

INFORME CIENTÍFICO FINAL DE LA INVESTIGACIÓN

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN FINANCIADO POR EL FONDO UCA

Investigación exploratoria de tecnologías para la deshumidificación
de ambientes habitables mediante la utilización de un nulo o
mínimo consumo de energía

Informe Elaborado por: Luis Aarón Martínez Figueroa, Franz Manrique Quijada Campos y Rodrigo
Arturo Manzano Navarrete

Fecha: 25 de noviembre de 2022

1. Introducción

Según estudios, las personas permanecen hasta un 80% de su tiempo en ambientes interiores (Omer, 2008). Para mantener condiciones adecuadas de comodidad ambiental (confort térmico), se utiliza en promedio más de un 30% de la electricidad destinada a edificios a nivel mundial, cifra que asciende incluso a un 70% en climas calientes y húmedos como el nuestro (Chua et al., 2013). El aire acondicionado fue inventado cerca del final del siglo 19 y previo al desarrollo de esta tecnología, se utilizaban medios pasivos para lograr condiciones térmicas aceptables en espacios habitados (Pauken, 1999). A lo largo del siglo 20 y principios del siglo 21, se han logrado avances tecnológicos importantes en relación a la capacidad de controlar las condiciones térmicas en edificaciones, aumentando significativamente la precisión de dicho control (Alfonso, 2006).

Sin embargo, los sistemas de climatización mecánicos utilizan altas cantidades de energía para operar. Según estudios del Consejo Nacional de Energía de El Salvador, el aire acondicionado es el uso energético más significativo en edificios comerciales (Multiconsult, 2011). La explicación de dicho consumo significativo se encuentra al considerar que el tipo más común de aire acondicionado se basa en un ciclo termodinámico de compresión de vapor, en el cual se utiliza un compresor eléctrico para elevar la presión y temperatura de una sustancia llamada refrigerante¹, vaporizarlo y posteriormente condensar el fluido, llevándolo a su estado inicial. El proceso de compresión utiliza la mayor cantidad de energía del ciclo termodinámico y forma la base de la mayoría de sistemas de aire acondicionado. Aunque existen otros procesos de enfriamiento diferentes, no se ha logrado que sean exitosos a nivel comercial.

Los sistemas de climatización mecánica convencionales principalmente se encargan de reducir la temperatura de un fluido secundario, el cual entra en contacto con el fluido primario (el refrigerante) mediante intercambiadores de calor, denominados evaporadores (parte fría del ciclo) y condensadores (parte caliente del ciclo). Los fluidos secundarios más utilizados son el aire y agua y su función es distribuir el frío a lo largo de una edificación. Como una función adicional, los sistemas de climatización en ocasiones realizan cierto tratamiento del aire en contacto con las personas, usualmente a través de filtros. También puede haber un control de humedad basado en la utilización de un área adicional de transferencia de calor con el objetivo de subenfriar el aire y producir un efecto de condensación de parte de la humedad presente en el aire. No es común en nuestro medio la utilización de deshumidificadores mecánicos independientes, pues la reducción de temperatura producida en el evaporador es capaz de reducir simultáneamente la temperatura y humedad del aire suministrado al espacio a acondicionar. En condiciones normales, una vez concluido el proceso de climatización mecánica, la humedad relativa, la cual mide el porcentaje de humedad en el aire a comparación del máximo posible a las condiciones de temperatura y presión presentes, ronda dentro del rango de 40-50%, lo cual es aceptable y está en sintonía con los estándares internacionales de confort térmico (ASHRAE, 2019).

Es importante destacar que el objetivo principal de un sistema de climatización es proveer una condición de confort térmico a los habitantes de la edificación. El concepto de confort térmico ha sido estudiado ampliamente en el pasado y se han establecido modelos explicativos y predictivos en función de ciertos factores que lo afectan. Fanger (1967) caracterizó el confort

¹ Los refrigerantes son sustancias orgánicas o sintéticas con un punto de ebullición bajo, lo cual permite que tengan un cambio de fase a temperaturas relativamente bajas.

térmico con base en seis factores: tasa metabólica del individuo, propiedades térmicas de las vestimentas, temperatura del aire (bulbo seco), temperatura media radiante, velocidad del aire y humedad relativa. De los seis factores, los primeros dos están asociados al individuo y sus costumbres y los restantes con el ambiente. Para obtener el confort térmico, se requiere una adecuada combinación de los seis factores y para ello existen modelos cuantitativos que permiten predecir la probabilidad de que un individuo se encuentre en confort térmico, dependiendo de la mezcla de los seis factores (Djongyang, 2010). Aunque a nivel cotidiano se entiende la influencia de la temperatura del aire interior en el confort térmico, en ocasiones se presta poca atención a la velocidad del aire, la temperatura media radiante y la humedad relativa.

Nuestro enfoque en esta investigación es entender cómo se puede controlar el factor humedad relativa de una forma práctica y económica, con un uso mínimo de energía. Para ilustrar y contextualizar la necesidad de este planteamiento, se presenta a continuación un gráfico (de elaboración propia, desarrollado con un programa de análisis climático) que muestra la relación entre temperatura de aire (bulbo seco) y humedad para las condiciones ambientales en la ciudad de Acajutla, manteniendo constantes los valores del resto de factores asociados al confort. Los puntos mostrados en color rojo o verde en el gráfico representan a cada una de las 8,760 horas del año.

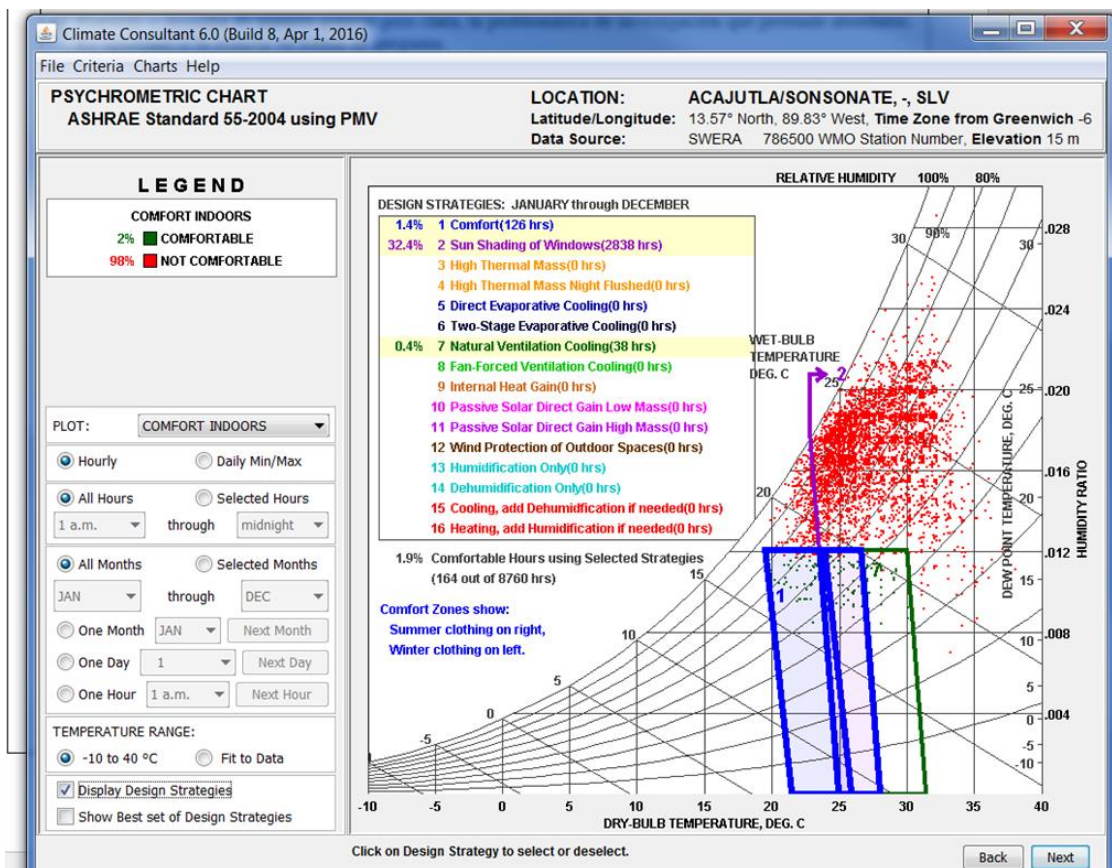


Ilustración 1 Condiciones del aire exterior para Acajutla

En el gráfico, las áreas rectangulares de color azul representan las zonas de confort térmico (invierno y verano). Los puntos ubicados dentro de las zonas de confort corresponden a las horas del año en las cuales la mezcla de factores permite el confort térmico. Para aquellos puntos ubicados afuera de las zonas mencionadas (puntos rojos), la combinación de factores no permite alcanzar dicho confort. Al incorporar ventilación natural, la zona de confort se extiende levemente, incluyendo el área abarcada por el rectángulo verde. Aún con ventilación natural, en esta ubicación, únicamente un 2% de las horas del año se alcanzaría el confort térmico. Lo valioso a destacar de este gráfico es como casi la totalidad de los puntos en rojo tienen una humedad superior a la requerida para ubicarse en las zonas de confort, a pesar de que, en muchos casos, la temperatura corresponde a los límites de dichas zonas. En otras palabras, el nivel de humedad es muy elevado la mayor parte del año. Mediante el uso de aire acondicionado, es posible enfriar y deshumidificar el aire para llevarlo a la zona de confort, pero para ello se requieren altas cantidades de energía. Aunque existen técnicas pasivas de enfriamiento, tales como el enfriamiento evaporativo, ha habido poco énfasis en la literatura en el desarrollo tecnológico de métodos de enfriamiento y especialmente deshumidificación pasiva aplicables a condiciones del trópico (Geetha & Velraj, 2012; Safizadeh et al., 2016; O'Connor et al., 2016).

El planteamiento anterior busca enfatizar la importancia del factor humedad en la obtención del confort térmico en el trópico, más específicamente en zonas costeras en América Central. Incluso utilizando técnicas de enfriamiento pasivo (reducción de calor mediante materiales aislantes, ventilación cruzada, protecciones solares, etc.), no se lograría alcanzar el confort a menos que se realice algo en relación con la humedad alta, común en esta región. Aunado a esto, como una consecuencia prevista del cambio climático, se predice que la región sufrirá un incremento de temperatura media de entre 1 y 1.5 °C para el periodo 2021-2050 (Imbach et al., 2018). Por tanto, cada vez será más difícil mantener condiciones de confort térmico de forma natural en espacios interiores.

