

Encuesta

Participantes

De acuerdo con datos obtenidos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) hasta el año 2015 en la ciudad de Poza Rica, Veracruz había un total de viviendas particulares habitadas de 55 154, todas ellas fueron tomadas en consideración para participar en este estudio.

Muestra

De las 55 154 viviendas habitadas existentes en la ciudad de Poza Rica, Veracruz el 99.3% de ellas cuenta con el servicio de electricidad, lo que sería un total de 54 767.922 viviendas que cuentan con este servicio, y serían las elegidas para la aplicación de la encuesta ya que están cuentan con los criterios del estudio, ya que las viviendas que no cuentan con electricidad no podrían encuestarse sobre el tipo de sistema de enfriamiento con el que cuentan.

Instrumentos

La encuesta constó de diez preguntas y fue presentada por medio de la plataforma *Google Forms*, lo que ayuda a mantener el anonimato de los participantes y graficar los resultados de manera más sencilla. Dicho cuestionario fue elaborado de manera propia y revisado por un Consejo de Ética previo a su aplicación para corroborar que ninguno de los participantes

se exponía de ninguna forma y que sus datos se mantendrían en la más estricta confidencialidad.

La encuesta fue aplicada durante la temporada de verano, del año 2019; las respuestas fueron recibidas en el plazo de una semana, durante la cual se mantuvieron condiciones climáticas similares.

La participación de todos los involucrados fue voluntaria y no obtuvieron ningún tipo de retribución monetaria o en especie por la participación en el estudio. No se realizó ningún tipo de discriminación a las personas participantes de la encuesta.

Análisis estadístico

Para determinar el tamaño de la muestra requerida para su correcta validación, se calculó de acuerdo con los siguientes datos: tamaño del universo, que era de 54 767 viviendas de Poza Rica, Veracruz, con una heterogeneidad del 50%, un margen de error del 5% y un nivel de confianza del 90%, lo que arrojó un resultado de 270, por lo que sería necesario encuestar a 270 habitantes de la ciudad de Poza Rica, lo que se traduce en una persona encuestada por vivienda.

Medición y registro de niveles de temperatura y humedad

Se registraron los niveles de humedad y temperatura interiores de diferentes viviendas de la ciudad de Poza Rica, Veracruz como complemento para establecer el nivel de confort higrotérmico actual al interior de las viviendas.

Las viviendas se seleccionaron de acuerdo a su ubicación y características, en primer lugar, se homologó el tipo de viviendas a medir con la intención de que influyeran las mismas variables en todas las mediciones y en segundo se seleccionaron viviendas ubicadas en diferentes zonas de la ciudad para que se cubriera la mayor parte de la ciudad.

Las características a considerar de las viviendas fueron las siguientes:

- Material de construcción
- Metros cuadrados aproximados
- Número de integrantes por familia

7.1.2 Investigación documental

Una vez justificado y obtenido datos del confort higrotérmico actual de los usuarios al interior de sus viviendas y del uso de sistemas activos de enfriamiento y/o deshumidificantes. Se prosiguió a la investigación y estudio de los posibles materiales desecantes naturales que pudieran funcionar para absorber la Humedad Relativa en el ambiente, para ello se realizó una revisión de literatura para conocer los tipos de materiales desecantes existentes y los que pudiesen funcionar como propuesta de acuerdo a sus propiedades.

Selección de materiales desecantes naturales o sustentables

Para determinar los materiales desecantes que mejor cumplan con los requisitos tanto de adsorción de humedad como de material sustentable se realizó una revisión de literatura para seleccionar materiales que se mencionaran por sus propiedades adsorbentes o higroscópicas, y de los seleccionados se realizó un análisis general de su ciclo de vida.

Por último, se realizaron una serie de pruebas para el posible análisis del comportamiento de los materiales elegidos ante la humedad y la aplicación de calor para su proceso de regeneración, las pruebas consistieron en lo siguiente:

1. En primer lugar, se analizó el comportamiento del material desecante ante el contacto con el agua y posteriormente al aplicarse calor con la intención de regenerar, estas pruebas con la intención de comprobar si había algún cambio físico que pudiera afectar las propiedades del material.

2. En la segunda prueba se buscó analizar la capacidad de adsorción de vapor de agua del material desecante. Para esto se aisló al material dentro de un espacio de 50 cm³, al cual se le añadió agua caliente con la intención de aumentar sus niveles de humedad y observar la reacción del material desecante.

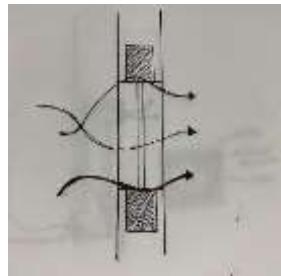
Una vez elegidos los materiales naturales se realizó una prueba para analizar si sufrían de algún cambio físico al contacto con el agua, más otra prueba en la cual se analizó su reacción ante una fuente de calor como método de regeneración.

7.2 Ideación

En esta etapa, se comenzaron a plasmar las ideas en dibujos y diagramas en los cuales además de apreciarse la apariencia posible se buscó que se apreciara y comprendiera el funcionamiento que tendría. Las ideas surgieron a partir de la información analizada y recopilada en las etapas de análisis e investigación documental.

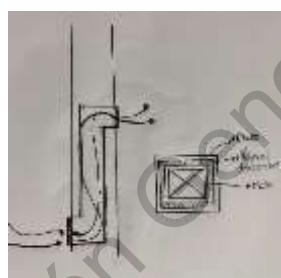
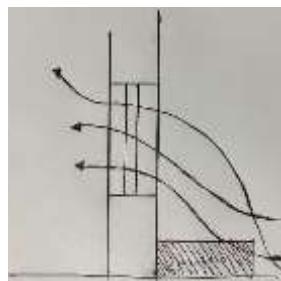
7.2.1 Bocetaje

Bocetos



Los primeros bocetos se presentaron como adaptaciones que se pudieran aplicar en ventanas, de manera que el aire exterior pudiese pasar por estas adaptaciones en donde se encontraría el material desecante, antes de acceder al interior de la vivienda.

Sin embargo, estas ideas fueron desechadas debido a que el espacio donde se ubicaría el material desecante se consideró muy pequeño, además de que el flujo del aire no era encausado para que todo pasara por el material desecante antes de entrar.



Se realizó un tercer boceto, en el cual se intentó presentar algunas mejoras con respecto a las mencionadas en los dos primeros. En este se intenta encausar el flujo de aire por medio de un ducto, en el cual se encontraría el material desecante tras una malla plástica.

Tabla 3. Primeros bocetos de la estrategia de deshumidificación sustentable Fuente: Elaboración propia

7.2.2 Diseño de la estrategia

En el último boceto se puede apreciar más claramente como se comenzaron a conjuntar las dos estrategias elegidas para la elaboración del prototipo, la deshumidificación y la ventilación mecánica controlada.

Finalmente se tuvo una idea más clara de cómo adaptar las estrategias de manera que no implicara una gran modificación en la vivienda ni se necesitara un gran espacio de almacenamiento.

La idea fue plasmada en dos gráficos similares, en los cuales se representó el funcionamiento básico del prototipo.

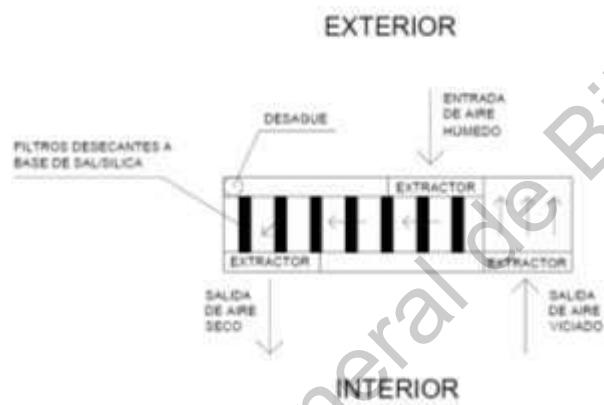


Figura 15. Gráfico de primera propuesta de la estrategia sustentable de deshumidificación sustentable Fuente: Elaboración propia

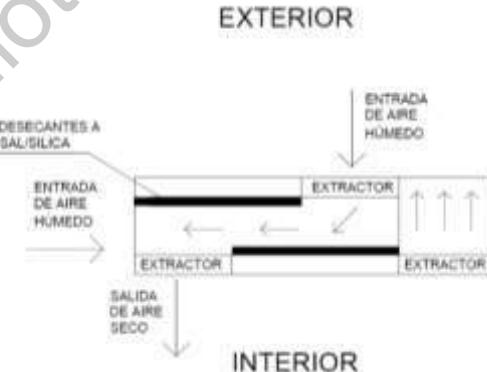


Figura 16. Gráfico de segunda propuesta de la estrategia sustentable de deshumidificación sustentable Fuente: Elaboración propia

La única diferencia en cada uno de ellos fue la ubicación de los filtros, mientras que el primer diseño, al cual llamaremos Diseño 1, ubicaba filtros de manera transversal el segundo diseño, al cual desde ahora llamaremos diseño dos, ubicó los filtros a lo largo de la zona establecida de adsorción.

7.3 Prototipado

7.3.1 Construcción del prototipo

Para la construcción del prototipo de la estrategia se consultó con especialistas de otras ramas, los cuales ayudaron a determinar los materiales para su posible construcción, los cuales se mencionan a continuación:

- 2 Cautín tipo lápiz de 30 watts
- 4 extractores de aire
- Cable dúplex para conexiones
- Apagadores sencillos
- Cable Dupont
- Batería grueso
- Red tela plástica

Una vez que se obtuvieron los materiales, se comenzó con el proceso de construcción:

En primer lugar, se realizaron diferentes vistas del prototipo para determinar las medidas necesarias.

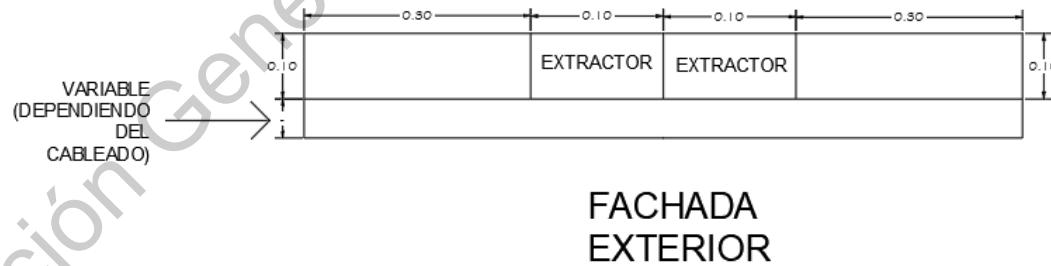


Figura 17. Fachada exterior del prototipo de la estrategia de deshumidificación sustentable
Fuente: Elaboración propia

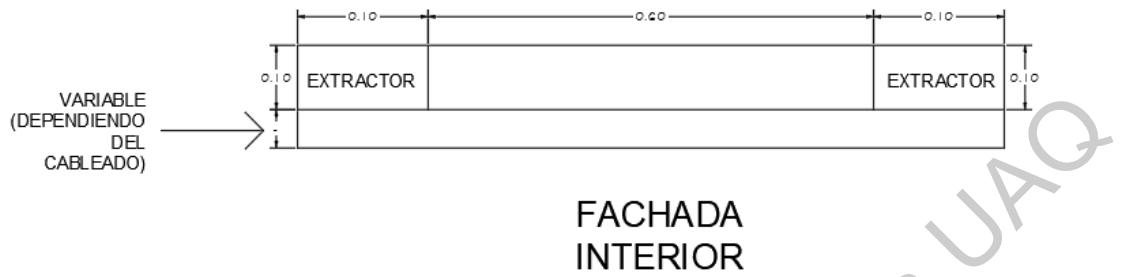


Figura 15. Fachada interior del prototipo de la estrategia de deshumidificación sustentable Fuente: Elaboración propia

Además de asignar espacio para la circulación del aire, también se asignó un espacio en la parte de abajo para el cableado necesario.

1. Una vez que se hubo determinado las medidas necesarias, se comenzó con la construcción del prototipo, el cual tendría una envolvente de batería grueso. Se realizaron las bases para el diseño de filtros desmontables, esto con la intención de que se pudieran desmontar para comparar los pesos antes y después de cada prueba, las bases se acomodaron de manera longitudinal. Los filtros se hicieron a base de una red plástica, la cual actuó como soporte mecánico del material desecante, a la vez que permitía un contacto entre el material y el movimiento del aire. Se aisló el área de la circulación del aire, de manera que el aire de suministro tuviese contacto con el material desecante, y pudiese ser posible el proceso de deshumidificación para todo este aire.
2. Después de terminado el modelo, se retiraron las resistencias de dentro de los cautines, para poder utilizarlas y se conectaron con los extractores, y estos a su vez con los apagadores por medio del Cable Dúplex y del Dupont. Los apagadores se adaptaron a un mando de control, el cual se ubicó fuera del prototipo, en un elemento aparte.

3. Cuando se finalizaron las conexiones de los diferentes elementos, se prosiguió a ensamblar los extractores y resistencia sobre el modelo de batería.

7.4 Testeo

7.4.1 Validación confort higrotérmico

A causa de la pandemia por el virus SARS-CoV2 que causa la enfermedad denominada Covid-19, las pruebas de experimentación se vieron modificadas, en un principio estaba planeada una experimentación que involucrara diferentes sujetos, los cuales permanecerían en dos espacios donde se simularían las condiciones climáticas de la ciudad de estudio, Poza Rica, Veracruz, y en uno de ellos estuviese la estrategia de deshumidificación sustentable en funcionamiento y al final se les cuestionaría sobre las diferencias percibidas en su nivel de confort higrotérmico al interior de ambos espacios por medio de encuestas, sin embargo, debido a que la situación actual no permite aglomeraciones y con la intención de no poner a ninguna persona en riesgo de su salud, estas pruebas fueron canceladas.

En su lugar se realizaron pruebas del prototipo únicamente y otras más aplicado en un espacio de 50 cm³. Es por esto que para el testeo del prototipo se determinó realizar dos pruebas distintas:

- Mientras que, durante el primer testeo se medirían los niveles de temperatura y humedad únicamente dentro y fuera del prototipo, para obtener valores del ambiente antes de ser tratado y después de haber pasado por el área de tratamiento, es decir, antes y después de que el aire pase por los filtros desecantes.
- En el segundo testeo, las mediciones se realizarían ya dentro de un espacio y fuera de él. El espacio elegido tiene un volumen de medio metro cubico.

Cabe aclarar que las pruebas se realizarían con los dos materiales adsorbentes seleccionados: la sal de mar y el gel de sílice.

Para la realización de las pruebas se necesitó tomar la Optativa de Domótica para aprender a programar los sensores que se utilizarían en las pruebas.

Una vez obtenidos los conocimientos sobre programación se realizó lo siguiente:

1. Se consiguieron los materiales necesarios para medir los niveles de temperatura y humedad:

HARDWARE:

- Tarjeta NodeMcu (ESP8266)
- Protoboard
- Cables para conexión (dupont)
- Cable de datos
- 2 sensores de humedad y temperatura DHT11

SOFTWARE:

- Arduino

2. Se buscó el tutorial correspondiente para la programación de los sensores.
3. Se realizaron las conexiones necesarias.
4. Se realizó la programación en Arduino, la cual se muestra a continuación:

```
#include <DHT11.h>
```

```
int pin=2;
int pin2=4;
DHT11 dht11(pin);
DHT11 dht112(pin2);
```

```
void setup()
{
    Serial.begin(9600);
}
```

```
void loop()
{
    int err;
    float temp, hum;
    if((err = dht11.read(hum, temp)) == 0) // Si devuelve 0 es que ha leido bien
    {
        Serial.print("Temperatura: ");
        Serial.print(temp);
        Serial.print(" Humedad: ");
        Serial.print(hum);
        Serial.println();
    }
    if((err = dht112.read(hum, temp)) == 0) // Si devuelve 0 es que ha leido bien
    {
        Serial.print("Temperatura: ");
        Serial.print(temp);
        Serial.print(" Humedad: ");
        Serial.print(hum);
        Serial.println();
    }
    else
    {
        Serial.println();
        Serial.print("Error Num :");
        Serial.print(err);
        Serial.println();
    }
    delay(60000);      //Recordad que solo lee una vez por segundo
} }
```

Para su posible funcionamiento se debió instalar la librería correspondiente del sensor, que se puede encontrar como DHT11 by Adafruit.

Finalmente se comenzaron las pruebas.

Las pruebas del prototipo se dividieron en dos partes, mientras que las primeras pruebas se enfocaron únicamente en el funcionamiento del prototipo, sin que esta se adaptara a deshumidificar un espacio en específico, las segundas pruebas si se realizaron en base a un espacio de 50 cm³.

Prueba de funcionamiento del prototipo

- Para las primeras pruebas se asignaron dos puntos de medida, los cuales se observan en el diagrama x, en estos se recolectaron los datos de temperatura y humedad.
- Tanto al inicio como al final de las pruebas se tomó el peso y captura de la apariencia de los filtros.
- A fin de medir su tiempo de funcionamiento, se realizaron dos tiempos de prueba, en la primera se tomaron las medidas cada minuto por un lapso de diez minutos y la segunda tuvo un lapso de una hora con mediciones cada cinco minutos.
- Se realizaron medidas con diferentes cantidades del desecante, empezando con 100 gramos hasta llegar a 400 gr, para determinar si había algún cambio en el tiempo de funcionamiento.

Pruebas de deshumidificación en un espacio

- Igualmente, que, en las pruebas anteriores, se asignaron dos puntos de medida, los cuales se ubicaron dentro del espacio y fuera.

- Los filtros fueron pesados al inicio y final de cada prueba, tanto de adsorción como de regeneración.
- Los tiempos de duración de las pruebas fueron igualmente los primeros durante un lapso de diez minutos con mediciones cada un minuto, mientras que las segundas pruebas tuvieron una duración de una hora con mediciones cada cinco minutos.

8. RESULTADOS

8.1 Análisis y síntesis

8.1.1 Investigación de campo

Encuesta

Las preguntas aplicadas dentro de la primera encuesta realizada durante el verano del 2019, fueron las siguientes:

<i>No.</i>	<i>Pregunta</i>
1	Determine su nivel de confort durante la temporada de verano al interior de su vivienda
2	¿Qué tipo de ambiente sería más de su agrado?
3	Según su percepción, este tipo de ambiente es:
4	¿Cuenta con aire acondicionado o algún otro sistema de enfriamiento en su vivienda?
5	Si contestó si en la pregunta anterior, mencione el sistema de enfriamiento con el que cuenta.
6	Si contestó que no, mencione el por qué.
7	¿Está familiarizado con el término deshumidificación?

- | | |
|----|--|
| 8 | ¿Conoce algún sistema de enfriamiento o deshumidificación además del aire acondicionado? |
| 9 | Si contesto que si en la pregunta anterior, mencione su nombre. |
| 10 | ¿Considera al sistema de enfriamiento “aire acondicionado costoso? |

Tabla 4. Encuesta sobre confort higrotérmico en Poza Rica durante el verano 2019 Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en la Tabla 4, en la encuesta se pide determinar el nivel de confort durante la temporada de verano y presentándose 5 opciones diferentes: con mucho calor, con calor, neutral, con frio y con mucho frio, siendo la primera opción la más seleccionada con un 63%. En el caso del ambiente de preferencia, el 79.8% de los encuestados eligió la opción de un ambiente ligeramente más frio. En cuanto a la humedad percibida en el ambiente la mayoría de los encuestados (con un 30.8%) determinó encontrar el ambiente húmedo. De acuerdo con los resultados expuestos anteriormente se puede determinar que los usuarios no encuentran un confort al interior de sus viviendas en cuestión de temperatura ni humedad.

En cuanto a los cuestionamientos sobre el uso de aire acondicionado o algún otro sistema activo de enfriamiento o deshumidificación se obtuvieron los siguientes resultados:

- El 67.5% cuenta con algún sistema de enfriamiento en su vivienda, siendo el aire acondicionado el más común seguido por los ventiladores.
- En cuanto al 32.5% que no cuenta con ningún sistema de enfriamiento, mencionaron las cuestiones económicas de instalación, mantenimiento y energía como causa principal de su ausencia.
- El 89.7% de los encuestados considera el aire acondicionado como un sistema costoso.