Existe una cantidad limitada de estudios que buscan brindar opciones tecnológicas para la reducción de humedad por medios pasivos ² (El Loubani et al., 2020; Chen et al., 2020; Aflaki et al., 2012). Una de las estrategias más utilizadas consiste en utilizar materiales que absorben la humedad de manera natural (similar a una esponja). Un problema, sin embargo, es que después de cierto tiempo, dichos materiales absorben una cantidad máxima de humedad o se saturan de la misma. Para regenerarlos, es decir, para que absorban más humedad, se requiere aplicar energía en forma de calor, a fin de evaporar o eliminar la humedad absorbida con anterioridad. Esto es factible si se cuenta con fuentes gratuitas de calor (tal como el sol o calor de desecho en procesos). Sin embargo, su aplicación y éxito comercial han sido limitados.

Un argumento que puede plantearse es que, en el largo plazo, con el advenimiento de las energías renovables de bajo costo y los edificios sostenibles y autosuficientes (net zero energy), el problema desaparecerá (Sartori et al., 2012). Es importante recalcar que, para el estado actual de la tecnología, es impensable que toda la sociedad tenga acceso a corto plazo a la construcción de edificios autosuficientes (Martínez et al., 2018). Debería buscarse otras opciones tecnológicas apropiadas para lograr un mejoramiento del confort de forma más simple y al alcance de más personas, especialmente con recursos limitados, en zonas tropicales húmedas.

Ante los antecedentes planteados en la sección anterior, se desprende que la humedad relativa es un factor clave para la materialización del confort térmico en espacios habitados. Además, los sistemas de climatización convencionales logran controlar de forma indirecta la humedad al reducir la temperatura del aire. Por otro lado, a pesar de los avances tecnológicos en la

² El término pasivo es utilizado para referirse a la aplicación de tecnologías que no requieren consumo energético activo.

mejora de la eficiencia de los sistemas de climatización, el consumo energético de los mismos sigue siendo significativo y no está al alcance de todas las personas. Lo anterior es exacerbado por las predicciones de incremento de temperatura en nuestro contexto climático, lo que puede conducir al incremento de la pobreza energética asociada a la imposibilidad de obtener condiciones de habitabilidad, sin los recursos económicos para instalar y operar equipos mecánicos de climatización (Nussbaumer et al., 2012). La falta de condiciones de confort térmico adecuadas pueden llevar a cansancio, pérdida de productividad y problemas de salud, consecuencias que ocurren independientemente del nivel de adaptación de la persona a dichas condiciones (Lan et al., 2011a; Lan et al., 2011b).

En nuestro caso, uno de los problemas fundamentales de investigación es cómo concebir tecnología viable capaz de reducir la humedad relativa en espacios habitados mediante procesos termodinámicos que permitan una operación, continua, ininterrumpida y utilizando un consumo energético mínimo o nulo. Se puede apreciar que la investigación abona en la línea de sostenibilidad ambiental porque contribuye a progresar en el conocimiento de la tecnología apropiada que nos permita mejorar las condiciones de habitabilidad en zonas climáticas tropicales, con acceso limitado a fuentes de energía o sistemas de climatización.

Nuestra pregunta de investigación puede ser enunciada de la siguiente forma ¿Cómo es posible controlar (reducir) la humedad relativa de un espacio habitado, mediante un proceso isotérmico (sin alterar la temperatura) de forma ininterrumpida y sostenible, bajo los condicionamientos técnicos y económicos impuestos del contexto centroamericano?

El presente informe describe de forma sintética los hallazgos principales obtenidos en los tres componentes de la investigación, denominada “Investigación exploratoria de tecnologías para la deshumidificación de ambientes habitables mediante la utilización de un mínimo o nulo consumo de energía”. Para dar respuesta a la pregunta de investigación, se realizaron tres actividades o componentes principales:

Componente 1) Exploración del conocimiento disponible sobre tecnologías para la deshumidificación de espacios habitados con consumo mínimo o nulo de energía. Este componente incluyó una amplia revisión bibliográfica sobre tecnologías relevantes.

Componente 2) Análisis a profundidad de enfoques y procesos termodinámicos para deshumidificar espacios habitados de forma viable técnica y económicamente en el contexto centroamericano. En este componente se utilizó simulación por computadora para estudiar el desempeño de un grupo selecto de tecnologías. Las simulaciones permitirían valorar la pertinencia de cada tecnología y su aplicabilidad al contexto de la investigación.

Componente 3) Propuesta de solución. Utilizando los insumos de los componentes 1 y 2, se buscaba diseñar un sistema de prueba de una tecnología prometedora, con objeto de ser implementado en futuras investigaciones.

La investigación, en su conjunto, ofrece tres contribuciones principales. En primer lugar, se identificó, mediante una revisión de la literatura pertinente, (lo que permitió generar un artículo científico), el conjunto de tecnologías disponibles de bajo consumo energético para la deshumidificación de espacios habitables. En segundo lugar, mediante una valoración de criterios, se seleccionó una muestra de tecnologías con mayor probabilidad de ser aplicables en nuestro contexto. Dicha muestra de tecnologías apropiadas fue estudiada a fondo mediante simulaciones energéticas, con el objetivo de predecir el funcionamiento y efectividad de cada una bajo nuestras condiciones climáticas. Como resultado principal se determinó la combinación de tecnologías con mayor potencial de éxito. Finalmente, como tercera contribución principal, se diseñó un arreglo experimental, basado en la combinación de tecnologías mejor evaluadas, para su implementación en laboratorio, con el fin de confirmar y

profundizar los hallazgos de esta investigación, facilitando la transferencia tecnológica y propuesta concreta a la industria nacional.

A continuación se detallan los hallazgos principales de cada componente de la investigación, finalizando con una discusión final y conclusiones.

2. Tecnologías para la deshumidificación y enfriamiento de espacios habitados

Como se discutió en la introducción, el confort térmico, como objetivo primordial de los sistemas de ventilación, calefacción y aire acondicionado (HVAC), es un tema complejo que requiere de un enfoque sistémico. Se destacan seis factores: el índice metabólico individual, las propiedades térmicas del vestuario, temperatura ambiente (bulbo seco), temperatura radiante promedio, velocidad del aire y humedad relativa. Los dos primeros factores están relacionados con los individuos y sus hábitos y el resto con el medio ambiente. A fin de obtener el necesario confort térmico, se requiere de una buena combinación de tales factores.

En esta investigación nos enfocaremos en la temperatura y humedad como los dos factores fundamentales que demandan alto consumo de energía en ambientes tropicales. Nos ocupamos de la pregunta orientadora de la investigación de cómo podemos, en términos prácticos, condicionar la temperatura y humedad interna con el menor consumo posible de energía. En esta sección se sintetiza la revisión de la información disponible y se propone presentar el estado del arte de las tecnologías que ayudan a controlar la temperatura y humedad, de manera pasiva o casi pasiva. El énfasis de la presente investigación radica en las tecnologías alternativas aplicables a climas calientes y húmedos. Como ya se ha mencionado, la gente proveniente de países en desarrollo con tales climas, está adoptando rápidamente sistemas convencionales de aire acondicionado, como una necesidad que surge de las condiciones ambientales extremas, provocadas por el cambio climático.

TECNOLOGÍAS DE DESHUMIDIFICACIÓN

Desecantes sólidos.

La deshumidificación desecante sólida es un proceso basado en un intercambio latente de calor y transferencia de masa entre un material higroscópico poroso y una corriente de aire húmedo. Este proceso puede simplificarse de la siguiente manera: una corriente de aire húmedo a temperatura ambiente fluye a través de un deshumidificador, generalmente a temperatura ambiente de la habitación. Debido a la diferencia parcial de presión del vapor, las moléculas de agua del aire son transferidas al material desecante, mediante adsorción, liberando calor latente, que incrementará la temperatura de la corriente existente de aire deshumidificado, así como la superficie desecante. La diferencia de presión disminuirá continuamente hasta que finalice el proceso de adsorción, momento en el que ya el desecante se ha saturado de humedad y se han igualado las diferentes presiones. Para regenerar el deshumidificador se requiere de una fuente de calor (para lograrlo generalmente se usa una corriente de aire caliente). La dirección del intercambio de aire latente se invierte, ya que las moléculas de agua consumen el calor de la corriente de aire caliente y lo des-absorben de la superficie desecante, lo cual reduce la temperatura, tanto del material desecante como de regeneración saliente de la corriente de aire. A partir de este momento, el material desecante es capaz de adsorber el agua nuevamente.

Rueda desecante de rotación.

Las ruedas desecantes son el tipo de configuración más común para deshumedificadores desecantes sólidos. Este tipo de diseño consiste fundamentalmente en un rotor que incorpora partículas desecantes en su estructura, a la vez que permite fluir, a través del mismo, a las corrientes de aire. Esta configuración permite una alta eficiencia, en términos de superficie de área, a la masa desecante, un suministro de salida de aire en condiciones de humedad relativamente uniforme, una reducción de operaciones de mantenimiento debido a un pequeño número de partes, y la eliminación del funcionamiento discontinuo, debido a la constante rotación. Sin embargo, entre los inconvenientes están las caídas largas de presión, bloqueo de poros provocado por el polímero aglutinante o el material de cerámica, lo cual reduce la masa desecante, la integración de sistemas HVAC convencionales, la necesidad de electricidad para manejar el motor de la rueda, y las altas temperaturas para una regeneración efectiva.

Deshumedificadores de lecho compacto.

Consisten en lechos verticales u horizontales de material desecante, empacados de manera muy comprimida, a fin de permitir el flujo de aire en su interior. Si bien no es tan popular como la rueda de rotación, esta configuración ofrece varias ventajas, tales como el bajo consumo de energía eléctrica, la habilidad para procesar grandes cantidades de aire y la flexibilidad de su diseño. Sin embargo, algunas desventajas importantes incluyen una caída significativa de la presión debido a la distribución de partículas desecantes, la necesidad de una operación cíclica, en lugar de continua y las altas temperaturas de regeneración.

Otro campo importante de investigación es el desarrollo de modelos matemáticos, a fin de predecir el valor de las condiciones de salida y los parámetros de sistemas. En 2013 se investigaron los modelos matemáticos empíricos existentes, con el fin de evaluar su precisión.

Desecantes líquidos.

Los materiales desecantes líquidos han mejorado en los últimos años, puesto que su papel en el proceso de deshumedificación es crucial. Los desecantes líquidos han demostrado ser mejores como deshumedificadores que los sólidos, debido a su alta capacidad para detener la humedad y su baja temperatura de regeneración. Los tipos más comunes incluyen soluciones salinas, como el cloruro de litio; el bromuro de litio y el cloruro de calcio; además se han usado soluciones acuosas de solventes orgánicos (trietilenglicol) como desecante líquido en un sistema de enfriamiento solar.

Deshumidificadores Adiabáticos.

Los deshumedificadores pueden clasificarse según sea la presencia o ausencia de un dispositivo de enfriamiento interno que mantiene trabajando el flujo desecante a temperatura constante; y, por tanto, manteniendo constante la presión térmica de la solución, permitiéndole conservar la humedad durante todo el proceso. Un deshumedificador adiabático trabaja sin un dispositivo de enfriamiento integrado, de esta manera la solución se calienta, como resultado de la transferencia de masa y calor entre el flujo de aire ambiente y el flujo desecante. Estos tipos de deshumedificadores consumen menos energía que los de enfriamiento interno. Sin embargo, debido al incremento en la temperatura de la solución, su presión térmica también aumenta, implicando, por tanto, la reducción de la capacidad del desecante líquido, afectando así la eficiencia de todo el proceso de deshumedificación.

Deshumidificadores de enfriamiento interno.

Estos incluyen un dispositivo de enfriamiento (serpentín de enfriamiento; placas paralelas, etc.) con un fluido frío. Este dispositivo intenta mantener constante la temperatura del desecante líquido, a lo largo del proceso de deshumedificación. Por lo que la absorción de vapor

de agua también se mantiene constante. Sin embargo, la incorporación de un fluido de enfriamiento en el sistema aumenta el consumo de energía del ciclo completo, debido a los requisitos adicionales de energía de enfriamiento y bombeo.

TECNOLOGÍAS DE ENFRIAMIENTO PASIVO

Como forma de reducir el gasto energético, suelen usarse métodos pasivos de enfriamiento, los cuales pueden clasificarse en tres categorías: protección de calor, modulación de calor y disipación de calor. Las técnicas del primer tipo consisten en mecanismos para neutralizar los incrementos de calor del inmueble, lo que puede lograrse mediante la orientación apropiada del edificio, vegetación, sombra, acristalamiento de ventanas, etc. La modulación de calor consiste en la descarga de calor acumulado en la estructura del edificio, a una tasa más baja y en fecha posterior.

Debido a que las ganancias de calor no pueden llegar a cero, las estrategias de modulación se proponen reducir la velocidad de transformación de calor, que ocurre entre el edificio y sus alrededores, lo que se logra mediante el enfriamiento libre o aumentando la masa térmica del edificio, por ejemplo, con la sustitución de materiales.

Finalmente, la disipación de calor comprende las técnicas utilizadas para disponer del excedente de calor mediante un disipador térmico, técnica a la que se recurre cuando las dos primeras ya mencionadas no son suficientes para cumplir con las condiciones de comodidad térmica interna. La disipación de calor puede lograrse, disponiendo del exceso de calor en un disipador térmico como masa de agua, suelo o tierra, cielo abierto, etc. Opera rechazando el calor durante el día o absorbiendo lo frío durante la noche y liberándolo durante el día.

Protección Calórica.

Como ya se mencionó, la protección térmica consiste en métodos para bloquear o neutralizar los incrementos de calor solar de una edificación, disponiendo de varias formas de lograr este objetivo. Algunas de las técnicas más comunes son el acristalamiento de ventanas y el sombreado en edificios. Las técnicas de protección calórica pueden clasificarse en dos grupos: control solar y acondicionamiento micro-climático. El segundo consiste en la creación de diferentes condiciones atmosféricas que rodean el edificio, usando vegetación, superficies de agua o paisaje. Por otra parte, el control solar se refiere a la reducción de la entrada de radiación solar en el inmueble, mediante la reducción de la cantidad y tamaño de las aperturas, reduciendo la emisión de elementos transparentes o bloqueando directamente la radiación mediante sombra.

Acristalamiento de ventanas.

La fuente primaria de obtención de calor en edificios es la radiación proveniente de ventanas o de cualquier otra apertura, por lo que es de suma importancia la orientación correcta del edificio, en términos de comodidad.

Sin embargo, si la edificación ya ha sido diseñada y construida, y por lo mismo no podemos modificar su orientación, un método a tomar en cuenta es el acristalamiento de ventanas. En general existen dos tipos del mismo en el mercado, el estático, cuyas propiedades permanecen fijas, y el dinámico, cuyas propiedades se modifican, dependiendo de las necesidades.

Sombreado.

El sombreado consiste en elementos fijos o móviles del edificio, que bloquean la radiación solar, como por ejemplo aleros o persianas. Se ha investigado la influencia de los dispositivos de sombra en la demanda de enfriamiento y los resultados muestran que, independientemente

del tipo de sombra, todos ellos ayudan a reducir las demandas de energía de enfriamiento. En cuanto a las limitaciones de las estrategias en el uso de enfriamiento pasivo en climas cálidos, se ha descubierto que la sombra muestra una reducción de 28% en la demanda, para climas cálidos y húmedos, pudiendo llegar hasta el 56%. Es importante mencionar que, de acuerdo a este estudio, la sombra es la segunda mejor estrategia de enfriamiento pasivo, después de la ventilación natural, seguida del tamaño y tipo de acristalamiento.

Microclima.

Microclima es el cambio de clima a gran escala, en general, en las áreas que rodean el edificio; debido a las diferencias en topografía, paisaje y uso de superficies de agua. Se ha descubierto, para áreas de clima cálido y húmedo, que las superficies de agua no son efectivas, debido a que esta estrategia tiende a incrementar la humedad del aire, y la elevada humedad relativa limita la capacidad de enfriamiento del aire mediante enfriamiento de vapor. Por otra parte, la vegetación y el paisaje (que pueden considerarse como estrategia de sombreado) no solamente reducen la carga de enfriamiento en tanto obstáculo a la radiación solar, sino que también disminuyen la temperatura de la superficie de la pared, a través de la planta de evapotranspiración.

Modulación de calor.

La modulación de calor se refiere a la reducción de transferencia de calor al interior de los edificios o espacios cerrados, usando la estructura del edificio como disipador. Por tanto, ello depende de la masa térmica del edificio, la cual puede incrementarse mediante la selección correcta de materiales o integrando directamente la fase de cambio de materiales (PCM). Las técnicas comprendidas en esta categoría se proponen reducir los picos de carga de enfriamiento, mediante la liberación de calor absorbido por la masa térmica, a una tasa más baja, a lo largo del día.

Materiales de cambio de fase (PCM)

Los materiales de cambio de fase, conocidos comúnmente como PCM, constan de varios materiales con propiedades termo-físicas específicas, que permiten controlar el almacenamiento de energía en un sistema determinado. El principio de trabajo nace de una operación cíclica en la cual los materiales se mezclan y solidifican, absorbiendo y liberando calor, a medida que cambia la temperatura durante el día. Este proceso puede resumirse de la siguiente manera: durante el día, cuando las temperaturas del ambiente son generalmente más altas, el PCM cambia de fase sólida a líquida, a temperatura constante, absorbiendo calor y reduciendo la temperatura del espacio en la que opera. Este proceso es comúnmente conocido como fase de descarga. Durante la noche, cuando la temperatura ambiente es baja, el PCM cambia de la fase líquida a sólida, a temperatura constante, liberando el calor acumulado y elevando la temperatura del espacio en el que opera. Este proceso es conocido generalmente como fase de recarga.

Se han realizado investigaciones para determinar la efectividad de los PCM, en combinación con otros métodos de enfriamiento pasivo, como por ejemplo el control óptimo de un sistema natural de ventilación de un edificio, con una envoltura de PCM. Algunos resultados obtenidos en condiciones de simulación indican que la ventilación natural podría producir un ahorro de energía de entre 20 y 60%, mientras que la incorporación de la envoltura y el control de la ventilación podría incrementar el ahorro energético entre 40 y 80%.

Estudios relevantes mostraron que aun cuando podrían obtenerse ahorros de energía significativos, la aplicabilidad de este sistema depende de la temperatura ambiente y de otros factores. Por ejemplo, bajo condiciones áridas y cálidas, se descubrió que la integración PCM es perjudicial al sistema.

Si bien el rendimiento podría mejorarse entre 4 y 11% con la incorporación de ventilación natural, los resultados no fueron suficientemente elevados, en comparación con los obtenidos mediante la sola aplicación de ventilación natural.

Disipación térmica.

Consiste en la disposición del exceso de calor contenido en el edificio. La disipación calórica debe considerarse únicamente cuando las técnicas previas como protección de calor y de modulación no son suficientes para cumplir con las condiciones de comodidad térmica.

Existen varios métodos que pueden lograr la disipación de calor, sin embargo, todos requieren de un disipador apropiado, a través del cual el exceso de calor puede ser eliminado.

Ventilación natural.

La ventilación natural es indiscutiblemente la forma más eficiente, en términos energéticos, de reducir las temperaturas interiores. Se basa en fenómenos atmosféricos de ocurrencia natural, que generan movimientos de aire de afuera hacia adentro, que no requiere de equipo especializado, además de elementos arquitectónicos de uso común, presentes en la mayoría de edificios. Por otra parte, tiene la ventaja de que puede ser incorporado en otras tecnologías de enfriamiento, con el fin de reducir las cargas y mejorar su eficiencia.

Los autores sostienen que estos métodos pueden proporcionar temperaturas interiores que cumplan con los estándares de comodidad térmica, durante largos períodos de tiempo. Sin embargo, enfatizan que ello podría cambiar en años venideros, debido a la elevación de las temperaturas en general, como consecuencia del calentamiento global. En tal contexto, las chimeneas solares y los captadores de viento han mostrado mayor efectividad.