- El 60.7% no está familiarizado con el término deshumidificación, y dentro de los encuestados que sí, mencionaron mayormente al “deshumidificador portátil” como el sistema de deshumidificación o enfriamiento que conocen.

De los resultados anteriores se infirieron las siguientes afirmaciones:

- Gran parte de los encuestados no encuentra confort higrotérmico al interior de sus viviendas en temporada de verano, e igualmente preferirían un ambiente ligeramente más frío y seco.
- A pesar de que la mayoría de la población considera el aire acondicionado costoso, ya sea por su costo de adquisición, instalación o mantenimiento, es altamente adquirido para combatir las temperaturas y humedades elevadas al interior de las viviendas.
- Otros sistemas activos para mejorar el confort higrotérmico en este tipo de clima, como lo son deshumidificadores no son particularmente conocidos, puesto que solo se mencionó al “deshumidificador portátil” como uno de ellos, sin mencionar si se trata de deshumidificación por compresión o desecante, por lo que se concluye que se desconocen parcial o totalmente sus propiedades y aplicaciones.

Los resultados de la encuesta se muestran por completo en la sección de anexos.

Medición y registro de niveles de temperatura y humedad

Para delimitar el número de variables que pudieran influir en los resultados de medición de temperatura y humedad, se optó por un mismo tipo de vivienda, procurando que las casas seleccionadas contaran con características de construcción y usuarios similares: de 4 a 5 ocupantes, construcción de dos pisos, de aproximadamente 100 m², material de ladrillo, y que no contaran con aire acondicionado.

Además, las viviendas fueron seleccionadas de acuerdo a su ubicación, a manera de cubrir las diversas zonas de la ciudad, por lo que se optó por viviendas ubicadas en los diferentes puntos cardinales de la ciudad, como se muestra en la Figura 16, dando un total de 5 viviendas registradas.



Figura 16. Mapa de Poza Rica con las casas seleccionadas
Fuente: Google Maps

En cuanto a los registros de temperatura y humedad de las diferentes viviendas, estos se realizaron durante tres días seguidos de la temporada de verano, con condiciones de temperatura y humedad similares, las mediciones se repartieron en tres horarios distintos: mañana, tarde y noche, y fueron realizados por medio de medidores higrotérmicos digitales, los cuales registran la temperatura exterior e interior y los niveles de humedad interiores.

El promedio de los niveles de temperatura exterior, temperatura interior y humedad interior se muestra a continuación.

<i>Horario</i>	<i>Parámetros</i>	<i>Promedios</i>	<i>TE</i>
<i>Mañana</i>	Temperatura exterior	31.66 °C	31.50
	Temperatura interior	34.20 °C	
	Humedad	72.2%	
<i>Tarde</i>	Temperatura exterior	36.24 °C	33.02
	Temperatura interior	36.62 °C	
	Humedad	66.26%	
<i>Noche</i>	Temperatura exterior	32.99 °C	32.54
	Temperatura interior	35.45 °C	
	Humedad	71.46%	

Tabla 5. Promedio de temperatura y humedad al interior de las viviendas de la ciudad de Poza Rica, Ver. Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos se procedió a calcular la Temperatura Efectiva (TE) para comparar los resultados en la escala de sensación térmica por Hetschell que está asociada con la TE, que se encuentra en el apartado de antecedentes.

Al observar los datos, se comprobó que los tres promedios del día se encuentran en la sensación térmica de calor pesado, por lo que se determinó que las viviendas registradas se encontraban en desconfort térmico a lo largo del día.

Los datos completos de todas las viviendas seleccionadas se muestran en la sección de anexos (Anexo 3).

8.1.2 Investigación documental

Selección de la propuesta de materiales desecantes sustentables

MATERIAL	Extracción	Producción	Distribución	Uso	Fin de vida
Gel de sílice	No se encuentra en forma pura en la naturaleza por lo que su extracción genera emisiones de CO2	Alta demanda energética para transformarse en gel	Existen yacimientos nacionales y estatales de silicio. También el gel se produce dentro del país.	Capacidad de regeneración a bajas temperaturas. Si adsorbe contaminantes esta propiedad se pierde.	No existe mucha información sobre su fin de vida, sin embargo, se ha estudiado su capacidad para utilizar el agua que adsorbe como agua potable para áreas áridas o sin acceso a este recurso.
Sal de mar	Extracción por evaporación solar: -Se ve afectada por el cambio climático -Falta de subsidio gubernamental. Extracción minera: -Alto impacto ambiental	Proceso de explotación minero costoso. El proceso de evaporación solar no genera emisiones contaminantes.	Producción nacional.	No se encuentra mucha información sobre su uso como adsorbente y posible regeneración.	No se encuentra información sobre la reutilización de la sal.
Cal	Emisión de partículas en proceso de obtención y pretratamiento.	Emisiones de CO2 en fabricación y postratamiento.	Producción nacional y estatal.	No se encuentra suficiente información sobre su uso como adsorbente y posible regeneración.	Puede utilizarse como parte del relleno o en la cimentación.
Arroz	Su cultivo: -Emite gas metano (21 veces más tóxico que CO2) -Uso de pesticidas y fertilizantes contaminantes. -Alta huella hídrica.	Proceso de fabricación tiene un alto porcentaje de emisión de gases. Se han implementado medidas de eficiencia energética.	Producto importación en su mayoría: -EUA -Uruguay -Argentina	No se encuentra mucha información sobre su uso como adsorbente y posible regeneración.	Vida útil después de envasado: de 12 a 18 meses.

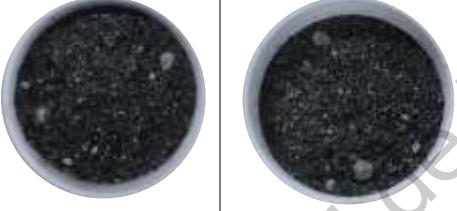
Tabla 6. Ciclo de vida de los materiales desecantes propuestos Fuente: Elaboración propia a partir de: Subsecretaría de Minería, Dirección General del Desarrollo Minero (2017), Gobierno de España (2020), Coordinación General de Minería, Dirección General de Desarrollo Minero (2013), Tovar

& Chargoy, Asociación Mexicana de la Industria Salinera A. C. (2017), Gobierno de España (2019), El Confidencial (2018), Manzo (2020), SAGARPA (2017), Andrade, Campo, & Segura (2014), Ferrandis (2016), (The Indian Express; Design News; I'm Innovation , 2019)

La tabla anterior se utilizó para comprender el nivel de sustentabilidad de cada uno de los materiales elegidos.

Prueba de comportamiento de los materiales desecantes propuestos

Al analizar los materiales desecantes propuestos ante el contacto directo con agua, se obtuvieron los siguientes resultados:

	<i>Materiales</i>	<i>Comentarios</i>
<i>Arena</i>		<p>Este material si absorbió el agua, pero también filtró gran parte de ella, por lo que, si se considera utilizar dentro del prototipo, el diseño de esta deberá responder a esta observación y permitir que el agua filtrada salga y desemboque en otro sitio.</p> <p>En cuanto a la aplicación de calor, no se observaron cambios significativos.</p>
<i>Arroz</i>		<p>Este material absorbe por completo el agua, no existe ninguna filtración como en el caso de la arena, sin embargo, si sufre cambios en su fisonomía.</p> <p>Y cuando se le aplicó calor no volvió a su estado original.</p>
<i>Cal</i>		

		<p>En cuanto a la cal, este material también sufrió cambios físicos al contacto con el agua. Y su estado empeoró al aplicársele calor para intentar su regeneración, ya que se convirtió en roca.</p>
<i>Sal</i> 		<p>La sal de mar, fue la que mejor comportamiento obtuvo en cuanto a la adsorción, ya que toda el agua fue adsorbida por el material.</p>
<i>Gel de sílice</i> 		<p>El gel de sílice al igual que la sal tuvo una buena adsorción, al adsorber toda el agua que se le fue administrada. Y en cuanto a su regeneración al aplicársele calor volvió a su apariencia original casi en un 100%.</p>

Tabla 7. Análisis del comportamiento de los materiales desecantes propuestos Fuente: Elaboración propia

Prueba de la adsorción de vapor de agua de los materiales desecantes elegidos

Una vez observado el comportamiento de los materiales propuestos ante el agua y la aplicación de calor para regeneración, se seleccionaron: la sal de mar y el gel de sílice para la prueba de adsorción de vapor de agua.

Se obtuvieron los siguientes resultados (Grafico 1 y 2) en donde se observa el nivel de adsorción de cada uno de los materiales durante un periodo de 60 minutos, el gel de sílice mostro mayor capacidad de adsorción de vapor de agua, por lo que finalmente se eligió como el material desecante para la estrategia de deshumificación sustentable.

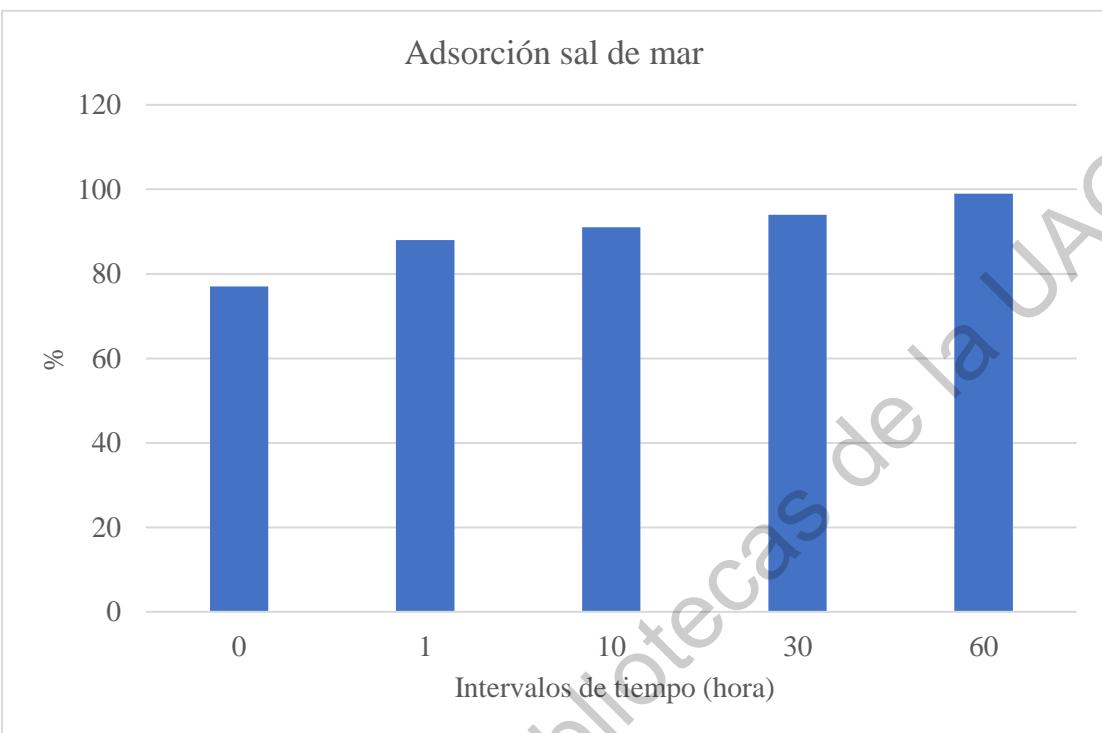


Gráfico 2. Adsorción de vapor de agua de la sal de mar. Fuente: Elaboración propia

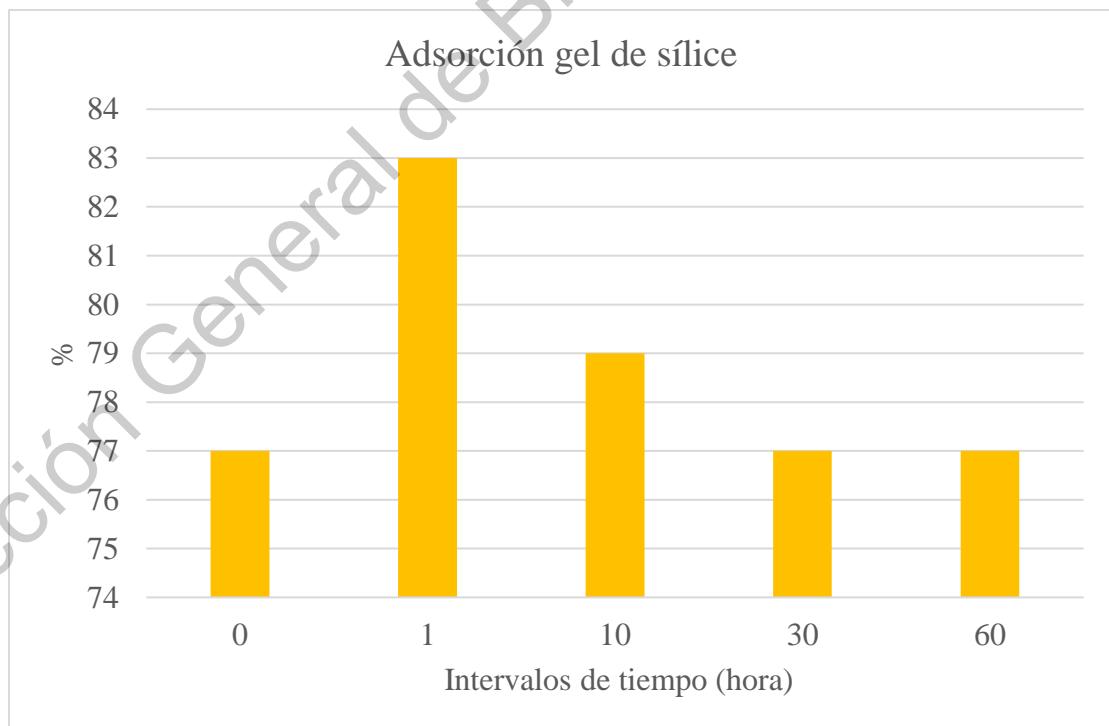


Gráfico 1. Adsorción de vapor de agua del gel de sílice. Fuente: Elaboración propia

8.2 Ideación

8.2.1 Diseño de la estrategia

Los dos últimos diseños del prototipo fueron comentados con el equipo y se determinaron las siguientes cuestiones:

- En primer lugar, se necesitaba de un elemento que permitiera la regeneración del material desecante.
- En segundo, se necesitaba asegurar que el procedimiento de adsorción no se interrumpiera durante el proceso de regeneración.

Con estas cuestiones se plantearon las siguientes soluciones:

- En cuanto al proceso de regeneración, se analizaron las propuestas mencionadas en el apartado de Estado del Arte, en las cuales se involucra aire caliente para la regeneración del material, por lo que se propuso añadir una resistencia, la cual fungiría como fuente de calor para calentar el aire que ayudaría con el proceso de regeneración.
- Y en cuanto a la segunda cuestión, se propuso que contara con dos elementos, en donde ambos compartieran las funciones de: adsorción y regeneración, de manera que funcionaran contrariamente, es decir, ambos contarían con filtros desecantes

De acuerdo con estas cuestiones se elaboró un diagrama donde se observa únicamente el prototipo desde una vista en planta, el cual se muestra a continuación:

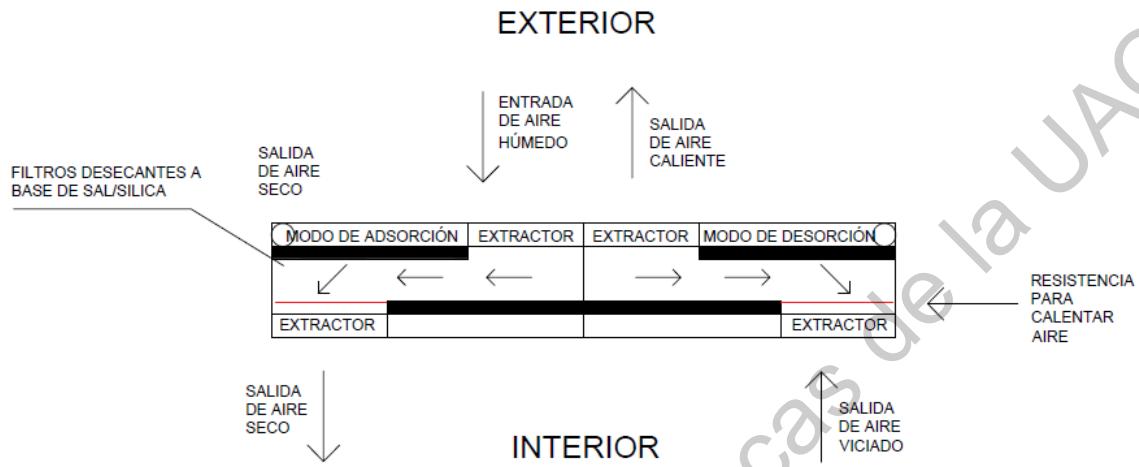


Figura 17. Prototipo final de la estrategia de deshumidificación sustentable desde una vista en planta
Fuente: Elaboración propia

Para una mejor comprensión, se realizaron tres diagramas en donde se muestra el ciclo de funcionamiento de la estrategia desde una vista en planta, acompañados cada uno de ellos con una imagen 3D del prototipo en donde se observa la etapa de funcionamiento. En los diagramas se aprecia tanto los elementos que componen el prototipo como el intercambio de aire entre interior y exterior de la vivienda.

Se marcan los elementos en diferente color según su funcionamiento, en rojo aparecen los que se encuentren apagados, en verde los que se encuentren funcionando y en azul cuando el sistema desecante este en proceso de regeneración.

El ciclo de funcionamiento se compone de tres etapas, la primera se sitúa en un contexto en donde el prototipo recién comienza su funcionamiento por lo que ninguno de los sistemas desecantes se encuentra saturado al no haber deshumidificado anteriormente, siendo uno de los sistemas de deshumidificación junto con dos de los extractores para el intercambio de aire, los que estarían en funcionamiento.

La segunda etapa, se refiere a cuando el material desecante del primer sistema de deshumidificación ya se encuentra saturado por lo que inicia su etapa de regeneración, al mismo tiempo que el segundo sistema desecante continua con el proceso de deshumidificación. Los elementos en función son nuevamente dos extractores para el intercambio del aire, uno de los sistemas desecantes para la función de deshumidificación y la resistencia para el proceso de regeneración.

Por último, la tercera etapa muestra cómo se alternan las funciones de regeneración y deshumidificación dependiendo del estado del sistema desecante, si se encuentra saturado o no. Y los elementos que se encuentran funcionando son los mismos que en la segunda etapa, la diferencia se encuentra en que son del segundo sistema de deshumidificación.

Etapas 1.