Captadores de viento (o torres eólicas).

Consiste en un método de enfriamiento pasivo usado durante miles de años, especialmente en climas áridos, donde el bienestar térmico raramente se logra mediante condiciones ambientales normales. El rendimiento de los captadores de viento es afectado por ciertos factores, tales como la velocidad promedio del viento (bajo condiciones ambientales normales); la diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior; y la geometría de las entradas principales y aberturas.

Chimeneas solares.

Han sido muy usadas, al igual que los captadores de viento, a lo largo de la historia, para mitigar las condiciones inadecuadas de enfriamiento, en ambientes áridos y cálidos y son, por ahora, una de las soluciones más comunes para manejar la reducción de cargas de enfriamiento al interior de los edificios. El principio de funcionamiento de este método es el efecto de flotación, creado por la diferencia de temperatura entre el aire interior de la chimenea y el aire fuera y dentro del aire enfriado. Generalmente la radiación solar es usada como fuente de calor para calentar el aire dentro de la chimenea, reduciendo su intensidad y creando un flujo de aire que desvía el aire dentro de la habitación.

Enfriamiento natural.

La técnica de enfriamiento natural requiere de un disipador de calor, a fin de disponer del excedente de calor del edificio. Existen tres opciones principales para enfriar espacios interiores: enfriamiento por evaporación, enfriamiento de suelo y enfriamiento por radiación,

requiriendo cada uno de un disipador diferente. El enfriamiento por evaporación consiste en tomar el calor sensible del aire para usarlo como calor latente necesario en la evaporación de agua. El enfriamiento de suelo es una estrategia que aprovecha las bajas temperaturas del suelo del edificio para enfriarlo directamente de o mediante la circulación del aire del subsuelo y luego introduciéndolo en el edificio; y, por último, el enfriamiento por radiación se basa en la emisión de una longitud de onda específica de radiación al espacio, que actúa como un disipador, debido a su baja temperatura.

Puesto que la humedad relativa es alta en las zonas tropicales, una estrategia directa de enfriamiento por vapor sería inapropiada, en vista de tales condiciones, si bien posee un gran potencial en climas cálidos y secos. El enfriamiento indirecto por evaporación ha sido valorado en diferentes condiciones climáticas, pero tiene muchas limitaciones en climas cálidos y húmedos, ya que también necesita de corrientes de aire seco. Otra opción para remover incrementos de calor es mediante techos fríos, en los cuales corre agua fría entre el techo y las estructuras del edificio. Esto se combina a menudo con paneles radiales, con el fin de que lo frío del panel se transfiera al espacio condicionado.

Tecnología de enfriamiento radiante.

Se sustenta en el concepto de radiación térmica. La radiación térmica es la fracción del espectro electromagnético en el rango de 0.1 a 100 micrones. Toda materia abajo del cero absoluto tiene emisiones continuas, debido a las transiciones energéticas y a procesos internos que ocurren al interior de los átomos de una sustancia. Fundamentalmente, la temperatura es la medida microscópica de la fuerza de estas actividades internas. Los índices de radiación se incrementan a altas temperaturas. La radiación térmica es la cantidad de energía liberada por un objeto, debido a su temperatura, y ello depende de la longitud de onda determinada, del material y de la superficie.

Recientemente, la investigación se ha centrado en el efecto de las condiciones climáticas externas, geometrías, configuraciones estructurales y los diferentes tipos de materiales; evaluando, además, el rendimiento del enfriamiento de reflexión y radiante, en las condiciones climáticas tropicales del sudeste asiático. Sus conclusiones confirman que dichas técnicas son aptas para cualquier condición climática, ya que reducen la cantidad de calor absorbido por el edificio mediante reflexión, disminuyendo por lo mismo el consumo energético asociado a las tradicionales unidades A C. Sin embargo, el enfriamiento radiante fue afectado negativamente por los altos niveles de humedad, cobertura de nubes y contaminación del aire.

Ideas novedosas han sido orientadas a proporcionar soluciones satisfactorias en cuanto a costo, mediante la aplicación de esta técnica de enfriamiento, de disponibilidad inmediata y que no requiere de equipo especializado. También se descubrió que la cobertura de nubes, lluvia y condensación de agua en la superficie del radiador, debido a la alta humedad, repercute negativamente en el desempeño del sistema.

Si bien la tecnología de enfriamiento radiante aún permanece en sus fases iniciales, se han desarrollado diferentes modelos, a fin de evaluar los efectos de integrar enfriadores radiantes en los mecanismos y dispositivos de enfriamiento ya existentes. Nuevamente, la relativa humedad y la presencia de nubosidad perjudica este tipo de operaciones; tales sistemas tienen mejor viabilidad en climas áridos, mientras que su uso en climas tropicales requiere de una reducción significativa de sus costos, para lograr un ahorro sustancial en su implementación.

Deshumidificación y ciclos de enfriamiento.

Como ya se mencionó en la primera parte del documento, la mayoría de sistemas estudiados pueden trabajar juntos, combinando tecnologías de enfriamiento y deshumidificación, no

únicamente con el objetivo de cumplir con la comodidad térmica de sus ocupantes sino, además, con los ahorros de energía, en comparación con los sistemas convencionales de aire acondicionado.

Discusión de los cambios sustanciales y las perspectivas a futuro.

Como ya se destacó anteriormente, la deshumidificación y enfriamiento pasivo o de bajo consumo de energía, podría ser de gran ayuda en la reducción de energía y emisiones de carbono asociadas con sistemas mecánicos de enfriamiento convencionales. Sin embargo, ninguna tecnología de vanguardia se ha mostrado, hasta ahora, competitiva en términos comerciales, respecto a los sistemas tradicionales. El rendimiento es uno de los aspectos clave, ya que es todo un reto replicar los niveles de temperatura y humedad requeridos para lograr comodidad térmica. Se han hecho esfuerzos en la actualidad que parecen haber logrado algunos resultados satisfactorios de manera aislada, pero no simultáneamente o bajo condiciones climáticas determinadas. El costo es también un factor a tomar muy en cuenta en algunas tecnologías prometedoras.

Entre las tecnologías de deshumidificación presentadas en este trabajo, se incluyen desafíos cruciales, tales como temperaturas de alta regeneración; operaciones discontinuas y la inhabilidad en el procesamiento de grandes cantidades de aire. Nuevas investigaciones que estudian el uso de nuevos materiales con mayor capacidad de eliminación de humedad, configuraciones nuevas y reducción de tiempo en los ciclos de operación podrían ayudar a volver más eficientes las tecnologías de desecación.

Si bien se sostiene que la mayoría de tecnologías de enfriamiento y deshumidificación pueden trabajar en conjunto, pocos estudios han explorado la interrelación entre las tecnologías más prometedoras, existiendo una cantidad limitada de investigación, respecto a la combinación de técnicas de deshumidificación y enfriamiento.

Conclusión.

En esta sección se han revisado las tecnologías alternativas de deshumidificación y enfriamiento, enfocándose en las que son aplicables a climas tropicales. Se descubrió que todas ellas tienen ventajas y desventajas en situaciones específicas de aplicación y que la forma más efectiva de cumplir con los estándares de comodidad térmica en espacios interiores, es la combinación de técnicas diferentes, particularmente cuando dos mecanismos independientes logran el control de la temperatura y la humedad.

Para el diseño e implementación de sistemas de deshumidificación y enfriamiento, es crucial considerar que sus niveles de rendimiento dependen principalmente de las condiciones climáticas de la zona seleccionada. De allí que sea imperativo buscar tecnologías que sean apropiadas a las condiciones existentes, sustentadas en los principales parámetros que repercuten en sus respectivos rendimientos, así como si sus condiciones de operación pueden satisfacer la demanda del espacio condicionado.

Por lo tanto, uno de los objetivos de la presente investigación no es identificar una sola alternativa como la mejor, sino evaluar el potencial desempeño de muchas otras, para climas cálidos y húmedos, tomando en cuenta investigaciones y resultados previos.

3. Simulación de tecnologías seleccionadas

Las tecnologías identificadas en el primer componente son comparadas y valoradas en el segundo componente de la investigación, según criterios de pertinencia. Los criterios empleados en la valoración son: rendimiento, costo, facilidad de implementación y madurez. El criterio de rendimiento se refiere a qué tan eficiente es una tecnología determinada para lograr su objetivo de controlar la humedad y/o temperatura, con un consumo mínimo de energía. A las tecnologías identificadas se les asignó una valoración baja, alta o media en cada criterio. Con base en las valoraciones obtenidas, se asignó una calificación cuantitativa global entre 1 y 3, donde 3 implica que la tecnología es más pertinente.

A continuación, se presenta una tabla con las valoraciones y calificaciones otorgadas a cada tecnología.