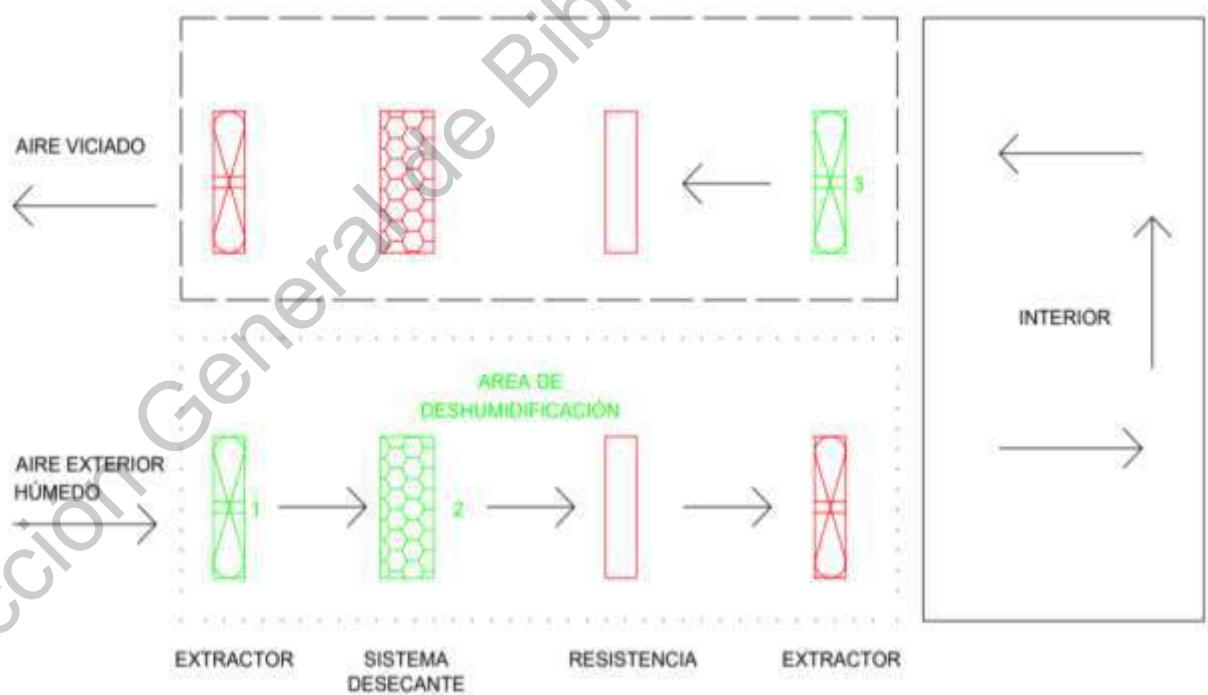


Figura 18. Diagrama de la etapa 1 del ciclo de funcionamiento de la estrategia sustentable de deshumidificación desde una vista en planta Fuente: Elaboración propia

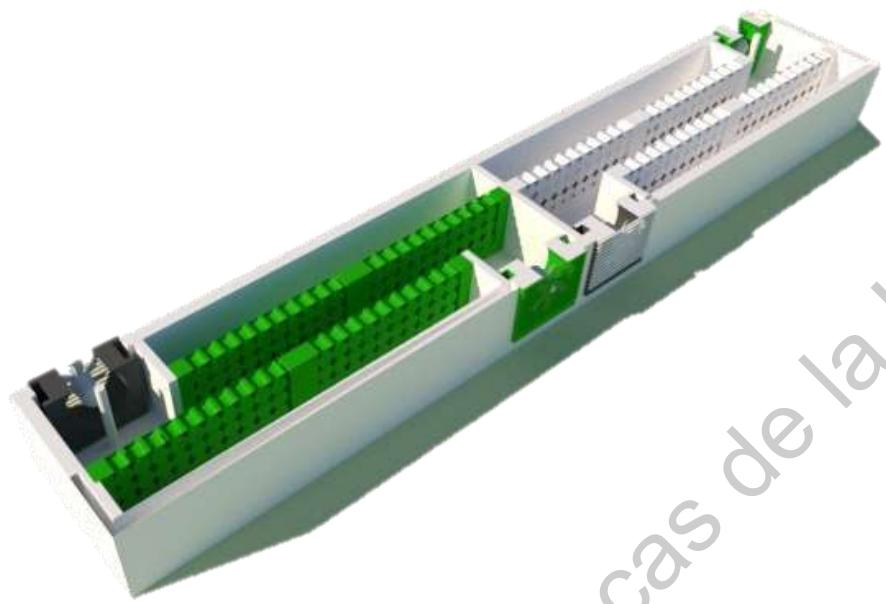


Figura 19. Primera etapa del ciclo de funcionamiento Fuente: Elaboración propia

Etapa 2.

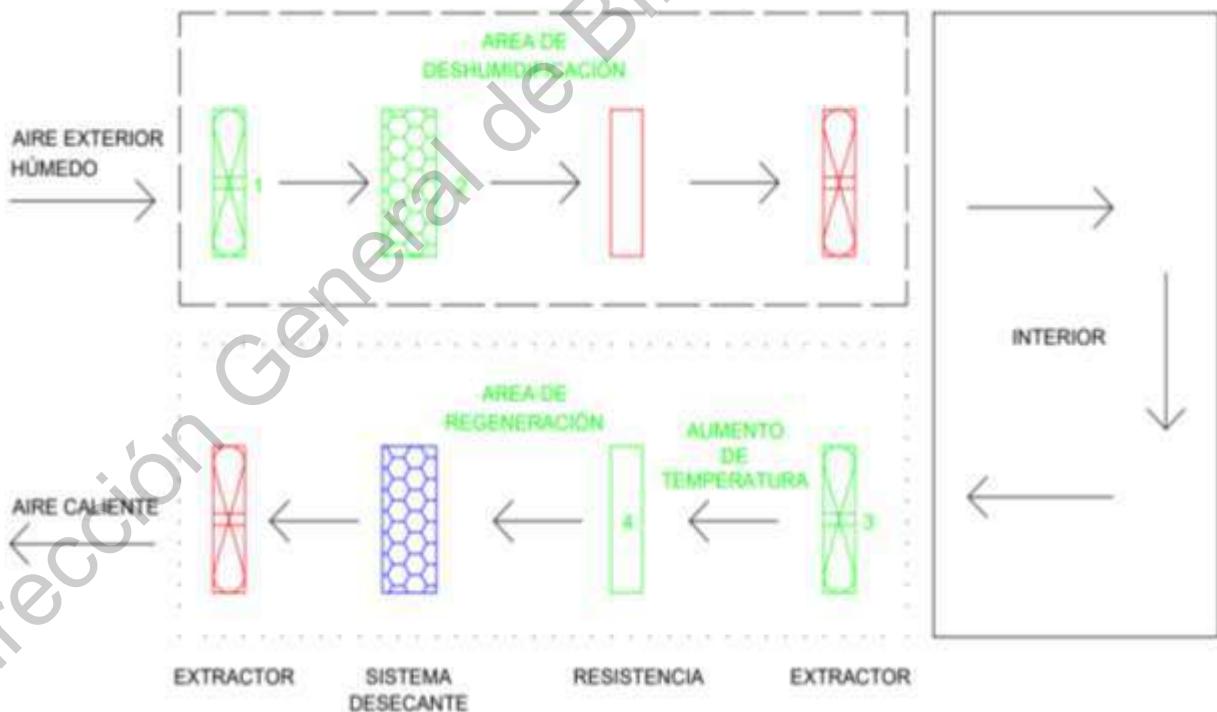


Figura 20. Diagrama de la etapa 2 del ciclo de funcionamiento de la estrategia sustentable de deshumidificación desde una vista en planta Fuente: Elaboración propia



Figura 21. Segunda etapa del ciclo de funcionamiento Fuente: Elaboración propia

Etapa 3.

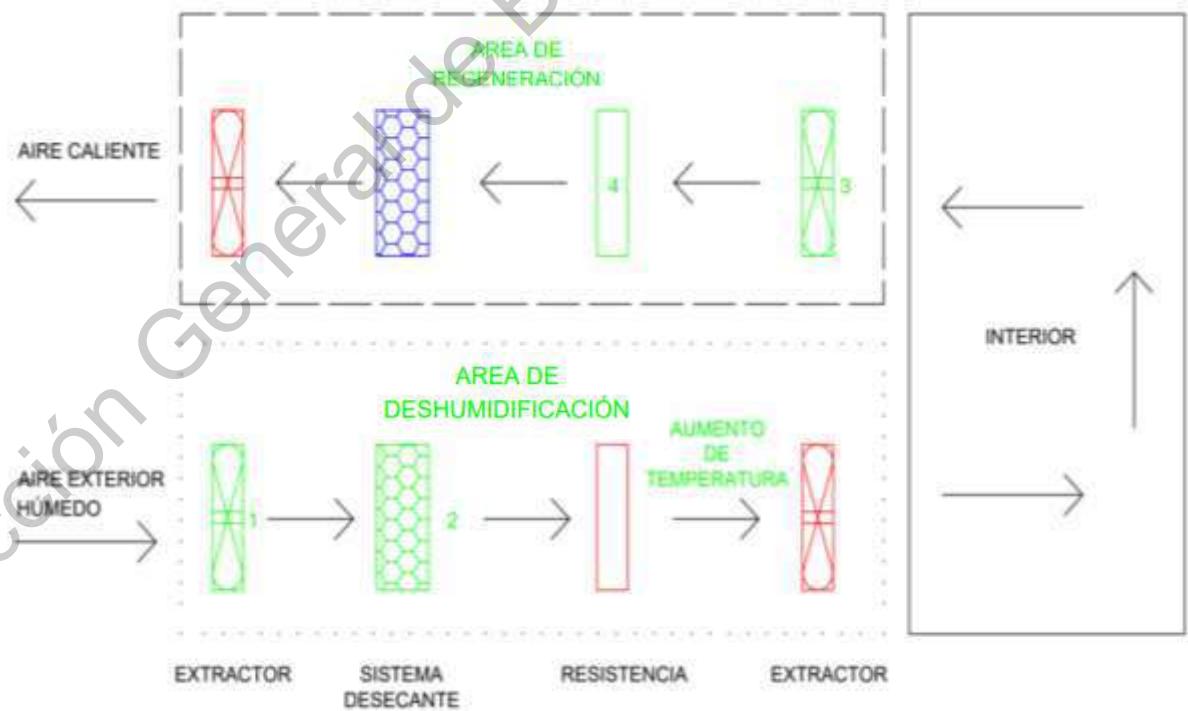


Figura 23. Diagrama de la etapa 3 del ciclo de funcionamiento de la estrategia sustentable de deshumidificación desde una vista en planta Fuente: Elaboración propia

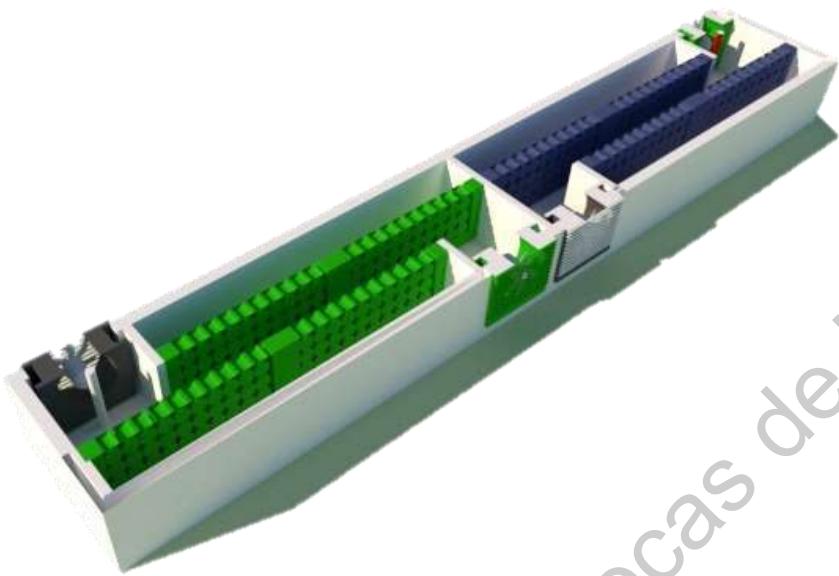


Figura 242. Tercera etapa del ciclo de funcionamiento Fuente: Elaboración propia

Como se observó en los pasados diagramas, el funcionamiento de los dos sistemas desecantes se irá alternando de acuerdo a la capacidad de adsorción del sistema desecante y su regeneración.

8.3 Prototipado

8.3.1 Construcción del prototipo

El prototipo de la estrategia de deshumidificación sustentable fue terminado, y también se generaron algunas imágenes en calidad de render para poder apreciar cómo se instalaría en las viviendas.



Figura 25. Imágenes del prototipo construido Fuente: Elaboración propia



Figura 26. Imágenes representativas del prototipo instalado en una vivienda Fuente: Elaboración propia

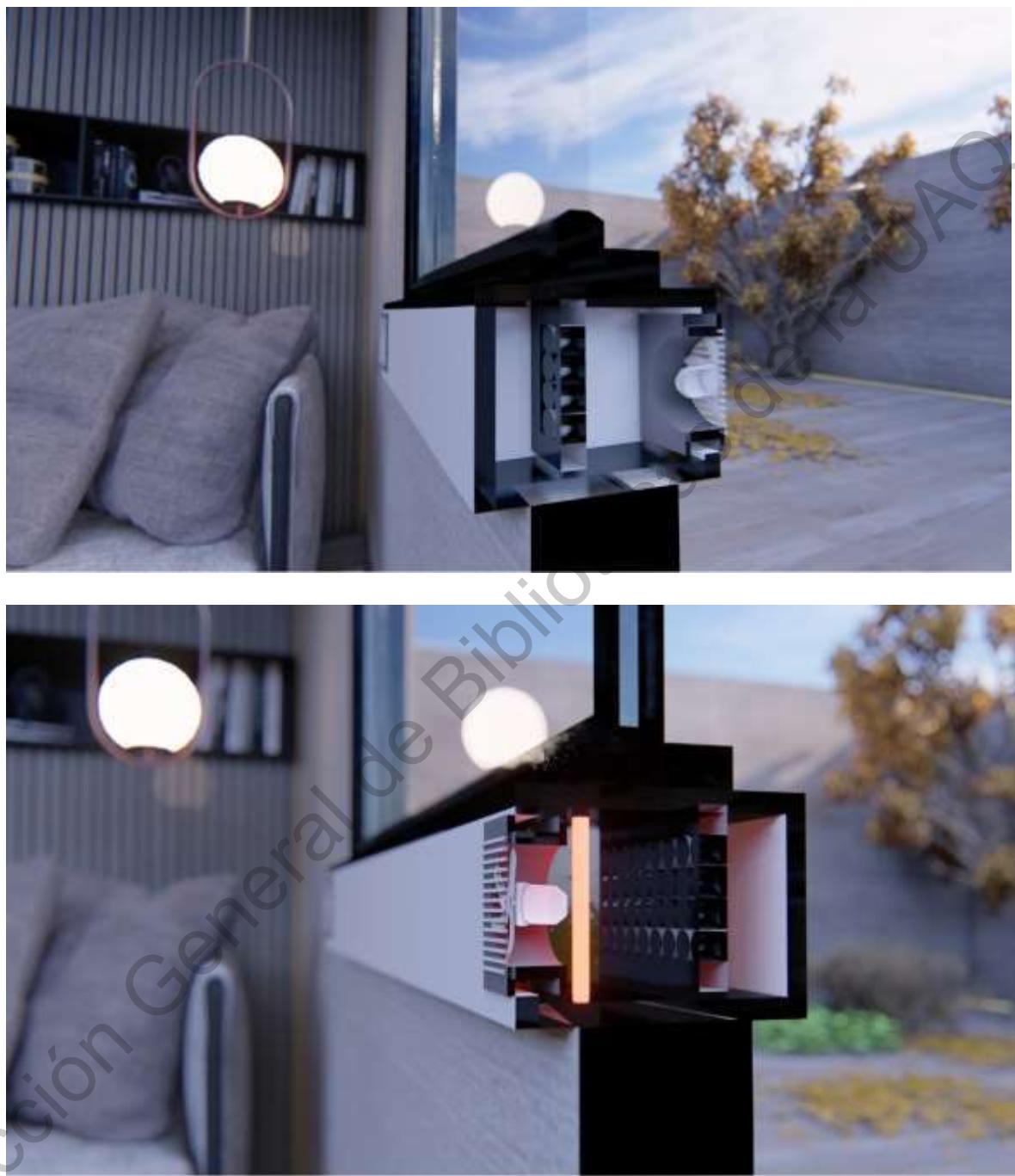


Figura 27. Imágenes representativas del prototipo instalado en una ventana desde una vista en corte
Fuente: Elaboración propia

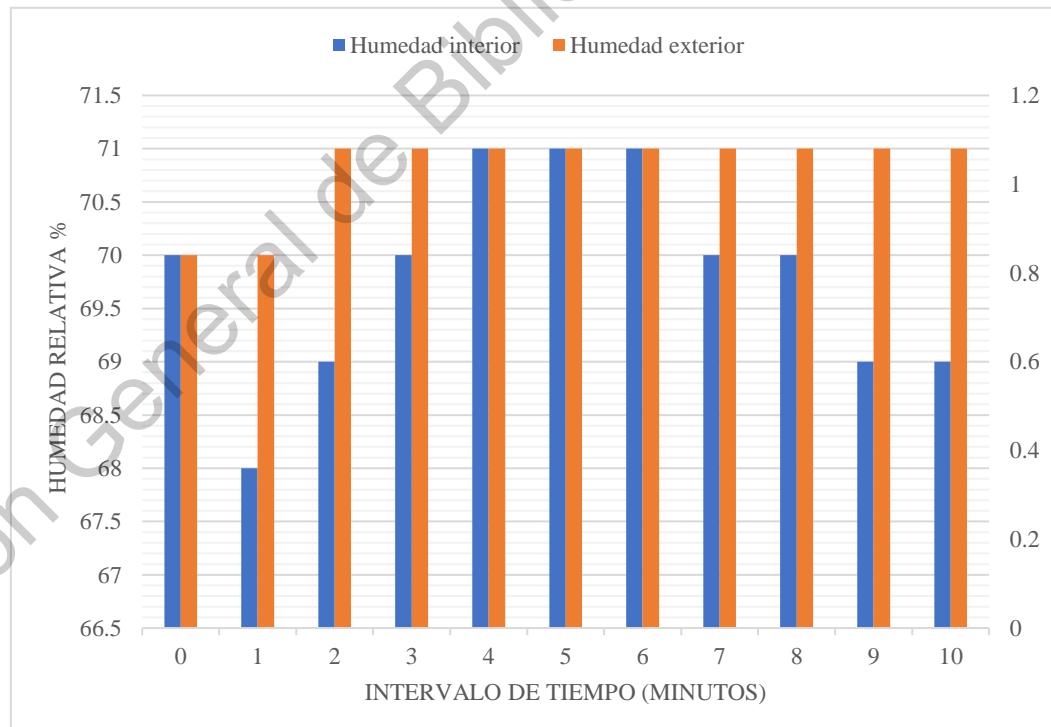
8.4 Testeo

8.4.1 Validación confort higrotérmico

Se presentan primeramente los datos de temperatura y humedad por separado para mejor comprensión y finalmente en un gráfico en conjunto por motivos de comparación, en cada uno de los resultados de las pruebas.

Prueba de funcionamiento del prototipo

Los resultados de las pruebas del prototipo fueron los siguientes:



1. Primera prueba. Resultados de la medición de adsorción de la humedad con 100 gramos de gel de sílice, en un lapso de diez minutos con mediciones cada minuto.