Tecnología	Rendimiento	Costo	Facilidad de implementación	Factores clave	Madurez	Calificación
Desecantes líquidos – Adiabático	Alto	Medio	Baja	Desecante a utilizar. Humedad y temperatura ambiente.	Media	2
Desecantes líquidos - Enfriado	Alto	Medio	Baja	Costo adicional por enfriamiento. Desecante a usar. Condiciones ambiente.	Baja	2
Ventanas fotovoltaicas	Medio	Alto	Alta	Eficiencia de la generación fotovoltaica. Radiación incidente Dinámica de consumo energético del edificio.	Baja	2
Ventanas con acristalamiento estático	Medio	Bajo	Alta	Coefficiente SHGC. Variaciones climáticas en el año	Alta	1
Voladizos, louvers	Alto	Bajo	Alta	Orientación del edificio Tamaño de la ventana a cubrir	Alta	2
Árboles de sombra	Bajo	Bajo	Bajo	Tamaño del árbol respecto al edificio Distancia entre el árbol y la pared	Media	1
Muro de Trombe Fotovoltaico	Alto	Medio	Media	Radiación incidente sobre el muro Dinámica de consumo energético Condiciones del aire ambiente	Baja	3

Enfriamiento evaporativo	Bajo	Bajo	Medio	Humedad relativa del ambiente Disposición de flujo de aire seco	Alta	1
Cielo falso enfriado con panel radiante	Bajo	Medio	Medio	Consumo energético Humedad del espacio interior	Medio	1
Desecantes Sólidos – Rueda Desecante	Alto	Bajo	Medio	Temperatura necesaria de regeneración. Condiciones de humedad y temperatura aire a la entrada. Matriz del material desecante. Caída de presión del aire. Operación Cíclica.	Alta	3
Desecantes Sólidos – Lecho Empacado	Medio	Medio	Medio	Tiempo de Regeneración. Condiciones de temperatura y humedad del aire a la entrada. Número de capas de material desecante. Caída de presión.	Alta	2
PCMs	Alto	Medio	Baja	Rango de temperatura diurna. Propiedades termo físicas. Disponibilidad y precio. Operación en conjunto con otras tecnologías. Integración al entorno.	Alta	2
Chimeneas Solares	Alto	Medio	Medio	Geometría de la chimenea. Altura de ventilación. Propiedades térmicas de los materiales absorbedores de calor. Geometría de las aperturas. Pendiente de la chimenea.	Alta	3
Torres Atrapa Vientos	Alto	Medio	Medio	Velocidad promedio del viento en el exterior. Diferencia de temperatura	Alta	3

				entre aire dentro y fuera del recinto. Geometría de las aperturas.		
Enfriamiento Radiativo	Medio	Alto	Baja	Humedad relativa del ambiente. Temperatura ambiente. Emisividad del material en el rango de la ventana atmosférica. Intensidad de la irradiancia solar. Nubosidad. Configuración del panel (geometría). Efecto de la cubierta de viento.	Media	2

La valoración presentada en la tabla permite priorizar tecnologías a estudiar con más detalle en nuestra investigación. La investigación, en su fase siguiente, incluye la realización de simulaciones numéricas con tecnologías seleccionadas, con el objetivo de predecir su desempeño en condiciones reales.

Con base en la matriz anterior, las tecnologías seleccionadas para realizar la simulación son las siguientes:

- Muro Trombe.
- Protección de ventanas
- Materiales de cambio de fase
- Rueda desecante

La rueda desecante es la configuración de desecante sólido que se selecciona para las simulaciones principalmente debido a su facilidad de implementación, bajos costos iniciales, y buen rendimiento. Este tipo de tecnología tiene la facilidad de operar de forma cíclica con costos relativamente bajos de operación, siendo necesaria únicamente una fuente motriz para dar rotación a su eje central. Otro factor importante a considerar es que los avances en las tecnologías de impresión 3D han demostrado que se pueden fabricar a bajo costo y según las necesidades específicas, siendo los materiales desecantes que se requieren de bajo costo y ampliamente disponibles. Aun cuando las temperaturas de regeneración requeridas para lograr altas eficiencias pueden llegar a ser prohibitivas, se ha demostrado por medio de investigaciones experimentales que aun a bajas temperaturas de regeneración esta tecnología es capaz de lograr un rendimiento aceptable.

La tecnología de enfriamiento por la que se opta es por una combinación de PCM con chimenea solar. Los PCM son una tecnología innovadora que se basa en las propiedades

químicas de ciertos materiales para absorber y liberar calor de forma cíclica y sin la necesidad de ninguna regeneración. Debido a esto, su costo se reduce a la adquisición e incorporación a los entornos a enfriar. Se ha demostrado que su aplicación, junto con otras tecnologías de ventilación natural, puede lograr reducciones significativas en la temperatura en distintos estratos de aire, y permitiendo ahorros energéticos importantes. Sin embargo, a pesar de que su implementación, resulta un tanto compleja, es una tecnología con mucho potencial y de muy bajo costo, por lo cual se opta finalmente por ella.

Es importante considerar que, aunque había tecnologías con calificaciones más altas, para propósitos de la investigación y simulación fueron descartadas.

SIMULACIÓN Y RESULTADOS

Los programas por computadora TRNSYS y DesignBuilder fueron seleccionados para las simulaciones, las cuales utilizan datos climáticos de Ilopango obtenidos de la base de datos METEONORM. Se utilizó Ilopango por ser la base climática completa y disponible más cercana a la UCA.

Para simular el desempeño energético de edificaciones, se suele definir una línea base de referencia o caso base. El caso base definido en la investigación consiste en un edificio tipo, que no cuenta con sistema de aire acondicionado ni medidas pasivas para el enfriamiento. En la simulación se compara el desempeño del edificio con la tecnología a investigar, con el desempeño del mismo edificio sin una tecnología de enfriamiento y/o deshumidificación. Es posible cuantificar la diferencia en temperatura, humedad y consumo energético causada por la tecnología bajo estudio y, en consecuencia, su potencial beneficio para mejorar las condiciones térmicas de los edificios.

El caso base seleccionado consiste en un edificio residencial de 150 m², de dimensiones 15m x 10m x 3m construido con materiales comúnmente empleados en El Salvador. Dichos materiales son bloques de concreto y ladrillo en paredes, ventanas de un solo vidrio con marco de aluminio, techo metálico a dos aguas, con un ángulo de inclinación de 11.31° con respecto al plano horizontal. El edificio es orientado hacia el norte en su fachada más ancha. Todas las paredes tienen ventanas que cubren un 30% del área. En la Ilustración 2 se presenta una imagen en tres dimensiones del edificio base.

Como parámetros de uso del edificio, se asumió una ocupación de cinco personas, con patrones de uso típicos en viviendas. El caso base no tiene instalado un sistema de climatización mecánica.

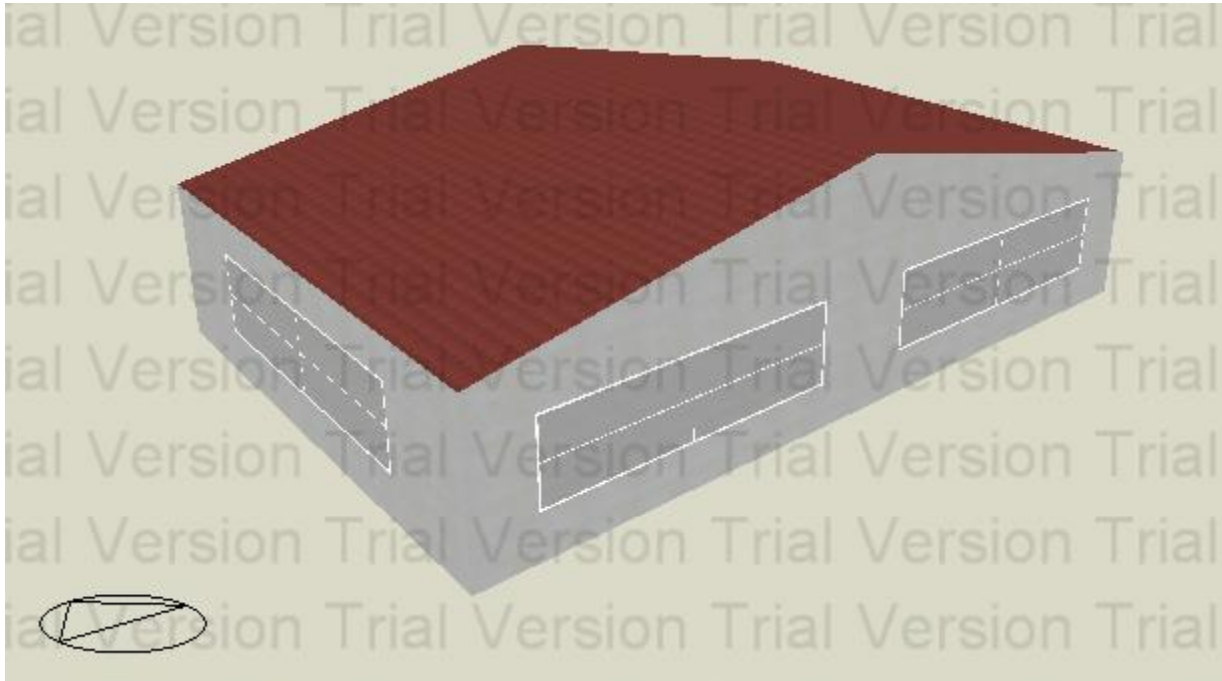


Ilustración 2 Edificio del caso base

Caso 1. Edificio con Aire Acondicionado

Como un primer caso de análisis, se simuló el edificio con un sistema de aire acondicionado, capaz de controlar la temperatura y humedad en todo momento. El objetivo de analizar este caso es cuantificar el consumo energético requerido para alcanzar el confort térmico con un sistema convencional. Los demás casos serán comparados en términos de costo con este caso, porque este caso representa lo que sucede si se utiliza un sistema convencional ya que la idea es encontrar alternativas económicas de menor costo.

Se dimensionó la carga térmica requerida por el sistema de aire acondicionado, resultando en una capacidad de enfriamiento requerida de 57.63 kW (16.4 toneladas de refrigeración). El indicador de rendimiento SCOP asumido es 4.5, con un factor de diseño de 1.15 y carga térmica real de 50.11 kW. La siguiente ilustración presenta información sobre la capacidad de diseño utilizada para la simulación.

Zone	Design Capacity (kW)	Design Flow Rate (m3/s)	Total Cooling Load (kW)	Sensible (kW)	Latent (kW)
- Building 1					
Block1:Zone1	57.63	70.9599	50.11	45.41	4.70
Totals	57.63	70.9599	50.11	45.41	4.70

Ilustración 3 Capacidad del sistema de aire acondicionado utilizado para la simulación

El periodo de tiempo utilizado para la simulación fue el mes de abril, por ser el mes en el cual se tiene condiciones climáticas más cálidas y húmedas, permitiendo estimar el desempeño de cada tecnología evaluada, en condiciones críticas. Los resultados obtenidos de la simulación arrojaron una temperatura de aire interior promedio de 22.34°C, con un valor máximo de 26.00°C y un valor mínimo de 20.38°C. La humedad relativa promedio obtenida es 50.77%, con

valores máximo y mínimo de 61.04% y 39.44%, respectivamente. Los valores de temperatura y humedad relativa obtenidos están dentro de los rangos generalmente aceptados para el confort térmico.

Caso 2: Muro Trombe

El muro Trombe es una estrategia de enfriamiento pasivo que consiste de la disipación de calor hacia el exterior del edificio mediante la incorporación de una pared que sirve como masa térmica en combinación con aperturas que permiten la salida del aire caliente. El muro Trombe cuenta con dos capas, la exterior es un material transparente, en nuestro caso un vidrio de 6 mm de ancho y la segunda capa un muro de ladrillo con recubrimiento de concreto, similar a las otras paredes del edificio. Hay una separación de 30 cm entre la cubierta transparente y el ladrillo. La función de dicha separación es facilitar el transporte del aire caliente generado. Hay una salida de aire en la parte superior de la cubierta de vidrio y una entrada de aire en la parte inferior del muro de ladrillo. Dicha configuración permite evacuar el calor del edificio. En la pared opuesta al muro Trombe, hay una entrada de aire fresco, lo que permite ventilar el espacio, aprovechando el efecto térmico del muro Trombe.

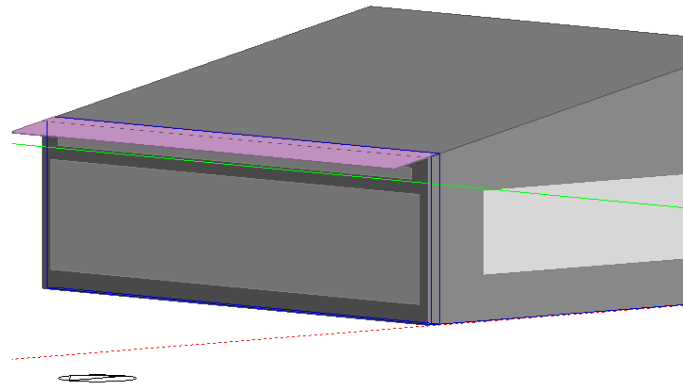


Ilustración 4 Imagen del muro Trombe, fachada norte

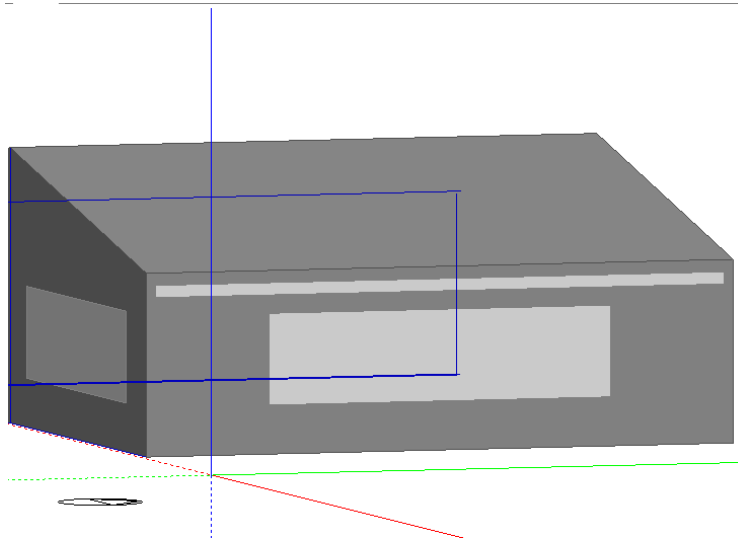


Ilustración 5 Imagen de fachada Sur, con la entrada de ventilación en la parte superior

Resultados de la simulación

Los resultados obtenidos muestran una clara mejoría en la temperatura interior del edificio, comparada con el caso base. Hay una reducción de aproximadamente 4°C en promedio. Sin embargo, esta tecnología tiene un efecto negativo en la humedad relativa, en comparación con el caso base. La explicación está en el hecho de que, al reducir la temperatura del aire, la capacidad del mismo para absorber humedad disminuye, llegando incluso a saturarse, por las mismas condiciones de humedad absoluta. Un efecto positivo adicional es el incremento en cambios de aire, propiciado por las rejillas de ventilación del muro Trombe. En el caso base, la infiltración de aire es de 0.7 cambios de aire por hora, incrementándose a 5 cambios de aire por hora para la tecnología de muro Trombe. Si bien dicho aumento en cambios de aire es positivo, ya que mejora la calidad de aire en el interior, tiene como consecuencia un ligero aumento de la humedad relativa.

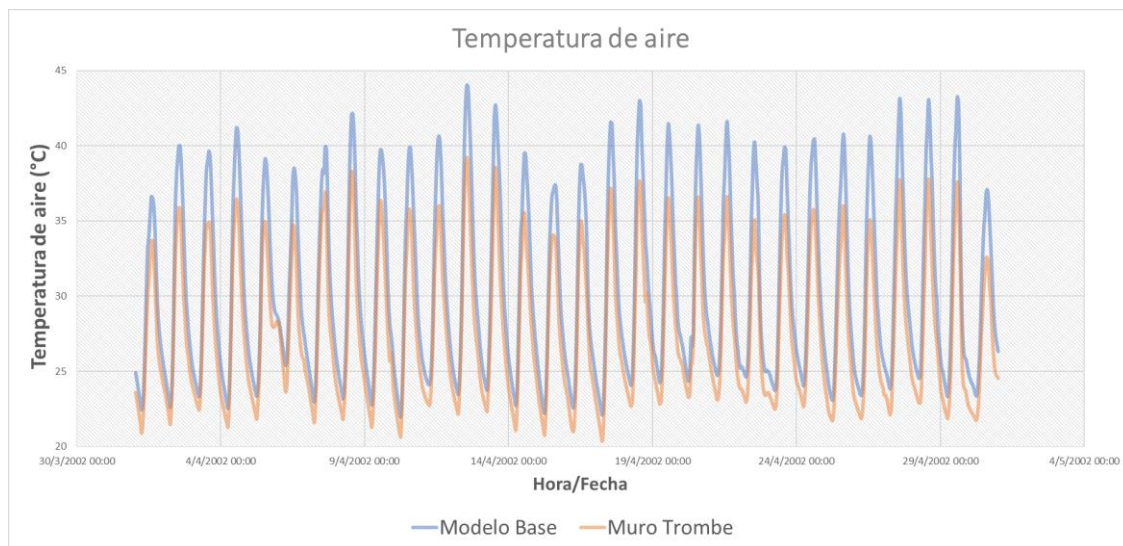


Ilustración 6 Temperatura del aire al interior del edificio

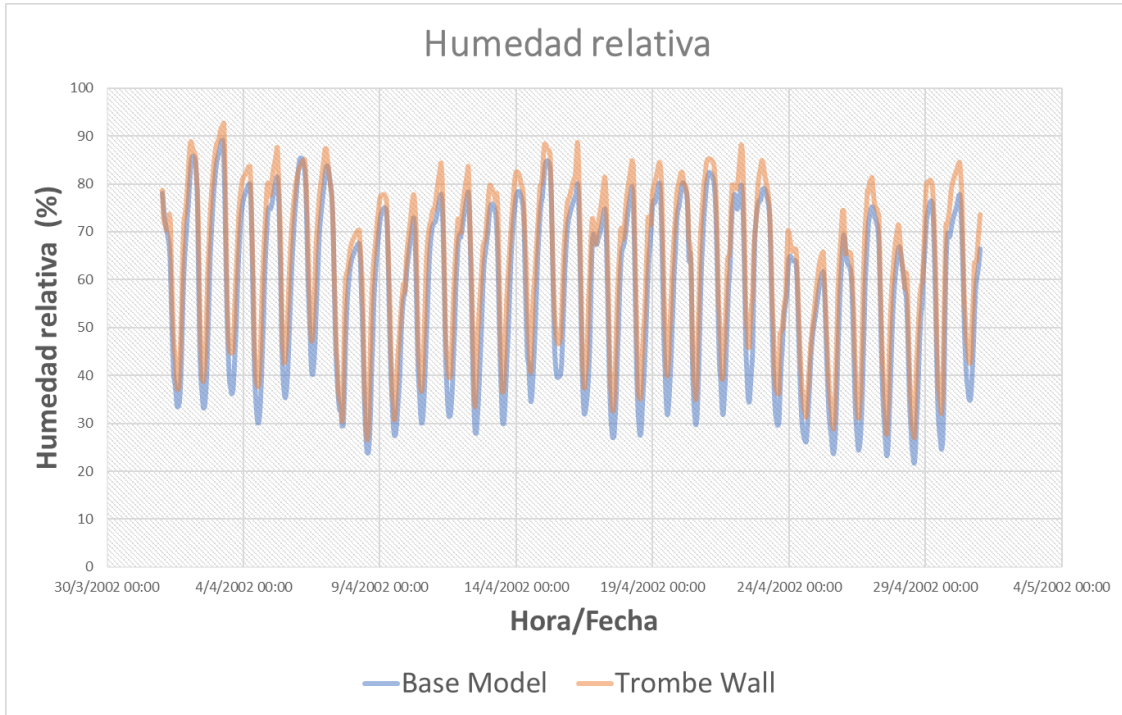


Ilustración 7 Humedad relativa al interior del edificio

La temperatura promedio del aire interior, utilizando el Muro Trombe, fue de 27.68°C, comparada con una temperatura promedio de 30.52°C para el caso base. Las temperaturas máxima y mínima simuladas para el caso del Muro Trombe fueron de 39.25°C y 20.35°C, respectivamente, comparadas con valores de 44.04°C y 21.97°C para el caso base. Con respecto a la humedad relativa interior, el valor promedio obtenido con el Muro Trombe fue 63.81%. Los valores máximo y mínimo reportados son 92.64% y 26.65% respectivamente. Los valores correspondientes al caso base fueron 57.61%, 89.18% y 21.60%, respectivamente.