Gráfico 3. Flujo de niveles de humedad durante el proceso de adsorción mediante gel de sílice 100 gr/10 min Fuente: Elaboración propia

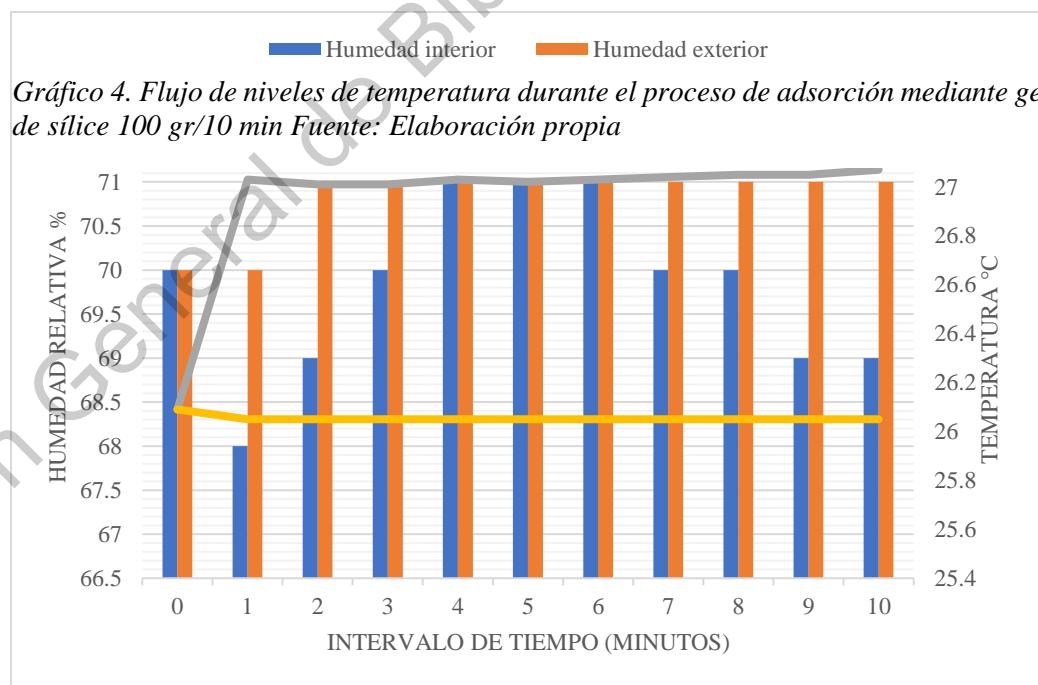
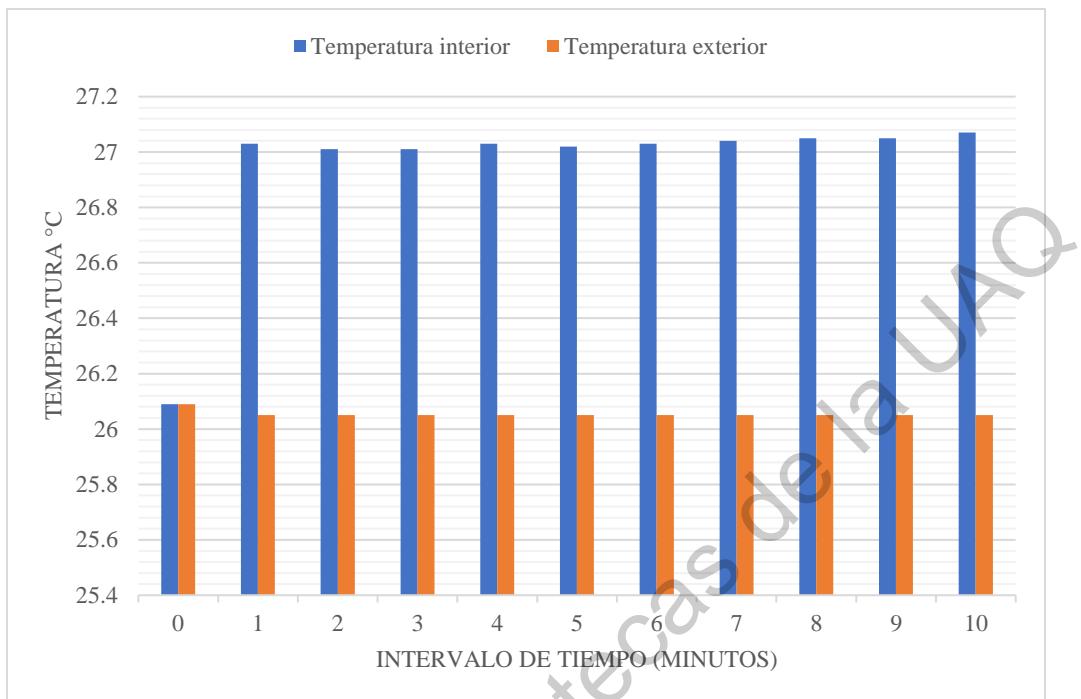


Gráfico 5. Flujo de niveles de temperatura y humedad durante el proceso de adsorción mediante gel de sílice 100 gr/10 min Fuente: Elaboración propia

En esta primera prueba se observó una disminución en el porcentaje de humedad interior durante los primeros tres minutos, pasados estos, aumentó la humedad al exterior lo que afectó también el porcentaje de la humedad al interior, que se mantuvo estática durante unos minutos, para finalmente volver a descender, logrando una disminución desde 71% que fue el nivel máximo alcanzado, al 69%.

2. Segunda prueba. Resultados de la medición de adsorción de la humedad con 100 gramos de gel de sílice, en un lapso de 60 minutos con mediciones cada cinco minutos.

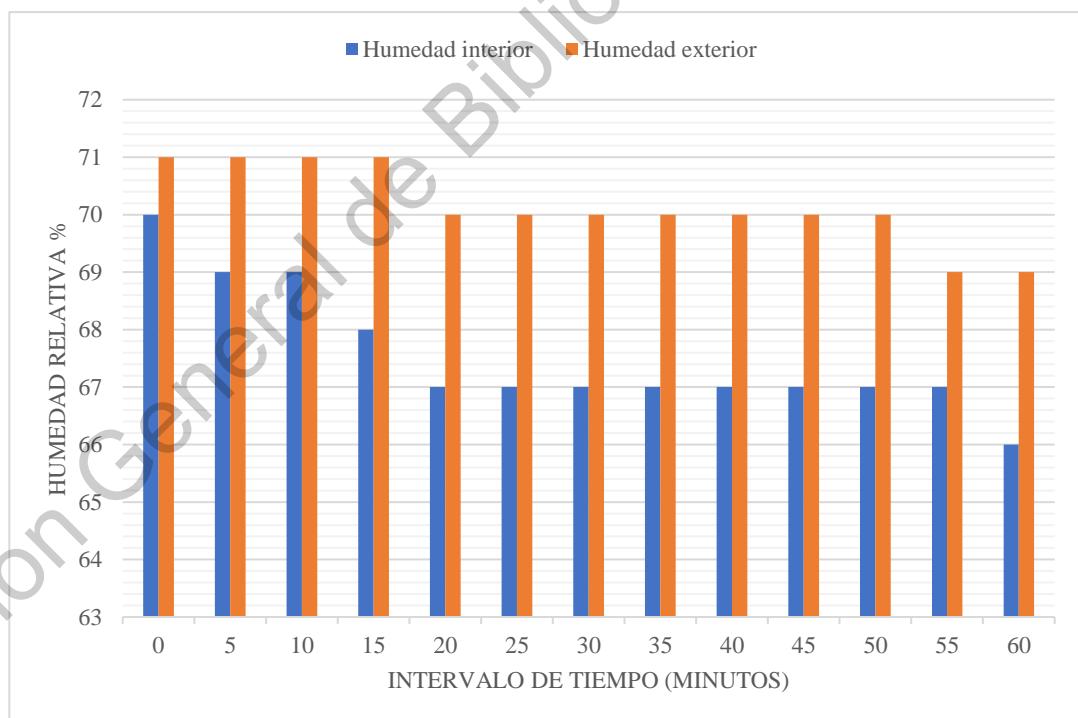


Gráfico 6. Flujo de niveles de humedad durante el proceso de adsorción mediante gel de sílice 100 gr/60 min Fuente: Elaboración propia

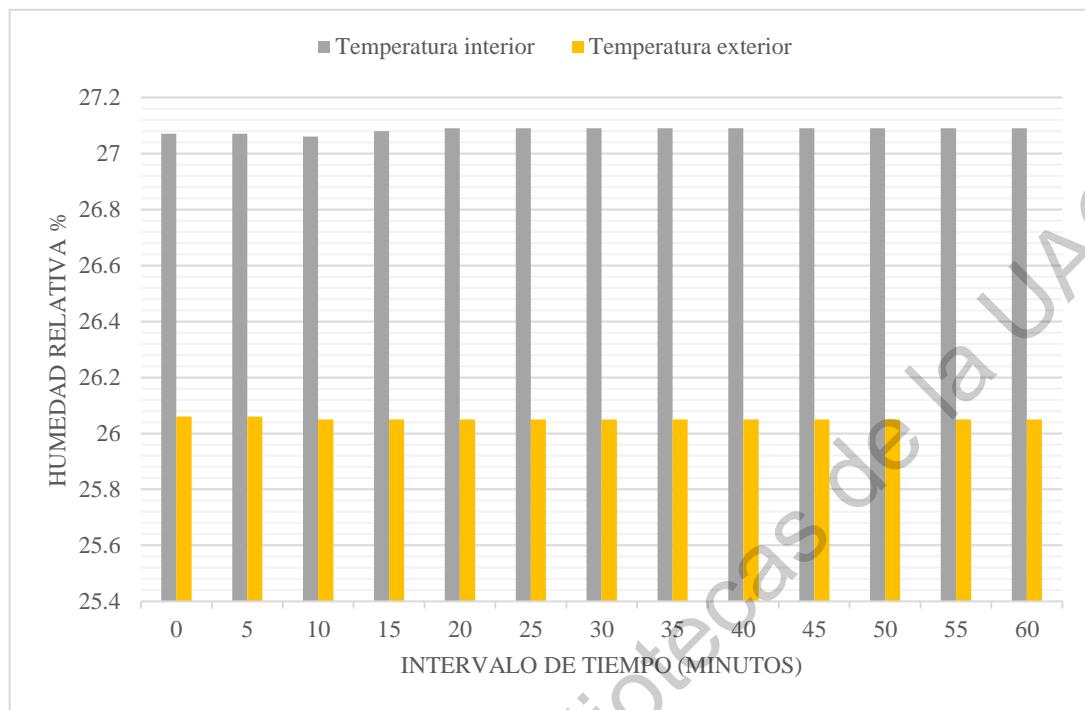


Gráfico 7. Flujo de niveles de temperatura durante el proceso de adsorción mediante gel de sílice 100 gr/60 min Fuente: Elaboración propia

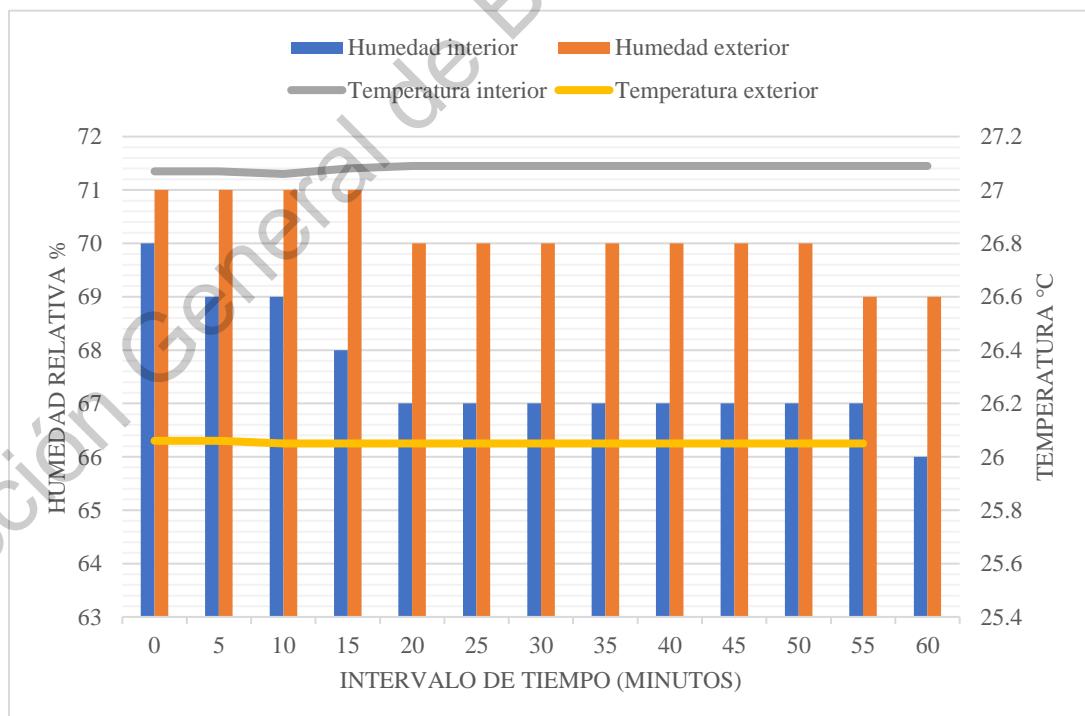


Gráfico 8. Flujo de niveles de humedad y temperatura durante el proceso de adsorción mediante gel de sílice 100 gr/60 min Fuente: Elaboración propia

En la prueba de 60 minutos se obtuvo una disminución del 3% de humedad, dando un margen de confort comparando con la humedad al exterior, en cuanto a los cambios en la temperatura se aumentó poco más de un grado centígrado al exterior, manteniéndose constante durante todo el periodo de prueba.

3. Segunda prueba. Resultados de la medición de adsorción de la humedad con 200 gramos de gel de sílice, en un lapso de 60 minutos con mediciones cada 5 minutos.

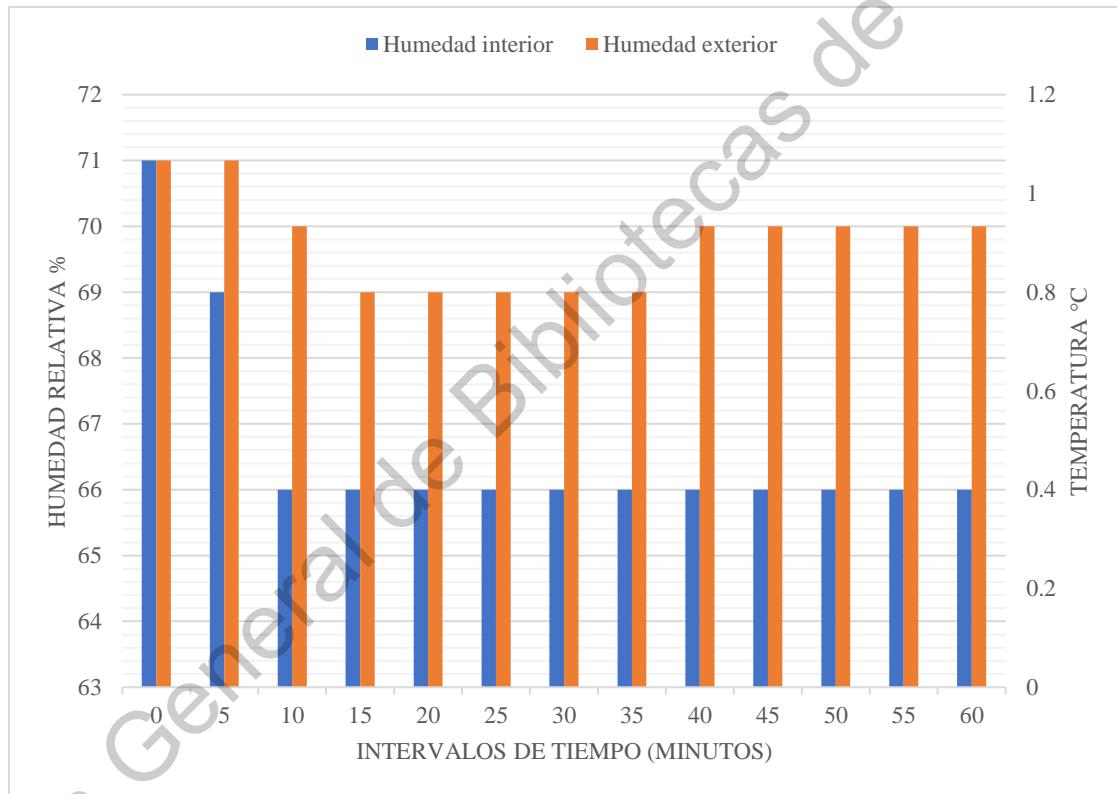


Gráfico 9. Flujo de niveles de humedad durante proceso de adsorción mediante gel de sílice 200 gr/60 min Fuente: Elaboración propia

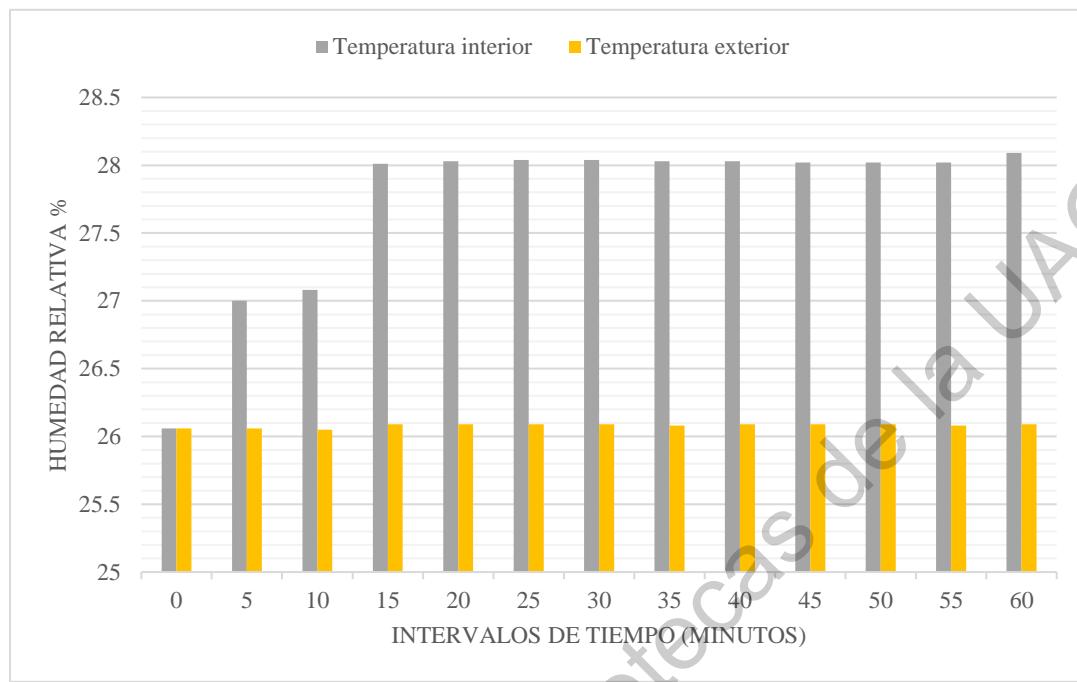


Gráfico 11. Flujo de niveles de temperatura durante proceso de adsorción mediante gel de sílice 200 gr/ 60 min

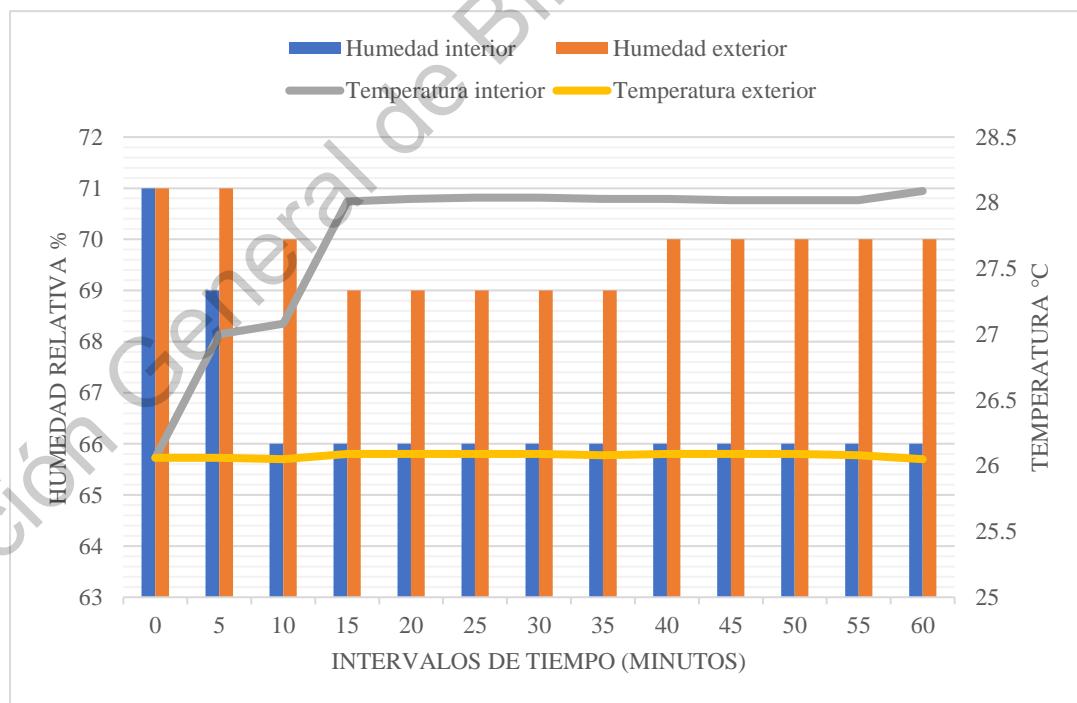


Gráfico 10. Flujo de niveles de temperatura y humedad durante proceso de adsorción mediante gel de sílice 200 gr/ 60 min Fuente: Elaboración propia

Durante esta prueba se obtuvo una disminución de humedad al interior de un 4%, tomando en cuenta que la humedad al exterior también sufrió cambios; mientras que la temperatura volvió a experimentar un aumento de dos grados centígrados.