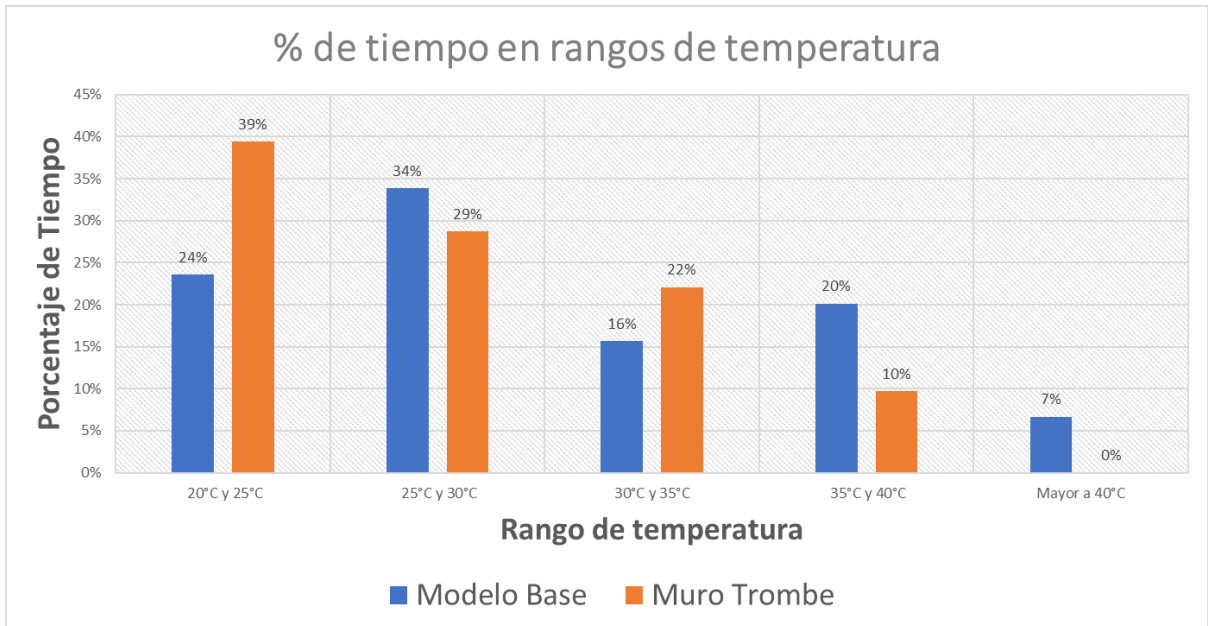


Ilustración 8 Comparación de rangos de tiempo a intervalos de temperatura

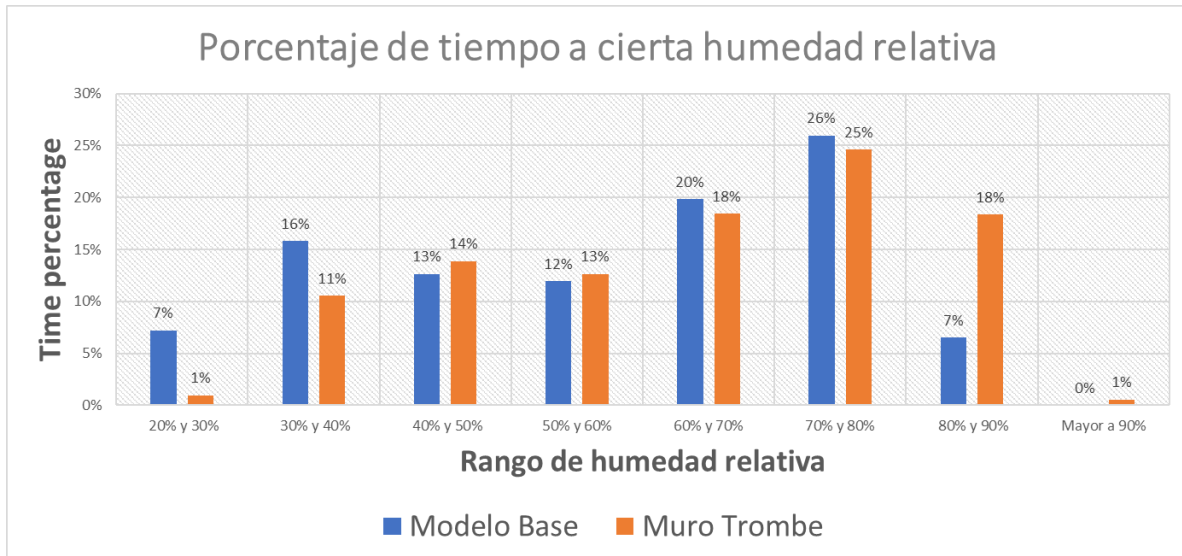


Ilustración 9 Comparación de humedad relativa en intervalos

A partir de la Ilustración 8 se observa que el potencial de esta estrategia para controlar la temperatura es muy alto. Se observan dos beneficios claros, los picos de temperatura fueron reducidos notablemente y las temperaturas se concentran en un rango de temperatura menor, entre 20°C y 30°C.

Caso 3: Protección de ventanas

La estrategia de protección de ventanas busca reducir la temperatura interior del aire mediante la reducción de la ganancia de calor solar, la cual es usualmente un factor determinante para el incremento de temperatura en edificios. El tipo de protección utilizado es denominado Egg Crate, por ser una de las protecciones más completas en cubrir mayor área de incidencia solar. La geometría de la protección consiste en superficies de 50 cm de profundidad proyectadas vertical y horizontalmente, con el objetivo de proteger la ventana de la radiación directa del sol. Este tipo de protección fue aplicado a todas las ventanas del edificio.



Ilustración 10 Ventanas con protección solar

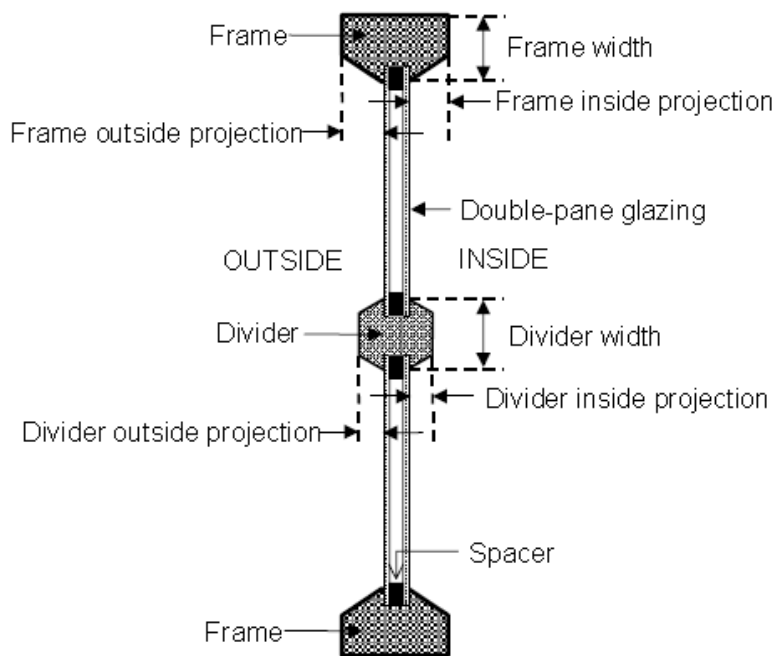


Ilustración 11 Parámetros geométricos para los marcos y divisores de ventana

Resultados de la simulación

Los resultados obtenidos por esta simulación no fueron favorables porque la disminución en temperatura interior fue mínima, aproximadamente de 0.5°C en promedio. Dicha diferencia no es significativa e indudablemente no justificaría la inversión en la tecnología. Además, la humedad relativa aumenta ligeramente como resultado de la reducción leve en temperatura.

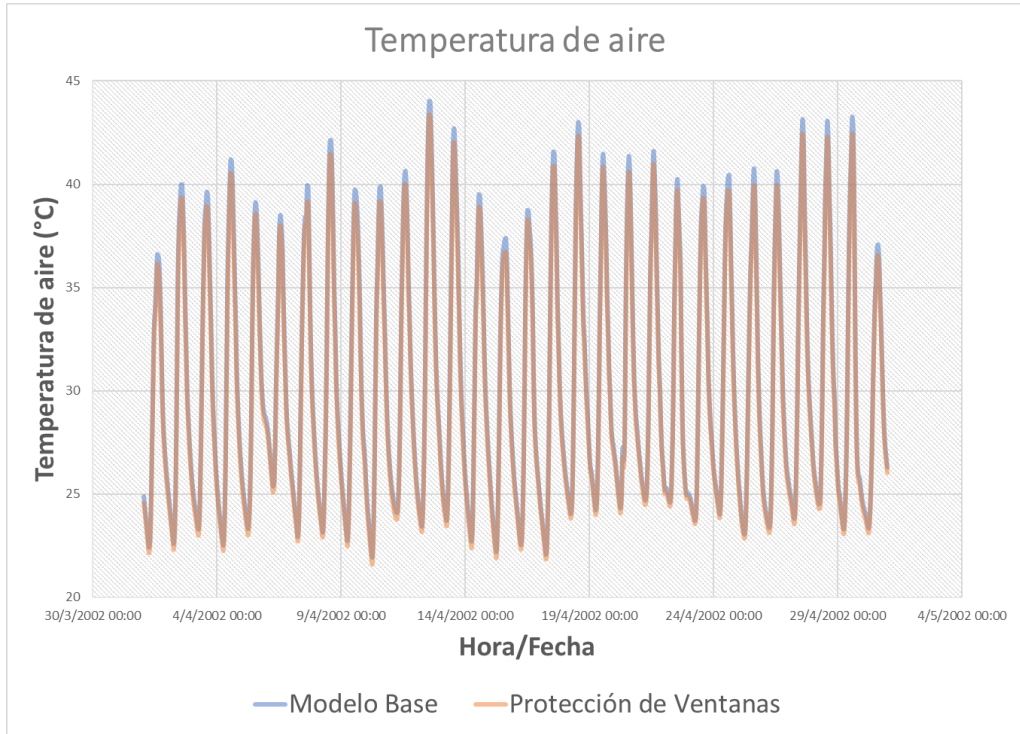


Ilustración 12 Comparación de distribución de temperaturas con protección de ventanas y caso base