4. Cuarta prueba. Resultados de la medición de adsorción de la humedad con 400 gramos de gel de sílice, en un lapso de 60 minutos con mediciones cada 5 minutos.

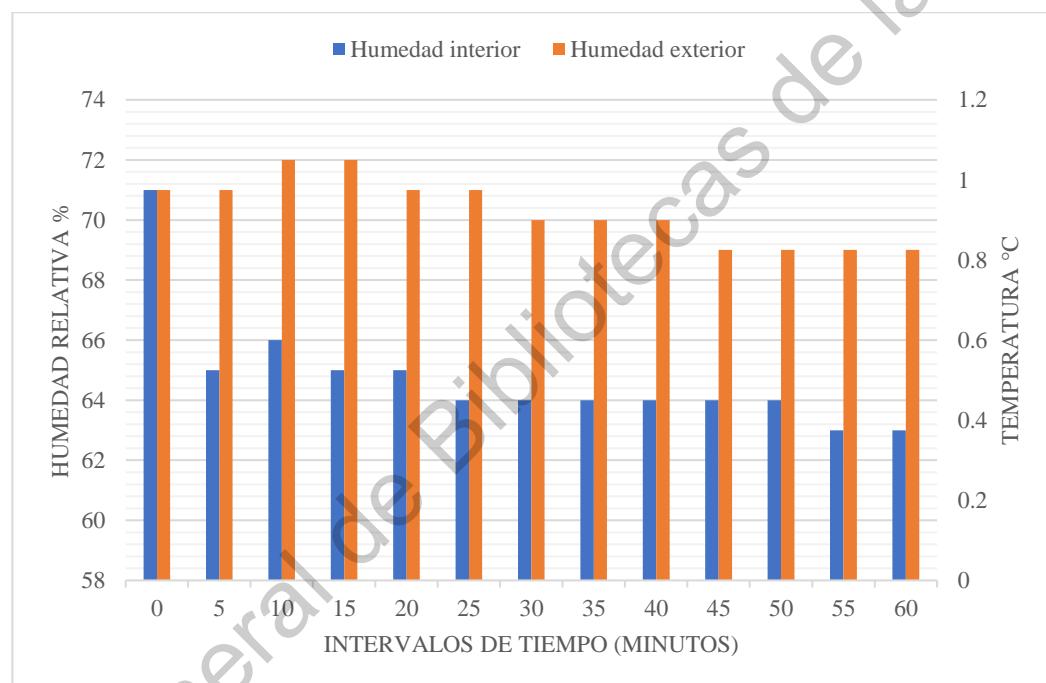


Gráfico 12. Flujo de niveles de humedad durante proceso de adsorción mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min Fuente: Elaboración propia.

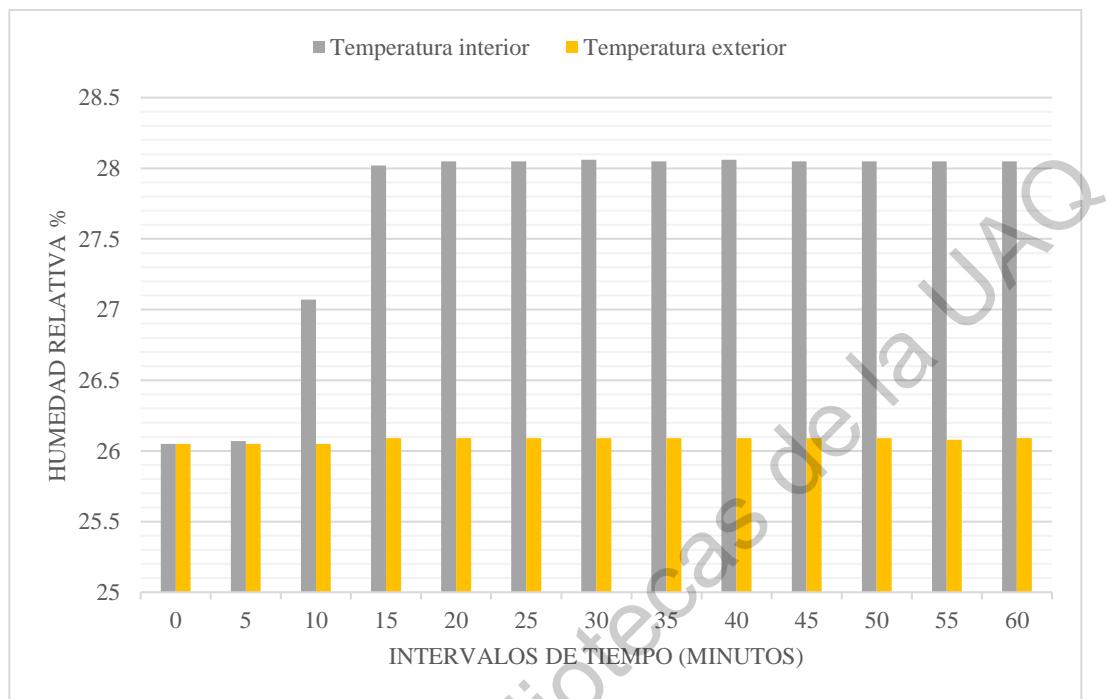


Gráfico 13. Flujo de niveles de temperatura durante proceso de adsorción mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min Fuente: Elaboración propia

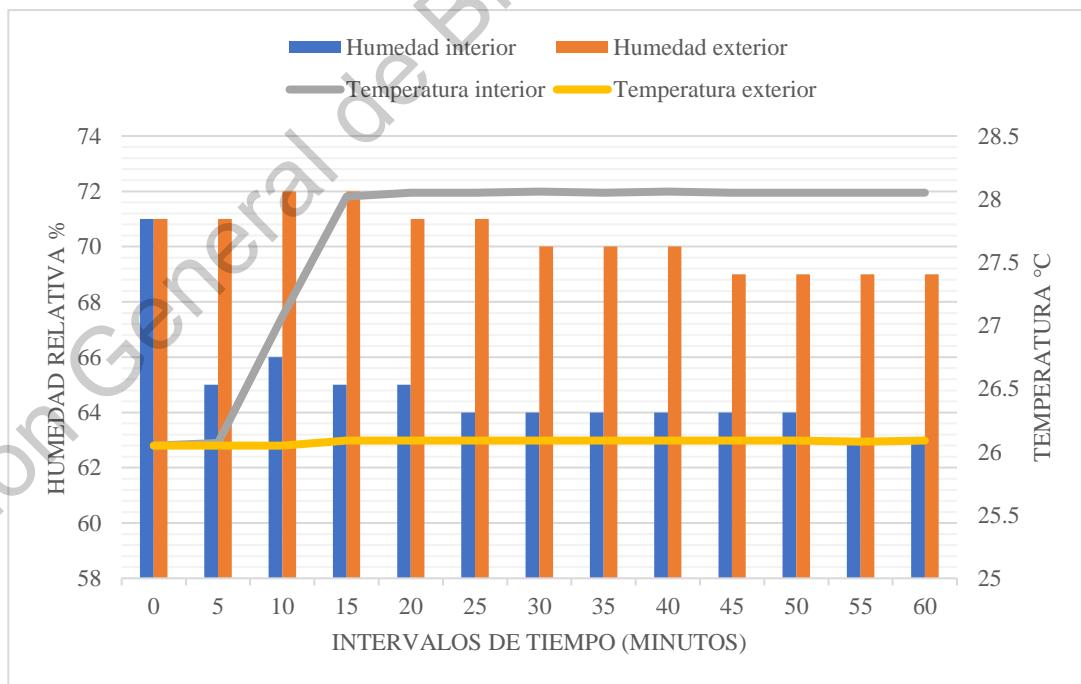


Gráfico 14. Flujo de niveles de temperatura y humedad durante proceso de adsorción mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min Fuente: Elaboración propia

Durante la prueba con 400 gr se obtuvo una disminución de la humedad relativa del 6% durante el periodo de 60 minutos, mientras que la temperatura igualmente que, en las pruebas anteriores, sufrió un aumento de dos grados centígrados.

Prueba de deshumidificación en un espacio

Los resultados de las segundas pruebas fueron los siguientes:

1. Primera prueba. Resultados de la medición de adsorción del material desecante en un espacio de 50 cm³, durante un lapso de 60 minutos con mediciones cada 5 minutos.

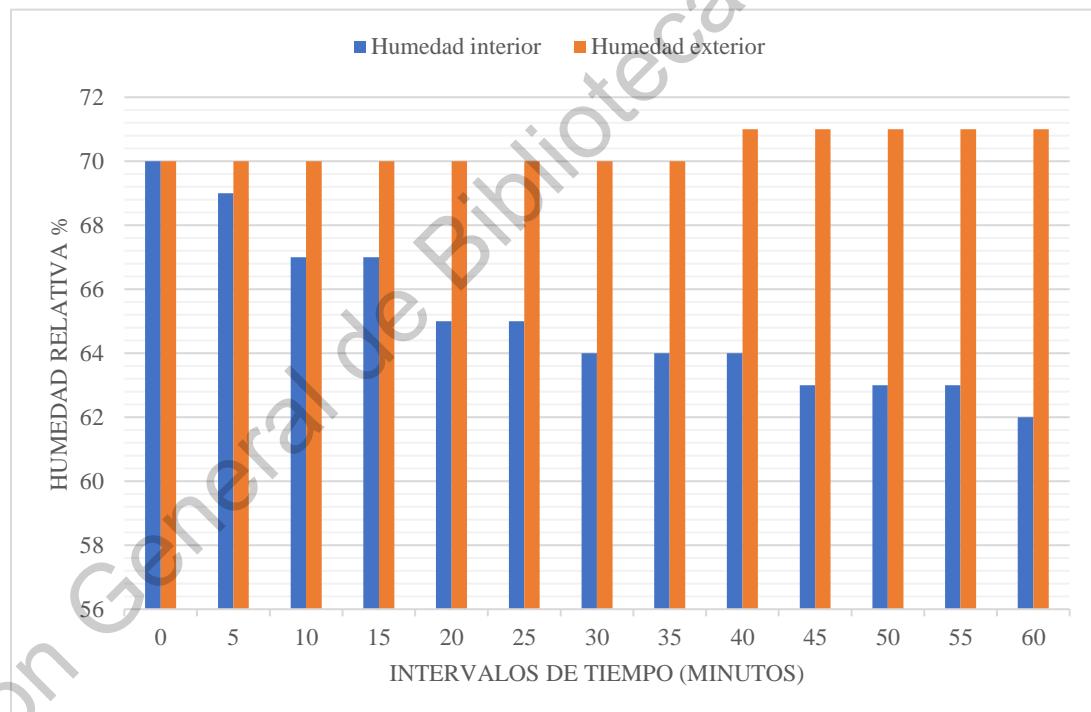


Gráfico 15. Flujo de niveles de humedad durante proceso de adsorción mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min en un espacio Fuente: Elaboración propia

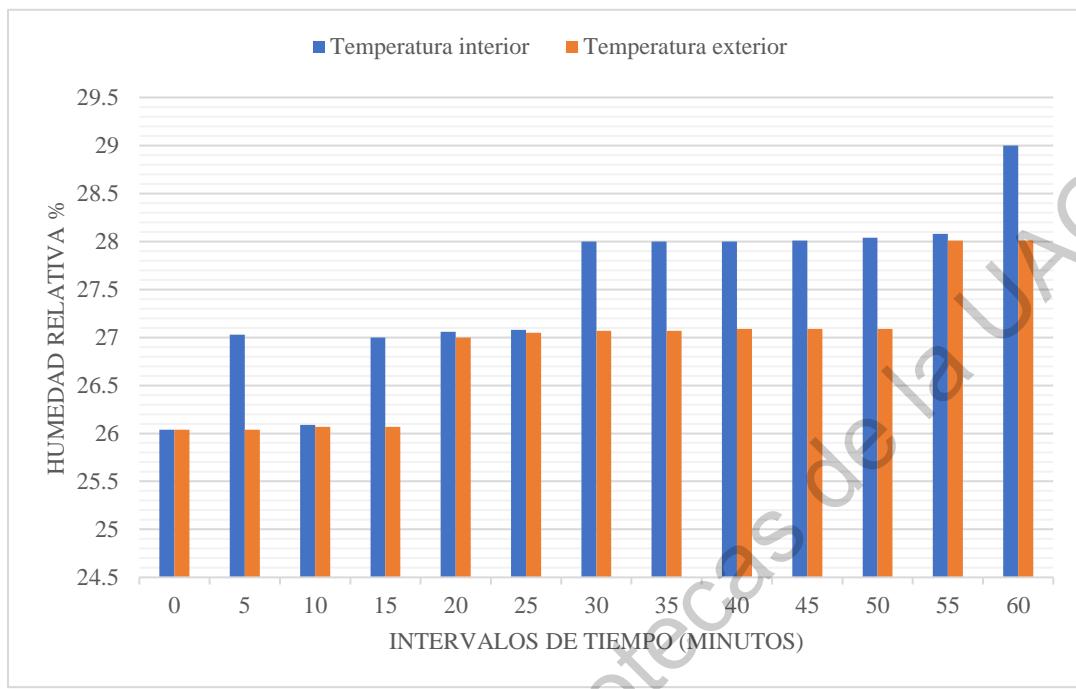


Gráfico 166. Flujo de niveles de temperatura durante proceso de adsorción mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min en un espacio Fuente: Elaboración propia

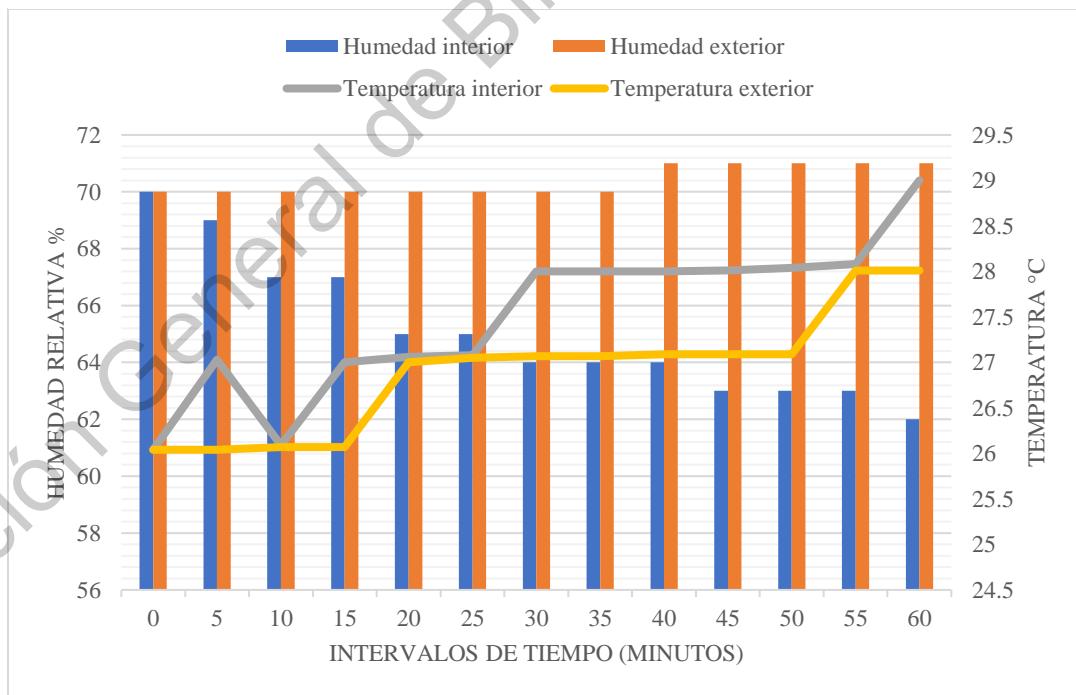


Gráfico 177. Flujo de niveles de humedad y temperatura durante proceso de adsorción mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min en un espacio Fuente: Elaboración propia

La primera prueba dentro de un espacio obtuvo los siguientes resultados, la humedad relativa tanto al exterior como al interior al inicio era de 70%, y durante el lapso de los 60 minuto se logró una reducción del 8% comparado con la inicial, además la humedad al exterior aumentó uno por cierto por lo que si se compara la humedad al exterior con la del interior fue una diferencia del 9%. En cuanto a los datos de temperatura, hubo un aumento de dos grados al exterior, lo que también afecto los niveles al interior, los cuales aumentaron un grado más, sin embargo, la diferencia en esta prueba con las interiores es que el aumento de temperatura al interior comparada con la del exterior fue únicamente de un grado centígrado.

2. Segunda prueba. Resultados de la medición de adsorción y regeneración del material desecante en un espacio de 50 cm³, durante un lapso de 60 minutos con mediciones cada 5 minutos.

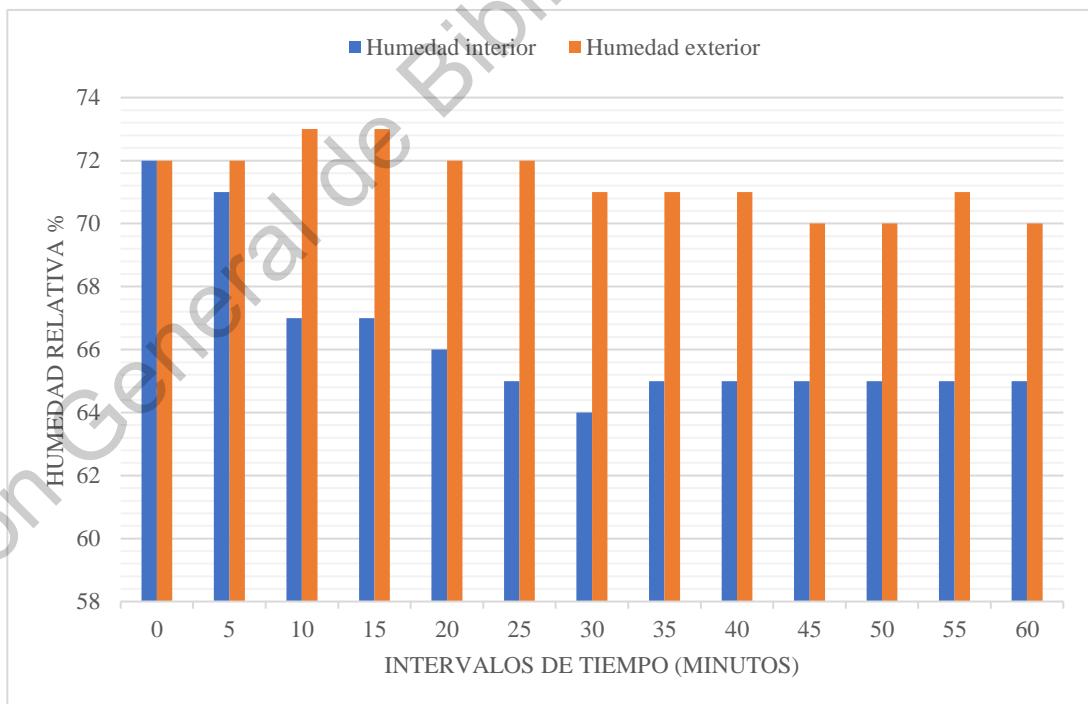


Gráfico 18. Flujo de niveles de humedad durante proceso de adsorción y regeneración mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min en un espacio Fuente: Elaboración propia

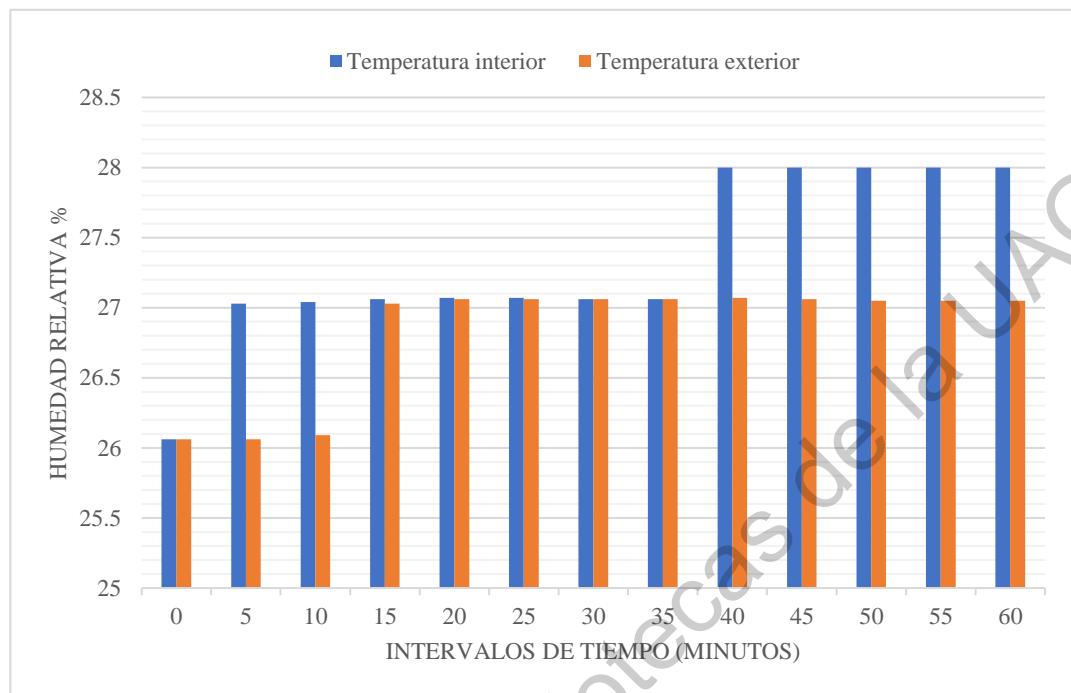


Gráfico 19. Flujo de niveles de temperatura durante proceso de adsorción y regeneración mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min en un espacio Fuente: Elaboración propia

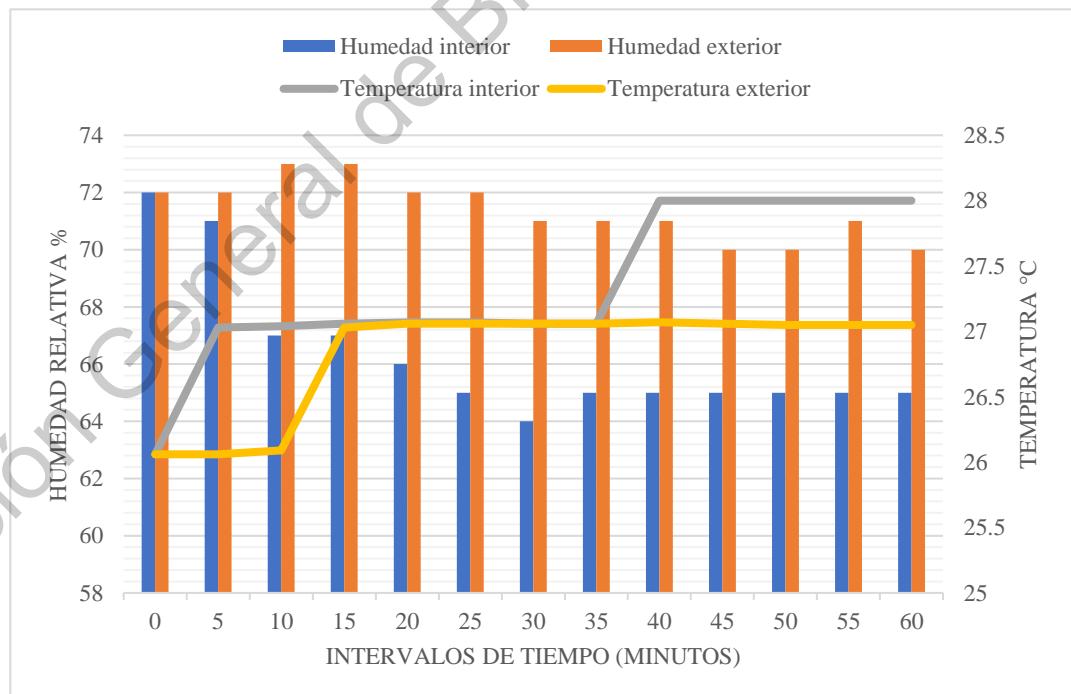


Gráfico 20. Flujo de niveles de humedad y temperatura durante proceso de adsorción y regeneración mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min en un espacio Fuente: Elaboración propia

En esta prueba se registraron los datos de temperatura y humedad durante el proceso de adsorción y regeneración, con la intención de observar la interacción de ambos procesos y que efectos se producían durante ambos.

Los resultados fueron una reducción de 70% de humedad a 65%, lo que nos da un total de reducción del 5%, siendo menor que en la prueba anterior, sin embargo, es importante mencionar que durante el periodo de prueba se sufrió de aumento en los niveles de humedad al exterior lo que afectó los niveles al interior también, llegando a aumentar hasta el 73% a los diez minutos de iniciada la prueba, y aunque finalmente volvió a bajar al 70%, obviamente afectó el porcentaje total de adsorción a los 60 minutos.

En cuanto a los datos de temperatura nuevamente se produjo un aumento de temperatura al exterior, por lo que la temperatura interior que pasó de los 26°C a los 28°C, solo aumentó un grado centígrado al compararse con la exterior que aumentó a los 27°C.

A causa de los cambios en el porcentaje total de adsorción al final de la prueba, los cuales se debieron al flujo de humedad relativa que se produjo en el lapso intermedió, se decidió medir la prueba durante un periodo de tiempo más largo.

3. Tercera prueba. Resultados de la medición de adsorción y regeneración del material desecante en un espacio de 50 cm³, durante un lapso de 4 horas con mediciones cada 30 minutos.

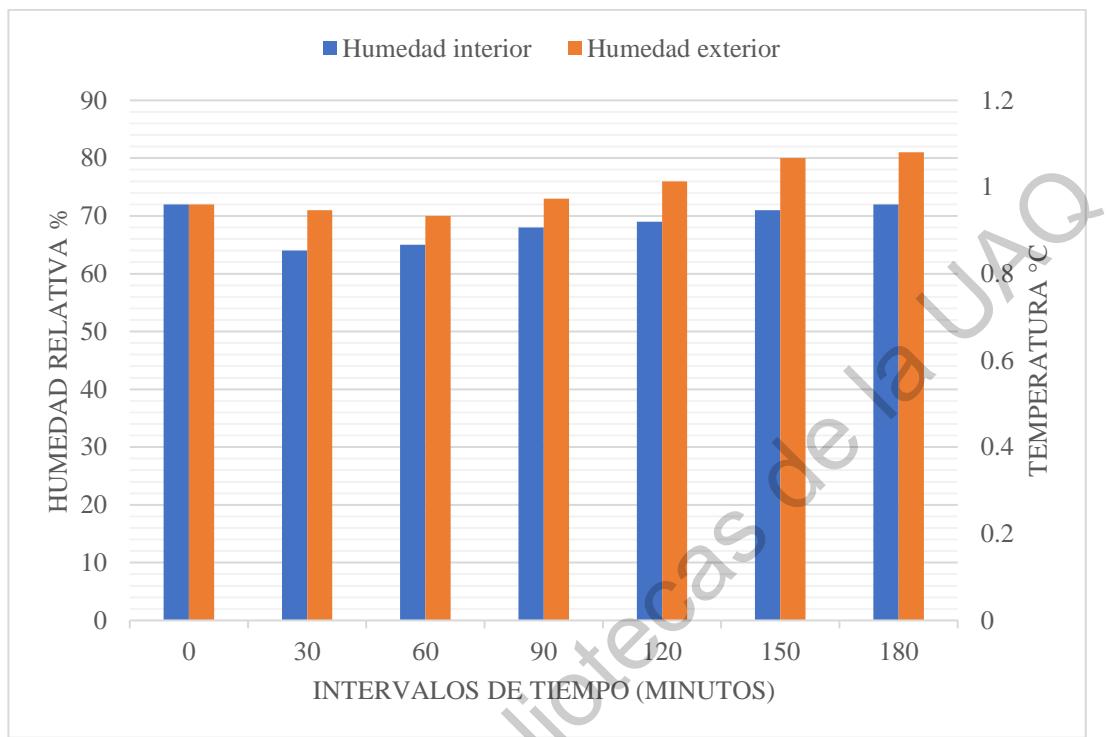


Gráfico 21. Flujo de niveles de humedad durante proceso de adsorción y regeneración mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min en un espacio Fuente: Elaboración propia

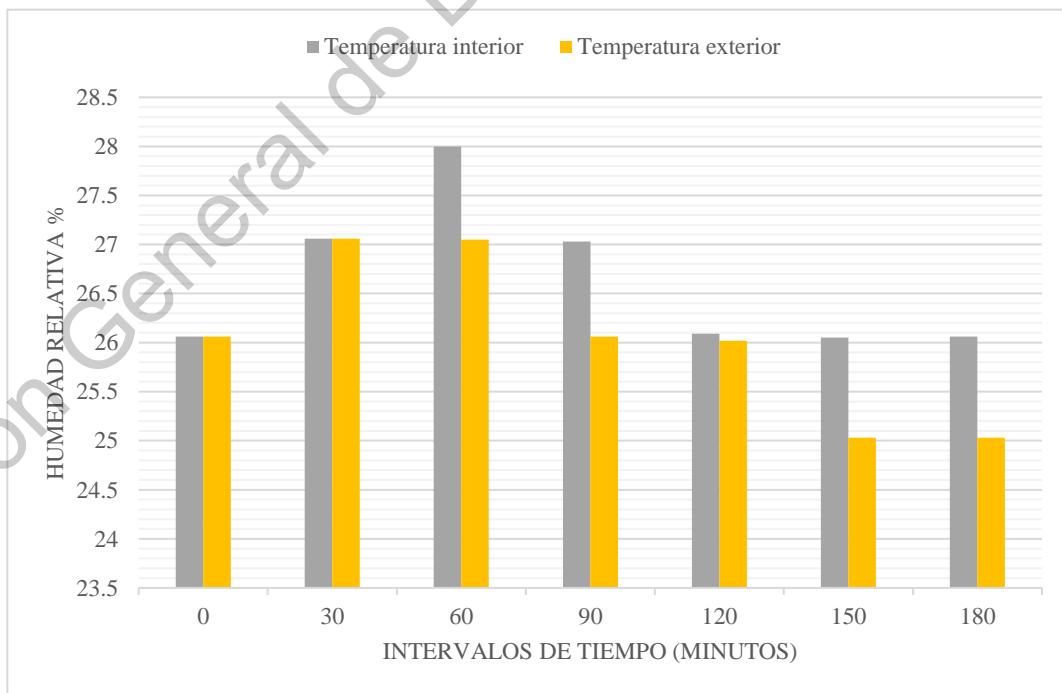


Gráfico 22. Flujo de niveles de temperatura durante proceso de adsorción y regeneración mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min en un espacio Fuente: Elaboración propia

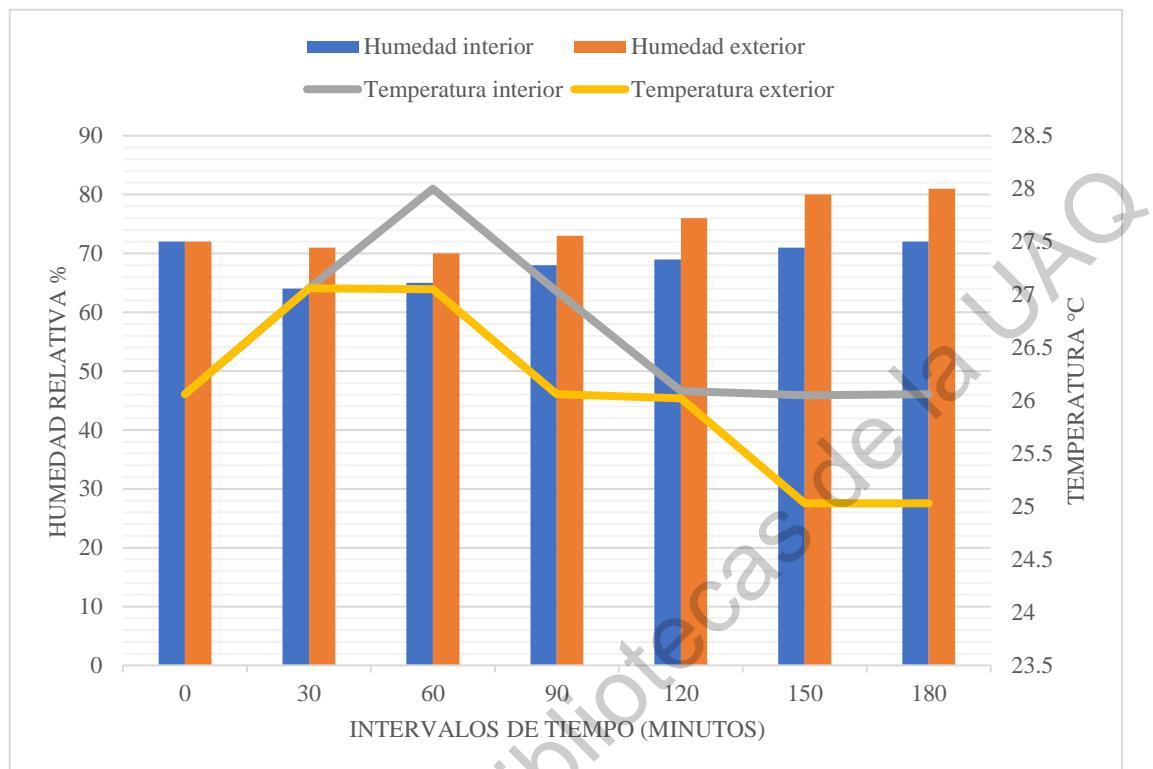


Gráfico 23. Flujo de niveles de humedad y temperatura durante proceso de adsorción y regeneración mediante gel de sílice 400 gr/ 60 min en un espacio Fuente: Elaboración propia

Durante esta prueba también se sufrió de cambios en la temperatura y humedad al exterior, lo que se vio reflejado también en los niveles al interior, sin embargo, se mantiene un porcentaje de adsorción del 9% si se comparan los niveles al interior y exterior, ya que al compararse con la inicial se mantiene igual debido a los aumentos que se presentaron durante el periodo de prueba. En cuanto a la temperatura, también se experimentó cambios, ya que presento una reducción de un grado centígrado al exterior, mientras que la de interior se mantuvo.

Por lo que corresponde al proceso de regeneración, se pesaron ambos filtros (del sistema que mantuvo la función de deshumidificación y del de la función de regeneración) durante un periodo que comenzó el proceso de deshumidificación (cuatro horas) y después el proceso de regeneración (tres horas).

Para la función de regeneración se escogieron los filtros que habían estado en contacto en las pruebas anteriores del prototipo, por lo que su peso era de 170 gramos cada uno, habiendo tenido un aumento del 70%, ya que su peso inicial era de 100 gramos.

Los resultados se muestran en las siguientes graficas:

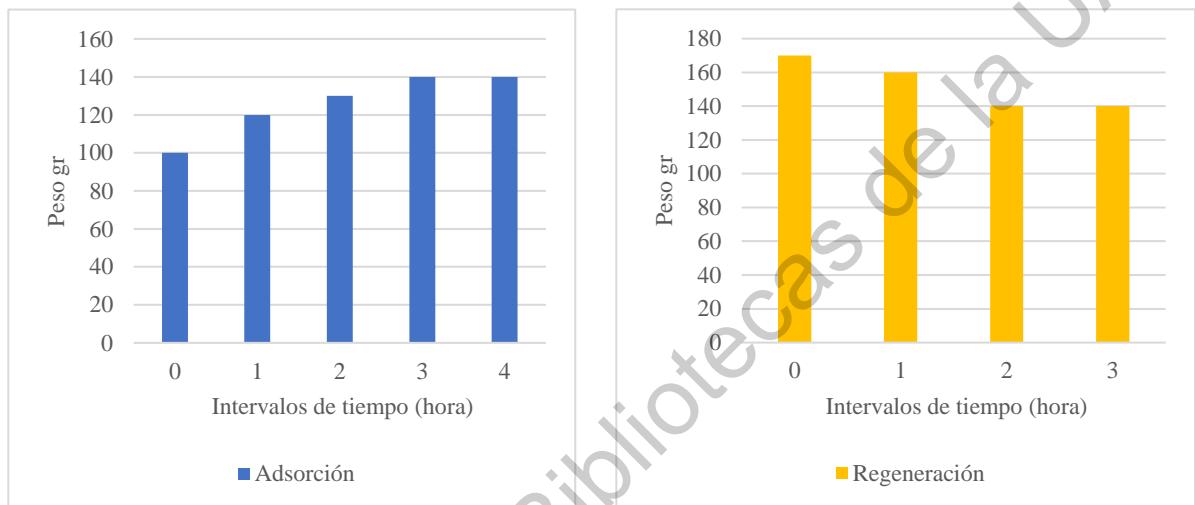


Gráfico 24. Filtros durante proceso de adsorción y regeneración Fuente: Elaboración propia

Durante las cuatro horas de adsorción los filtros aumentaron entre diez y veinte gramos por hora, dando un total de 140 gramos; mientras que los filtros en regeneración iniciaron con un peso de 170 gramos y a lo largo de las tres horas disminuyeron aproximadamente diez gramos por hora, dando un total de 140 gramos.

Como se observa el proceso de regeneración fue más lento del esperado, posiblemente a causa de la baja potencia de la resistencia, por lo que se considera necesario estudiar este factor.

9. VALIDACIÓN ENERGÉTICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL

En este apartado se realizó una comparativa del impacto energético, económico y ambiental del uso del aire acondicionado y la estrategia de deshumidificación sustentable propuesta en esta investigación. La comparativa se realizó únicamente con un enfoque en el consumo

energético que ambos pueden demandar y las implicaciones económicas y ambientales que conlleva esta demanda, debido a que el prototipo es apenas un primer acercamiento y los materiales con los que se realizó aún no se tratan de materiales finales, por lo que un análisis de su ciclo de vida, no es factible hasta que el prototipo se pruebe con los materiales adecuados.

Para determinar las implicaciones energéticas y ambientales del uso de aire acondicionado, se obtuvieron datos oficiales sobre el consumo de energía anual de los AC en México y sus emisiones de carbono de investigaciones anteriores realizadas por Rosas-Flores *et al.* (2010), en cuanto a las económicas se calcularon de acuerdo a los datos de consumo de kWh anuales con respecto a la tarifa básica de kWh especificada en la página oficial de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

En cuanto a las implicaciones energéticas de la estrategia de deshumidificación sustentable de deshumidificación, se determinó su consumo anual en kWh, el cual se calculó de acuerdo a los watts totales utilizados para su funcionamiento, respetando las variables de horario de utilización al día y periodo de tiempo (meses al año) de los datos del AC. Obtenidos estos datos se prosiguió con el cálculo económico manteniendo la tarifa oficial de la CFE por kWh.

Finalmente, para las implicaciones ambientales del prototipo correspondiente de la estrategia sustentable de deshumidificación se realizó el cálculo de huella de carbono por consumo eléctrico de la estrategia, el cual se realizó respetando las metodologías existentes mencionadas en el apartado de Normativa, en las cuales se indica el procedimiento correcto para determinar el impacto de la huella de carbono.

Las emisiones de huella de carbono relacionadas al consumo de energía pueden ser estimadas de acuerdo a la metodología IPCC (Rosas-Flores, Rosas-Flores, & Gálvez, 2010), la cual utiliza la siguiente formula:

$$CO_{2E} = \sum CE F_e e$$

En donde e es:

- Dato de actividad: Se refiere al consumo de electricidad por año, por lo que los datos a emplear son los kWh anuales.

Y CEF_e :

- Factores de emisión: Este factor es atribuible a la comercializadora del suministro de luz, el dato debe corresponder al año del cálculo y se expresa en kg CO₂/kWh. El valor deberá incluir dos números decimales.

Para la realización del cálculo, primeramente, se obtuvieron los siguientes datos:

Factor de emisión: 0.5246 ton CO₂/MWh (SEMARNAT, 2010)

Los datos correspondientes al uso de AC en México son los siguientes:

- Consumo anual de energía (kWh): 2042, en donde las especificaciones de potencia de energía y tiempo de uso fueron las siguientes:
 - Potencia: 1000 watts
 - Tiempo de uso anual: 10h/día, 5 meses/año

Por lo que corresponde a los datos de la estrategia de deshumidificación sustentable, se obtuvieron los siguientes datos:

- Consumo anual de energía (kWh): 90, en donde las especificaciones de potencia de energía y tiempo de uso fueron las siguientes:
 - Potencia: 60 watts

- Tiempo de uso anual: 10h/día, 5 meses/año (manteniendo las mismas variables)

Por último, con relación a las tarifas de consumo eléctrico:

- Consumo básico: \$0.853 kWh (Comisión Federal de Electricidad (CFE), 2020).

Con todo lo anteriormente recopilado, se prosiguió con el cálculo correspondiente, obteniendo los siguientes resultados:

<i>Implicaciones</i>	<i>Aire acondicionado</i>	<i>Estrategia de deshumidificación sustentable</i>
<i>Energética</i>	Consumo anual de energía kWh 2042 (2.042 MWh)	90 (0.09 MWh)
<i>Económica</i>	Costo anual \$1,919,250.00	\$115,155.00
<i>Ambiental</i>	Emisiones CO ₂ 1.071 ton	0.047 ton

Tabla 7. Implicaciones del AC y de la estrategia sustentable de deshumidificación Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que los impactos por consumo de energía de la estrategia de deshumidificación sustentable serían menores, comparados con los impactos por el uso de aire acondicionado, tan solo en cuestiones energéticas se tiene una diferencia de 1952 kWh al año, lo que obviamente repercute sobre el impacto económico en el cual el ahorro es de más de un millón de pesos. Cabe mencionar que los datos fueron calculados de acuerdo a la tarifa básica de kWh, lo cual ocurriría en el mejor de los casos, ya que las tarifas aumentan de acuerdo al consumo total, por lo que muy probablemente el costo aumentaría considerablemente.

En lo referente a las emisiones de carbono de la estrategia sustentable de deshumidificación, estas representan poco más del 4% del total de las emisiones por aire acondicionado, lo que es un porcentaje mínimo en la comparativa.

Cabe recalcar que los resultados de los cálculos aquí realizados se tratan de un aproximado, puesto que el prototipo de la estrategia de deshumidificación sustentable propuesto, se concluyó con el diseño y construcción del prototipo, que forma parte del diseño de la estrategia de deshumidificación sustentable para la ciudad de Poza Rica, Veracruz. Sin embargo, es necesario continuar con el desarrollo y la generación de más pruebas para validar la estrategia a mayor escala, siendo ya apta para un espacio habitable, además de que los cálculos se realizaron en un escenario ideal en el cual se calcula el costo de tarifa básica y únicamente de un aire acondicionado por vivienda en un uso limitado al año, por lo que si en la vivienda contasen con mas de un aire acondicionado los impactos por su consumo de energía obviamente aumentarían.

10. CONCLUSIONES

En conclusión, se considera que la estrategia de deshumidificación sustentable de uso residencial propuesta en esta investigación, es una alternativa viable de seguir desarrollando, ya que como se muestra en los resultados cuenta con el potencial de competir a lado de los sistemas convencionales de enfriamiento o deshumidificación, ya que los impactos de la estrategia en cuanto a su consumo de energía son menores al compararse con los impactos de los sistemas de enfriamiento.

Ahora bien, es cierto que actualmente existen modelos mucho más eficientes, sin embargo, esto no representa ningún beneficio ya que los datos que se tienen actualmente mencionan que los equipos mayormente consumidos a nivel mundial, se consideran dos o tres veces menos eficientes, por lo que no se refleja en un impacto positivo en los impactos que estos generan.

Con referencia a los sistemas de deshumidificación, la estrategia propuesta a diferencia de los sistemas de deshumidificación existentes buscó que durante el proceso de deshumidificación del espacio no se interrumpiera el intercambio de aire entre el interior y el exterior de la vivienda para la agilización de su funcionamiento, ya que una buena ventilación siempre es recomendable, no solo por aspectos de confort térmico sino también por cuestiones de salud, por lo que el intercambio de aire se mantiene al momento de deshumidificación.

En cuanto a los resultados obtenidos sobre los niveles de adsorción de los materiales desecantes propuestos, el gel de sílice, fue el que representó mejores resultados en cuanto a la adsorción de agua y vapor de agua, logrando una reducción significativa, con una diferencia aproximada del ocho por ciento entre la humedad relativa del interior con la que se encontraba al exterior, durante el periodo de prueba del prototipo.

En general, se buscó que el diseño del prototipo de la estrategia de deshumidificación sustentable además de cumplir con su objetivo de reducir el uso de sistemas activos de enfriamiento o deshumidificación al mejorar el confort higrotérmico al interior de las viviendas, fuera un diseño dinámico, fácil de adaptar a cualquier tipo de vivienda, ya que muchas veces el diseño de cada vivienda puede ser un impedimento por cuestiones de espacio.

Finalmente, se concluye esta tesis mencionando nuevamente que la propuesta de la estrategia de deshumidificación sustentable para la ciudad de Poza Rica se trata de un prototipo preliminar, que mostró que si se continua con su desarrollo puede representar grandes beneficios energéticos, económicos y ambientales, y que será posible de implementar en las viviendas para mejorar el confort higrotérmico sin que implique modificaciones en el diseño de la vivienda ya que su diseño dinámico le permite adaptarse a casi cualquier caso donde se necesite mejorar el confort.

11. DISCUSIÓN, ALCANCES Y LIMITANTES

11.1 Alcances y Limitantes

El objetivo de la investigación era diseñar una estrategia de deshumidificación sustentable que ayudara a mejorar el confort térmico al interior de las viviendas del caso de estudio, también se buscaba que esta estrategia fuese viable tanto para espacios nuevos como para los ya existentes, sin que implicara modificaciones costosas en este último caso.

Además, la estrategia debía contribuir a disminuir el impacto energético, económico y ambiental por el incremento en el uso de sistemas activos de enfriamiento.

11.2 Futuras investigaciones

El prototipo de la estrategia de deshumidificación sustentable se trata de un primer acercamiento por lo que la investigación está abierta a la exploración de mejoras que permitan continuar con su desarrollo, sobre todo en cuanto a los siguientes aspectos:

- Para la posible aplicación del prototipo es necesario determinar la causa exacta del aumento de temperatura, para poder proponer una solución adecuada.
- Determinar los materiales a utilizar para la construcción del prototipo final. En esta investigación al tratarse de un primer acercamiento, los materiales no fueron los ideales para su posible venta, sin embargo, se deben analizar los diferentes materiales posibles para el correcto funcionamiento, por ejemplo, en cuanto a la hermeticidad del prototipo y que a la vez representen un menor impacto ecológico.
- Determinar el tiempo de vida útil del material adsorbente elegido.
- Calcular la potencia necesaria para la regeneración más eficiente del material desecante.
- Validación del prototipo final en un espacio habitable durante la temporada de verano en el lugar de caso de estudio.

11.3 Discusión

A partir de los resultados y conclusiones obtenidas, se considera como cierta la hipótesis, en la cual se especificaba lo siguiente:

Si se diseña una **estrategia alternativa de deshumidificación sustentable** que mejoren las condiciones de **confort térmico** y sea viable para **espacios ya construidos**, **disminuirá el impacto** económico, energético y de huella de carbono provocado por el uso excesivo de **sistemas de enfriamiento**.

Durante el análisis de los materiales desecantes propuestos, se obtuvieron primeramente la sal de mar y el gel de sílice, como los materiales con mejor comportamiento en cuanto a la adsorción de agua en estado líquido, sin embargo, finalmente la sal de mar no representó los

resultados esperados para la adsorción de vapor de agua, por lo que finalmente se seleccionó al gel de sílice para las pruebas dentro del prototipo, no obstante la sal de mar tiene menores impactos en cuanto a su ciclo de vida por lo que sería interesante volver a analizar su comportamiento de adsorción de humedad relativa.

En las pruebas del prototipo se analizó la disminución de humedad relativa de acuerdo con diferentes cantidades de gel de sílice, en un inicio se mostraron cambios menos significativos en cuanto a la reducción de humedad, comenzando con 2% hasta llegar a una reducción de entre el 8-9% con 400 gramos de gel de sílice, el cual aumentaba su peso 20 gramos aproximadamente por cada hora de funcionamiento, mientras que durante el proceso de regeneración se obtiene reducir su peso 10 gramos por hora, sin embargo, en cuanto en apariencia no se aprecian cambios significativos por lo que se recomienda estudiar este proceso en futuras investigaciones incrementando la potencia de la resistencia para acelerar su regeneración.

Como se menciona al inicio de este apartado, la estrategia cumple con la hipótesis al conseguir una disminución de los porcentajes de humedad relativa en el ambiente lo que se refleja en un mejor confort térmico, y además tuvo menor impacto en cuanto a su consumo energético, sin embargo, al tratarse de un primer acercamiento aún no se tienen datos del impacto en cuestión de materiales y fabricación, por lo que se considera necesario la realización de más pruebas en cuanto a estos aspectos, buscando siempre que se trate de materiales sustentables con un menor impacto en su ciclo de vida pero que al mismo tiempo cumplan con la función de una buena envolvente que asegure la hermeticidad del prototipo para evitar pérdidas por filtraciones.

Otra de las cuestiones que dan pauta para una nueva línea de investigación, está relacionada con el aumento de temperatura que se experimentó al interior del espacio, al entrar en funcionamiento el prototipo. Es cierto que existe una relación directa con los parámetros de humedad y temperatura, como se puede observar en los diferentes diagramas psicométricos, cuando los niveles de temperatura suben los de humedad tienden a bajar y viceversa, por lo

que se podría asociar el aumento de temperatura con este principio, sin embargo, esta afirmación podría considerarse una nueva hipótesis que necesita comprobarse.

Y si por el contrario el aumento de temperatura no se debería a esta relación de los parámetros, sería necesario el estudio del prototipo planteado en esta investigación con una nueva pauta que se dedique a resolver o evitar este aumento de temperatura, que afecta de manera directa el confort térmico, esto podría lograrse mediante la combinación con otras estrategias como el túnel canadiense o el uso de la vegetación, los cuales se ha comprobado en diferentes estudios que ayudan a disminuir unos grados en la temperatura.

12. REFERENCIAS

13.

Aguirre Ramírez, H. J. (Julio de 2015). Análisis de los beneficios del uso de la tec. desecante para la protección de productos no refrigerados frente a los riesgos de la humedad por condensación atmosférica durante su tte. con fines exportables como aporte al cambio de la matriz productiva. Universidad de Guayaquil.

Andrade, H., Campo, O., & Segura, M. (2014). Huella de carbono del sistema de producción de arroz (*Oryza sativa*) en el municipio de Campoalegre, Huila, Colombia. *Corpoica Ciencia Tecnológica Agropecuaria*, 25-31.

Araujo, C., Castejón, E., & Royo, S. (2007). Confort Térmico. *Notas Prácticas*. (I. N. (INSHT), Ed.) Barcelona, España: ERGA-Noticias.

- Arrieta, G., & Maristany, A. (2018). Cambiando los paradigmas: Revisión del concepto de confort higrotérmico desde los 60's hasta la actualidad. *Acta de la XLI Reunión de Trabajo de la Asoaciación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, 6, 01.23-01.34.
- ASHRAE. (2004). Thermal environmental conditions for human occupancy . 55. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Asiaín Alberich, M. L. (27 de Enero de 2003). Estrategias Bioclimáticas en la Arquitectura. *Acercamiento a Criterios Arquitectónicos Ambientales para Comunidades Aisladas en Áreas Naturales Protegidas de Chiapas*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Asociación Mexicana de la Industria Salinera A. C. (2017). *Producción de sal*. Recuperado el 2020, de Sistemas de producción de sal en México: <http://www.amisac.org.mx/produccion/>
- Balbo di Vinadio, A. (2015). *Italia Patente nº 14172154.8*. Recuperado el 2020, de https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?flavour=true&Full&locale=en_EP&FT=D&CC=EP&NR=2829682A1&KC=A1&popup=true
- Balbo di Vinadio, A., & Palazzetti, M. (2015). *Italia Patente nº 102015000037796*. Recuperado el 2020, de <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/054329936/publication/ITUB20152482A1?q=thesan>
- Balluerka Lasa, N., Gómez Benito, J., Hidalgo Montesinos, D., Gorostiaga Manterola, A., Espada Sánchez, J. P., Padilla García, J. L., & Santed Germán, M. Á. (2020). *Las consecuencias psicológicas de la covid-19 y el confinamiento*. Servicio de Publicaciones de la Universidad del País Vasco. Recuperado el Junio de 2020, de https://www.ub.edu/web/ub/ca/menu_eines/noticies/docs/Consecuencias_psicologicas_COVID-19.pdf
- Bauzá, J. D., Justo, J. L., & Durand, P. (2016). Estudio del comportamiento de los suelos arcillosos tratados con cal ante cambios de humedad. *Reconocimiento, tratamiento y*

- mejora del terreno.* España: Sociedad Española de Mecánica de Suelo e Ingeniería Geotécnica.
- Bravo, G. C. (2014). *Temperaturas de confort e implicaciones energéticas en viviendas climatizadas mecánicamente. Estudio en clima cálido y húmedo.* Maracaibo, Venezuela: Instituto de Investigaciones IFAD.
- Bruntland, C. (1987). Informe Bruntland.
- Bula Silvera, A. J., & Juvinao, J. (junio de 2004). Comportamiento del gel de sílice como filtro deshumidificador en sistemas de acondicionamiento de aire por compresión de vapor. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*(31), 73-83.
- Bula, A. J., & Méndez, F. A. (2004). Ahorro de energía eléctrica por implementación de filtros desecantes en sistemas de acondicionamiento de aire por compresión de vapor. *Revista Facultad de Ingeniería* , 84-92.
- Bustamante, W., Rozas, Y., Cepeda, R., Encinas, F., & Martínez, P. (2009). Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social. Santiago: Ministerio de la Vivienda y Urbanismo.
- Carbonell Morales, T., & Quesada Ramos, G. (2003). Posibilidad de aplicación del deshumidificador de rueda desecante en procesos de producción y conservación de alimentos en Cuba. *Ingeniería Mecánica*(2), 11-16.
- Carbonell, T., & Quesada, G. (2003). Posibilidad de aplicación del deshumidificador de rueda desecante en procesos de producción y conservación de alimentos en Cuba. *Ingeniería Mecánica (La Habana)*, 6(1), 11-16.
- Castillo-Vegara, M., Alvarez-Marin, A., & Cabana-Villca, R. (2014). Design thinking: como guiar a estudiantes, emprendedores y empresarios en su aplicación. *Ingeniería Industrial*, 35(3). Recuperado el 2020
- Cervantes Pérez, J., & Barradas Miranda, V. L. (enero-abril de 2010). Ajuste de escalas de sensación térmica para Xalapa, Veracruz, México. *Investigación y Ciencia*, 18(48), 30-3.

- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2010). Metodologías de cálculo de la Huella de Carbono y sus potenciales implicaciones para América Latina.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2020). *CFE: Tarifas*. Recuperado el 2020, de Acuerdos que Autorizan o Modifican Tarifas: <https://app.cfe.mx/Applicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Tarifas/Tarifa1.aspx>
- Coordinación General de Minería, Dirección General de Desarrollo Minero. (2013). Perfil de Mercado de la Caliza. México: Secretaría de Economía.
- Diario Oficial de la Federación. (noviembre de 2016). NORMA Oficial Mexicana NOM026-ENER2015. *Eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo dividido (Inverter) con flujo de refrigerante variable, descarga libre y sin ductos de aire. Límites, métodos de prueba y etiquetado.*
- Díaz Torres, Y. (Marzo de 2016). Estado del arte de técnicas activas y pasivas de la climatización sustentable para edificaciones. (U. C. Cuba, Trad.) Cuba.
- Dibene, L., & Flores, R. (2013). Enfriamiento evaporativo con desecante, estado del arte. *ECORFAN*.
- Dinngo. (2020). *Design Thinking en Español*. Recuperado el 2020, de <https://www.designthinking.es/inicio/index.php>
- El Confidencial. (mayo de 2018). SOS HA CALCULADO EL IMPACTO DE 1KG DE ARROZ. *¿Sabes cuál es la huella medioambiental de 1 kilo de arroz?* Recuperado el 2020, de https://www.alimente.elconfidencial.com/consumo/2018-05-28/huella-impacto-ambiental-sostenibilidad-sos-bra_1554886/
- Espinosa Cancino, C. F., & Cortés Fuentes, A. (2015). Confort higro-térmico en vivienda social y la percepción del habitante. *Revista INVI*, 30(85). doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-83582015000300008>
- Fernández García, F. (1994). Clima y confortabilidad humana. Aspectos metodológicos. *Serie Geográfica* (4), 109-125 .

- Fernández, F. (2015). Modelado de sistemas de desecantes sólidos para el tratamiento de aire de ventilación en edificios. Málaga: Universidad de Málaga.
- Fernández, F., Cejudo, J. M., Domínguez, F., & Carillo, A. (2015). A new desiccant channel to be integrated in building facades. *Energy and Buildings*, 318-327.
- Ferrandis, L. (2016). Evaluación del impacto del uso del agua en el cultivo de arroz en Ross-Béthio (Senegal). España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Ferro, N., Castillo, D., & Obregón, V. (2014). Obtención de isotermas de sorción de humedad en variedades de arroz. Cuba: Instituto de Investigaciones de Granos.
- Flores Ramos, R. A., & Dibene Arriola, L. M. (Noviembre de 2012). Enfriamiento evaporativo con desecante, estado del arte. Jalisco, México.
- Fonseca Díaz, N., Niño Serna, C., & Gutiérrez, M. (Agosto de 2009). Estudio del proceso de acondicionamiento de aire mediante sales desecantes en aplicaciones HVAC/R. *Scientia et Technica Año XV*(42), 69-74.
- Fuentes Freixanet, V. (2009). Modelo de análisis climático y definición de estrategias de diseño bioclimático para diferentes regiones de la República Mexicana. México: Universidad Autónoma Metropolitana - División de Ciencias y Artes para el Diseño .
- Fuentes Freixanet, V., & Rodríguez Viqueira, M. (2004). Ventilación natural. *Cálculos básicos para arquitectura*. Ciudad de México, México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- García, V. (Mayo de 2018). Ventilador o aire acondicionado ¿Qué ocupa más en tu factura de la luz? *El Confidencial*. Obtenido de https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2018-06-29/consumo-aire-acondicionado-ventilador-techo-factura-luz_1585624/
- Gobierno de España. (2019). Fabricación de cal. *Emisiones de proceso*. España.
- Gobierno de España. (junio de 2020). Producción de Sílico. *Emisiones de Proceso*. España.
- Godoy Muñoz, A. (Junio de 2012). El confort Térmico Adaptativo. *Aplicación en la edificación en España*. España: Universidad Politécnica de Catalunya .

- González, E. y. (1986). Proyecto clima y arquitectura . 3. México : Gili .
- Guimarães Mercon, M. (2008). Confort térmico y tipología arquitectónica en clima cálido-húmedo. Análisis térmico de la cubierta ventilada. Catalunya, España: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Guzmán-Hernández, I. A., Franco, F., & Roset, J. (2019). Metodología de trabajo para estrategias de diseño ecológico en clima cálido húmedo de México. *XIII CTV 2019 Proceedings:XIII International Conference on Virtual City and Territory: "Challenges and paradigms of the contemporany city"*, 8468. doi:<http://dx.doi.org/10.5821/ctv.8468>
- Herrera Zavaleta, R. (Agosto de 2015). Evaluación estadística del confort térmico en el interior de salones de clase de la Universidad Veracruzana en Xalapa. Xalapa, Veracruz, México: Universidad Veracruzana.
- INAFED Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (2010). Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México . *Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave* . SEGOB Secretaría de Gobernación .
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (18 de mayo de 2018). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 2015. México. Obtenido de [https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero#:~:text=M%C3%A9xico%20emiti%C3%B3%20683%20millones%20de,\(GEI\)%20en%20el%202015.&text=El%20gas%20m%C3%A1s%20relevante%20que,seguido%20](https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero#:~:text=M%C3%A9xico%20emiti%C3%B3%20683%20millones%20de,(GEI)%20en%20el%202015.&text=El%20gas%20m%C3%A1s%20relevante%20que,seguido%20)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía . (2018). *Primera encuesta nacional sobre el consumo de energéticos en viviendas particulares (ENCEVI)*. Comunicado de prensa. Recuperado el 2020, de <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSociodemo/ENCEVI2018.pdf>

- International Energy Agency. (Mayo de 2018). The future of cooling. *Opportunities for energy-efficient air conditioning*. Paris. Recuperado el 2020, de <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>
- Jendritzky, G. (1991). Selected questions of topical interest in human bioclimatology. *International Journal of Biometeorology*(35), 139-150.
- Jiménez R., S. (2014). Confort higrotérmico, estándares y aplicación en el medio construido. *Revista Puce*, 141-173. Recuperado el 2019, de <file:///C:/Users/GRECIA/Downloads/29-Texto%20del%20art%C3%ADculo-350-1-10-20180109.pdf>
- Kraus, M. (2017). Hygrothermal analysis of indoor environment of residential prefabricated buildings. doi:10.1088/1757-899X/245/4/042071
- Maldonado, F. X. (2019). Guía técnica para la reducción de la humedad y eliminación de bacterias en mamposterías de construcciones informales del sector la bota por medio de sal marina . Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias.
- Manzo, D. (junio de 2020). Productores de sal en Oaxaca resienten pérdidas en sus cosechas. *La Jornada*. Recuperado el 2020, de <https://www.jornada.com.mx/ultimas/estados/2020/06/09/productores-de-sal-en-oaxaca-resienten-perdidas-en-sus-cosechas-4791.html>
- Mattotea, F. (Diciembre de 2018). Ventilazione meccanica controllata: aspetti energetici, funzionali e manutentivi. Italia: Politecnico di Torino.
- Ministerio para la Transición Ecológica. (2018). Guía para el cálculo de huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de una organización. España. Recuperado el 2020, de https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guia_huella_carbono_tcm30-479093.pdf
- Morillón, D. (Diciembre de 2011). Edificación Sustentable en México: Retos y Oportunidades. DF, México.
- Munster Corporation. (2002). *The Dehumidification Handbook*. (L. G. Harriman III, Ed.) Amesbury, USA: Editorial Advisory Board . Recuperado el 2020

Neila, F. J. (2004). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. MUNILLALERIA.
Recuperado el marzo de 2019

Noguera Londoño, E. L. (2015). El método del análisis bioclimático, un ejemplo de aplicación. *UGCiencia 21*, 48-59.

Olvera Arévalo, R. (Marzo de 2013). Efecto de la inercia térmica de la envolvente sobre la climatización de edificios comerciales. Nuevo León, México: Universidad Autónoma de Nuevo León.

Pilatowsky Figueroa, I. (Julio de 2002). Psicometría, métodos de humidificación y deshumidificación y sus aplicaciones en el diseño arquitectónico. Guadalajara , Jalisco, México: Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México .

Rosas-Flores, J., Rosas-Flores, D., & Gálvez, D. M. (2010). Saturation, energy consumption, CO₂ emission and energy efficiency from urban and rural households appliances in México. *Energy and Buildings*, 1(43), 10-18. doi:10.1016/j.enbuild.2010.08.020

SAGARPA. (2017). Planeación Agrícola Nacional 2017--2030. *Arroz mexicano*. México.

Sanabria Contreras, C. C. (Julio de 2018). Uso de estrategias pasivas para mejorar el confort térmico y reducir el consumo energético de la vivienda campestre localizada en Acacias Meta. Colombia: Universidad Católica de Colombia.

SAVIO THESAN S. p. A. (2020). *THESAN*. Obtenido de Mechanical Controlled Ventilation: <https://www.thesan.com/en/designing-iaq/mechanical-controlled-ventilation/>

Secretaría de Energía. (2010). NORMA Oficial Mexicana NOM-023-ENER-2010. *Eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo dividido, descarga libre y sin conductos de aire. Límites, método de prueba y etiquetado*.

Secretaría de Energía. (julio de 2017). NORMA Oficial Mexicana NOM-021-ENER/SCFI-2017. *Eficiencia energética y requisitos de seguridad al usuario en acondicionadores de aire tipo cuarto. Límites, métodos de prueba y etiquetado*.

- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales . (2018). Informe 18 del Medio Ambiente. *Atmósfera*. Recuperado el 2020, de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap5.html>
- SEMARNAT. (2010). *Programa GEI México*. Recuperado el 2020, de Factor de Emisión Eléctrico 2013: <https://www.geimexico.org/factor.html>
- Serrano, M., & Bláquez, P. (2015). *Design thinking: lidera el presente crea el futuro*. ESIC Editorial.
- Simanca Yovann, K. (2003). Reacondicionamiento Bioclimático de viviendas de segunda residencia en clima mediterraneo. *Tesis Doctoral UPC*. Barcelona, España.
- Soto, M., Gama, L., & Gómez, M. (2001). Los climas cálido subhúmedos del estado de Veracruz, México. *Forestal Veracruzana*, 3(002), 31-40. Universidad Veracruzana.
- Spotorno, R., Busso, A., Osiska, H., Pochettino, J., & Benítez, F. (2012). Estudio y simulación del proceso de regeneración de silica gel mediante energía solar y calor residual del condensador en sistemas de climatización por compresión de vapor. *AVERMA*, 16, 71-78. Recuperado el 2020
- Subsecretaría de Minería, Dirección General del Desarrollo Minero. (diciembre de 2017). Perfil de Mercado del Sílice. México: Secretaría de Economía. Recuperado el 2020
- The Indian Express; Design News; I'm Innovation . (2019). *Ambientum* . Recuperado el 2020, de Un hidrogel capaz de absorber el agua atmósferica.
- Tovar, R., & Chargoy, J. P. (s.f.). El análisis del ciclo de vida como herramienta para la selección de materiales de construcción. *Caso práctico - cal hidratada en pasta*. ITESO.
- Universidad Politécnica de Catalunya. (17 de Diciembre de 2018). *Sobre el confort y como regula nuestro cerebro la temperatura corporal*. Recuperado el Marzo de 2019, de Prevención Integral: <https://www.prevencionintegral.com/comunidad/blog/upcplus/2018/12/17/sobrecomfort-termico-como-regula-nuestro-cerebro-temperatura-corporal>

Velasco, F. J. (06 de Octubre de 2016). Dispositivo para la extracción de agua del medio ambiente. *SOLICITUD INTERNACIONAL PUBLICADA EN VIRTUD DEL TRATADO DE COOPERACIÓN EN MATERIA DE PATENTES*.

Zhang, L., Fu, H., Yang, Q., & Xu, J. (2014). Performance comparisons of honeycomb-type adsorbent bed (wheels) for air dehumidification with various dessicant wall materials. *Energy* 65, 430-440.

15. ANEXOS

ANEXO 1. Encuesta sobre confort higrotérmico y uso de sistemas activos de enfriamiento en la ciudad de Poza Rica, Veracruz.

1. Determine su nivel de confort en temporada de verano al interior de su vivienda.
 - a) Con mucho frío
 - b) Con frío
 - c) Neutral
 - d) Con calor
 - e) Con mucho calor
2. ¿Qué tipo de ambiente le gustaría?
 - a) Muy frío
 - b) Ligeramente más frío
 - c) Sin cambios
 - d) Ligeramente más cálido
 - e) Con mucho calor
3. Según su percepción, este tipo de ambiente es:
 - a) Muy húmedo
 - b) Húmedo
 - c) Algo húmedo
 - d) Seco
 - e) Muy seco
4. ¿Cuenta con aire acondicionado o algún otro sistema de enfriamiento en su vivienda?
 - a) Si
 - b) No

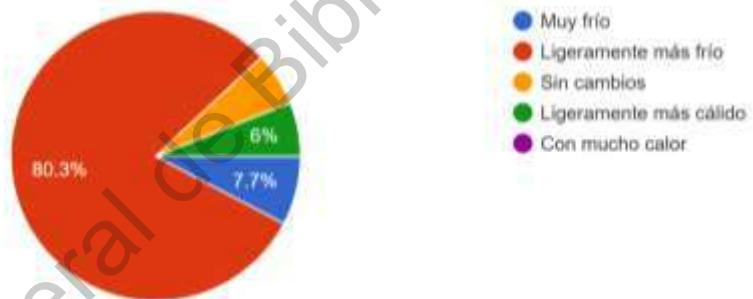
5. Si contestó afirmativamente en la pregunta anterior, mencione el sistema de enfriamiento o deshumidificación con el que cuenta.
6. Si contestó que no, mencione el por qué
7. ¿Está familiarizado con el término deshumidificación?
 - a) Si
 - b) No
8. ¿Conoce algún sistema de enfriamiento o deshumidificación además del aire acondicionado?
 - a) Si
 - b) No
9. Si contestó que si en la pregunta anterior, mencione cuál sistema conoce.
10. ¿Considera el sistema de enfriamiento “aire acondicionado” costoso?
 - a) Si
 - b) No

ANEXO 2. Resultados de la encuesta sobre confort higrotérmico y uso de sistemas activos de enfriamiento en la ciudad de Poza Rica, Veracruz.

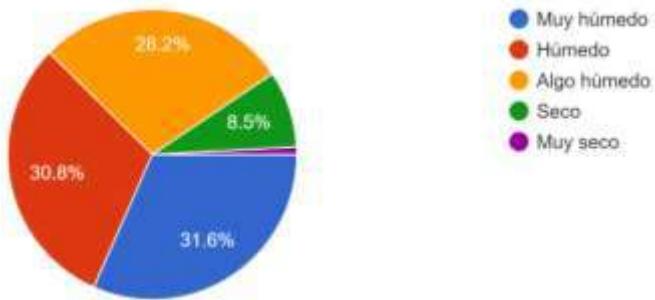
1. Determine su nivel de confort en temporada de verano al interior de su vivienda.



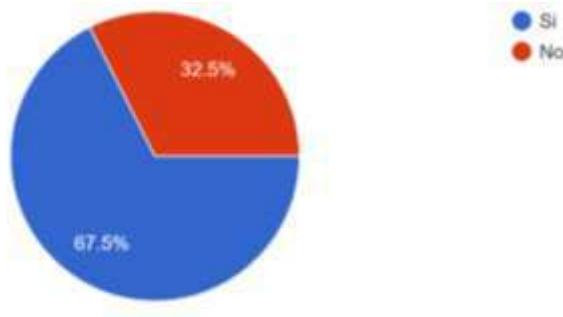
2. ¿Qué tipo de ambiente le gustaría?



3. Según su percepción, este tipo de ambiente es:



4. ¿Cuenta con aire acondicionado o algún otro sistema de enfriamiento en su vivienda?



5. Si contestó afirmativamente en la pregunta anterior, mencione el sistema de enfriamiento o deshumidificación con el que cuenta.

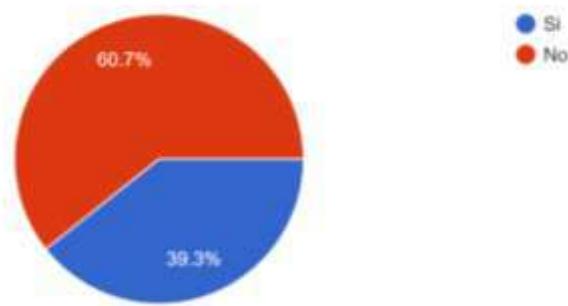


6. Si contestó que no, mencione el por qué

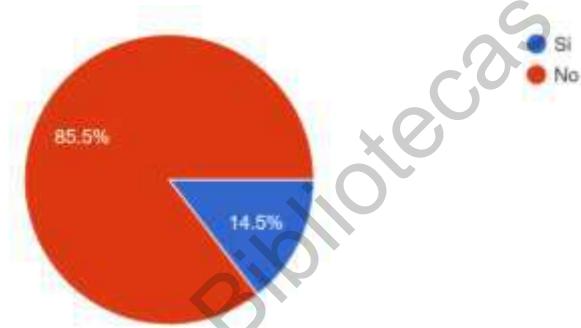
Las principales razones mencionadas fueron:

- Recursos económicos
- Recursos energéticos
- Uso de otros sistemas, como ventiladores
- No cuentan con las instalaciones adecuadas
- Cuestiones de salud

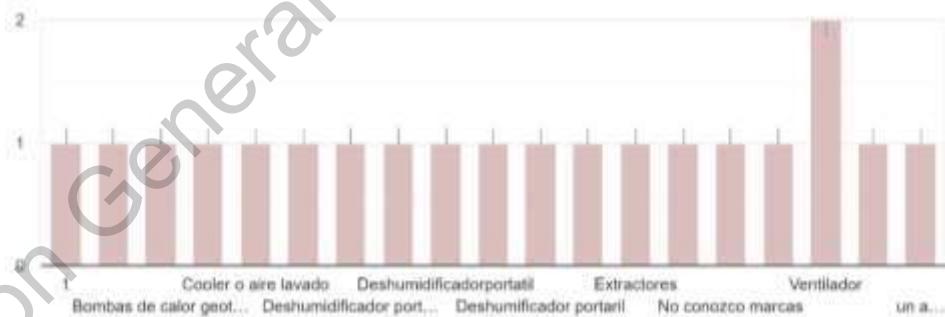
7. ¿Está familiarizado con el término deshumidificación?



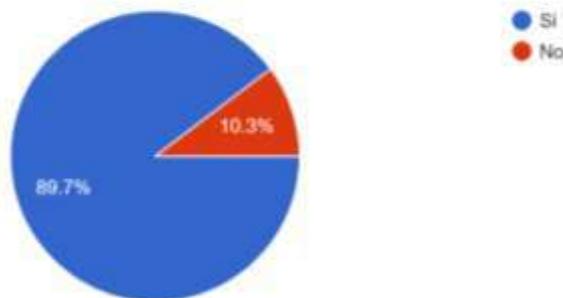
8. ¿Conoce algún sistema de enfriamiento o deshumidificación además del aire acondicionado?



9. Si contestó que si en la pregunta anterior, mencione cuál sistema conoce.



10. ¿Considera el sistema de enfriamiento “aire acondicionado” costoso?



ANEXO 3. Registro de temperatura y humedad en diversas viviendas de la ciudad de Poza rica, Veracruz.

Vivienda 1.

<i>HORARIO</i>			<i>Dia 1</i>	<i>Dia 2</i>	<i>Dia 3</i>
08:00 hrs	Temperatura exterior	°C	31.8	30.8	30.2
	Temperatura interior		31.3	30.2	31.0
	Humedad	%	65	61	63
14:00 hrs	Temperatura exterior	°C	35.1	36.1	36.5
	Temperatura interior		35.5	36.8	36.6
	Humedad	%	74	68	68
20:00 hrs	Temperatura exterior	°C	33.3	32.1	33.2
	Temperatura interior		33.7	30.4	33.4
	Humedad	%	74	64	88

Tabla 8. Registro de temperatura y humedad en vivienda uno Fuente: Elaboración propia

Vivienda 2.

<i>HORARIO</i>			<i>Dia 1</i>	<i>Dia 2</i>	<i>Dia 3</i>
08:00 hrs	Temperatura exterior	°C	31.5	29.3	30.4
	Temperatura interior		31.0	29.5	30.7
	Humedad	%	71	80	82
14:00 hrs	Temperatura exterior	°C	33.5	31.5	34.9
	Temperatura interior		33.8	31.0	35.9
	Humedad	%	74	57	63
20:00 hrs	Temperatura exterior	°C	30.5	27.8	31.5
	Temperatura interior		31.5	27.4	31.3
	Humedad	%	67	95	66

Tabla 9. Registro de temperatura y humedad en vivienda dos Fuente: Elaboración propia

Vivienda 3.

<i>HORARIO</i>			<i>Dia 1</i>	<i>Dia 2</i>	<i>Dia 3</i>
08:00 hrs	Temperatura exterior	°C	30.4	32.1	32.5
	Temperatura interior		30.7	32.7	33.0
	Humedad	%	75	68	66
14:00 hrs	Temperatura exterior	°C	35.3	38.4	32.1
	Temperatura interior		35.7	37.7	32.3
	Humedad	%	71	65	63
20:00 hrs	Temperatura exterior	°C	31.3	34.5	33.2
	Temperatura interior		31.6	34.7	33.3
	Humedad	%	73	63	69

Tabla 10. Registro de temperatura y humedad en vivienda tres Fuente: Elaboración propia

Vivienda 4.

<i>HORARIO</i>			<i>Dia 1</i>	<i>Dia 2</i>	<i>Dia 3</i>
08:00 hrs	Temperatura exterior	°C	33.9	33.2	31.0
	Temperatura interior		34.9	34.0	31.7
	Humedad	%	78	77	82
14:00 hrs	Temperatura exterior	°C	41.5	40	38.7
	Temperatura interior		42.1	41.5	38.0
	Humedad	%	62	65	67
20:00 hrs	Temperatura exterior	°C	35.2	34.3	35.7
	Temperatura interior		35.3	34.3	36.2
	Humedad	%	68	71	68

Tabla 11. Registro de temperatura y humedad en vivienda cuatro Fuente: Elaboración propia

Vivienda 5.

<i>HORARIO</i>	<i>Dia 1</i>	<i>Dia 2</i>	<i>Dia 3</i>

	08:00 hrs	Temperatura exterior	°C	33.2	33.3	31.4
		Temperatura interior		33.4	34.1	30.8
		Humedad	%	71	71	73
	14:00 hrs	Temperatura exterior	°C	36.5	38.4	35.2
		Temperatura interior		36.8	39.5	36.1
		Humedad	%	66	63	68
	20:00 hrs	Temperatura exterior	°C	34.2	33.5	34.6
		Temperatura interior		34.8	33.6	35.0
		Humedad	%	70	68	68

Tabla 12. Registro de temperatura y humedad en vivienda cinco Fuente: Elaboración propia

ANEXO 4. Pruebas de adsorción de vapor de agua por materiales desecantes propuestos.

<i>IMÁGENES</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
	Las pruebas de adsorción de vapor de los materiales desecantes se realizaron en un espacio de 50 cm ³ , construido a base de MDF, únicamente una de las caras se dejó de cristal a manera de poder ver el interior y el medidor higrotérmico.
	

Tabla 13. Pruebas de adsorción de vapor Fuente: Elaboración propia

ANEXO 5. Pruebas de adsorción y regeneración en un espacio de 50 cm³.

<i>IMÁGENES</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
	<p>Como se mencionó en la sección de metodología las pruebas del prototipo en un espacio se realizaron en una caja con un volumen de 50 cm³, en donde el prototipo se debió separar a la mitad por cuestiones de medidas, ya que este contaba con 80 cm de largo, quedando de esta manera los elementos deshumidificantes por separado con 40 cm.</p>
	<p>La caja fue la misma utilizada durante las pruebas de adsorción de vapor de los materiales desecantes.</p>

Tabla 14. Pruebas del prototipo dentro de un espacio Fuente: Elaboración propia