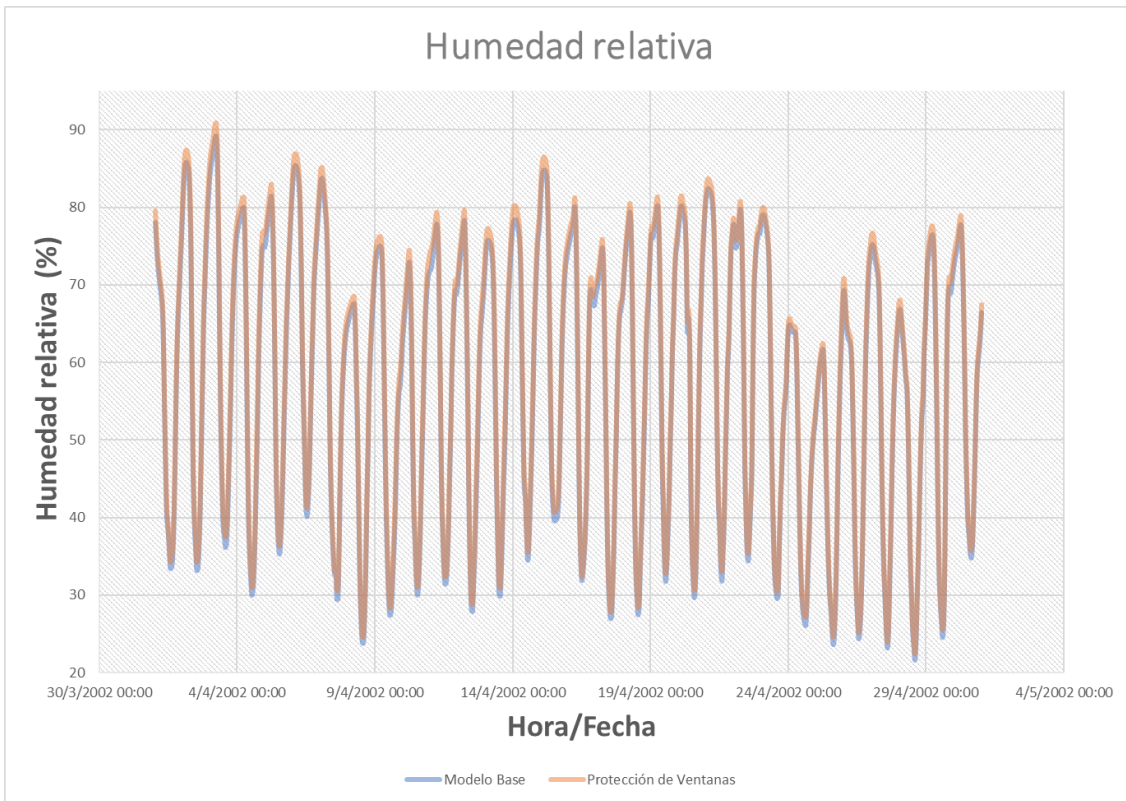


Ilustración 13 Humedad relativa con protección de ventanas

El valor promedio de temperatura, obtenido de la simulación, fue de 29.84°C, con valores máximo y mínimo de 43.36°C y 21.61°C, respectivamente. Dichos valores no se alejan mucho de los obtenidos en el caso base, con una temperatura promedio de 30.32°C con valores máximo y mínimo de 44.04°C y 21.97°C, respectivamente. Con relación a la humedad relativa, el caso simulado reportó un valor promedio de 58.98%, con valores máximo y mínimo de 90.84% y 22.46%, lo cual no contrasta mucho con un valor promedio de 57.61%, con valores máximo y mínimo de 89.18% y 21.60% para el caso base.

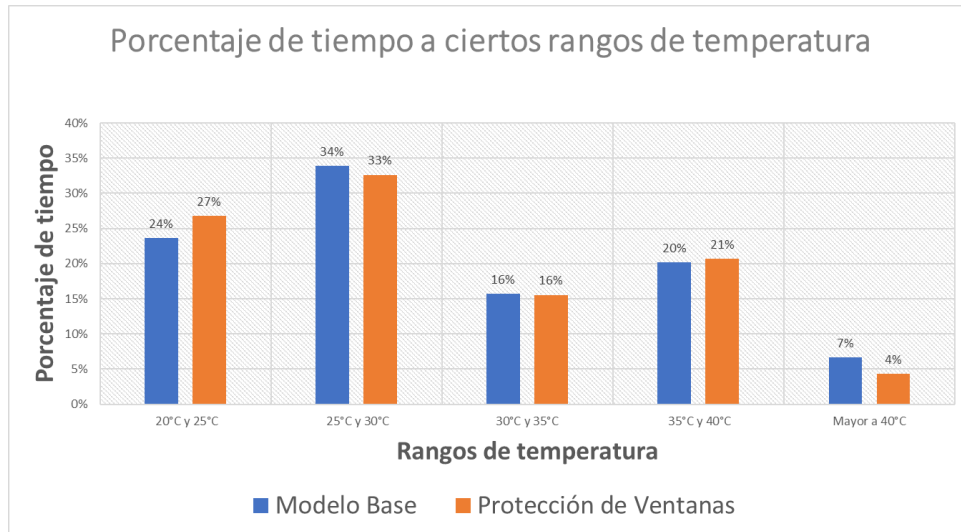


Ilustración 14 Comparación de horas a cierto intervalo de temperatura

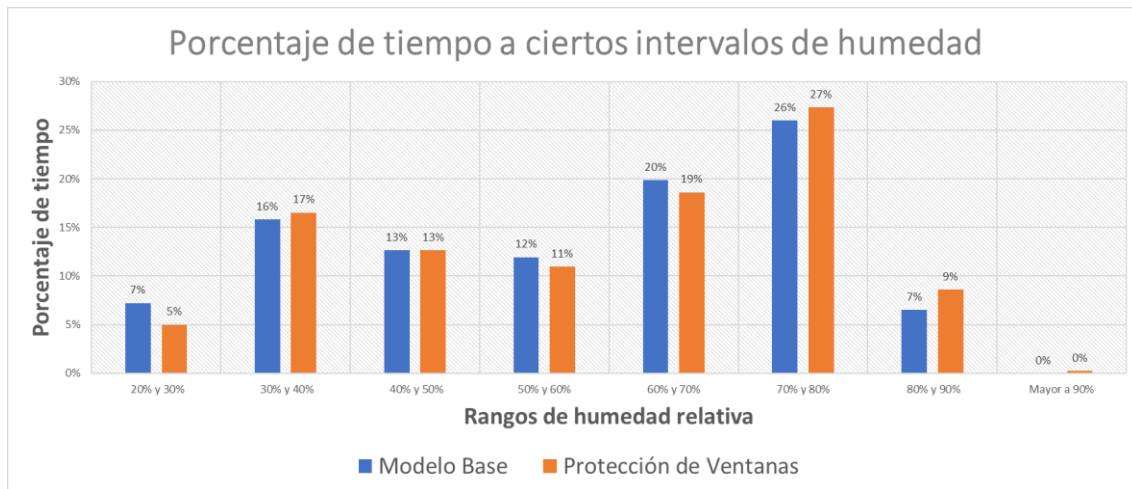


Ilustración 15 Comparación de horas a cierto intervalo de humedad relativa

El resultado de esta simulación, reflejado en las figuras anteriores, es que la colocación de elementos de sombra para ventanas tiene un efecto despreciable en la temperatura y humedad del aire interior. Sin embargo, este resultado no puede generalizarse, pues otros factores, tales como el porcentaje de ventanas utilizado por fachada, época del año, tipo de construcción, también deben ser considerados en el análisis.

Caso 4: Materiales de cambio de fase (PCM)

Los materiales de cambio de fase, o PCM, por sus siglas en inglés, son una de las tecnologías investigadas en este proyecto. El propósito de la tecnología es el de incrementar la masa térmica del edificio y absorber calor latente a través de un proceso de cambio de fase sólido-líquido de un material. Para la simulación de esta tecnología, dos casos fueron analizados: el primero, consideró una capa de material PCM genérico y el segundo dos capas. Las capas fueron colocadas en la parte interior y exterior de los ladrillos de concreto que componen las paredes estructurales del edificio, así como en la superficie interior y exterior de la cubierta de aluminio del techo. Se presenta a continuación el detalle constructivo de las paredes y techos, con respecto a la incorporación del material PCM.

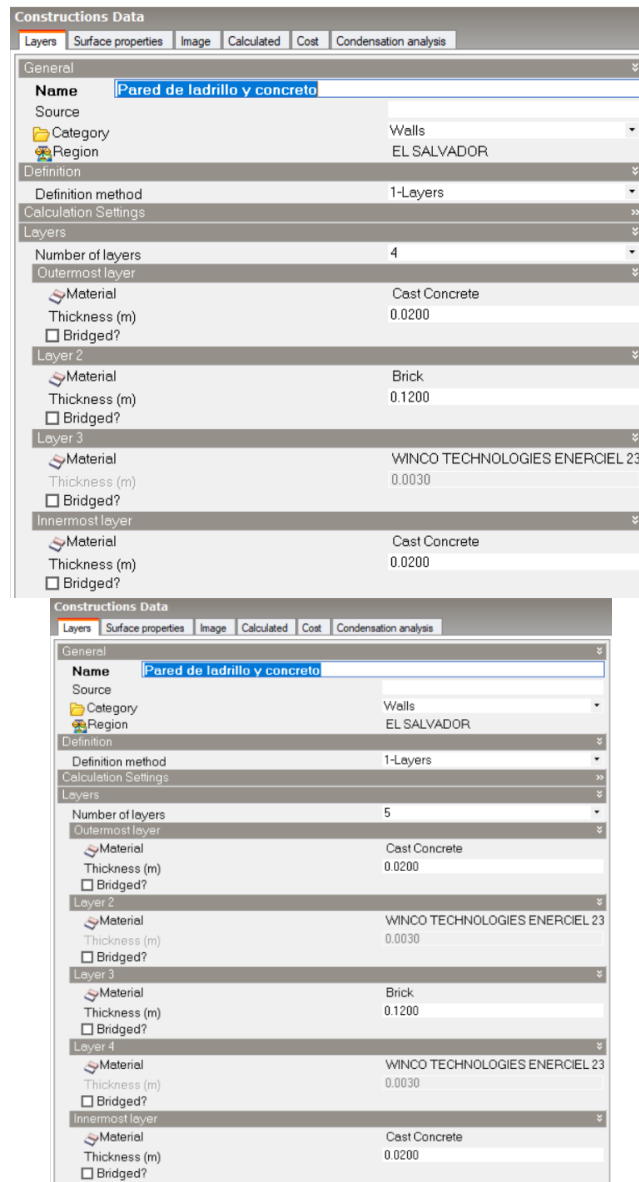


Ilustración 16 Detalles constructivos de las paredes con una y dos capas de PCM

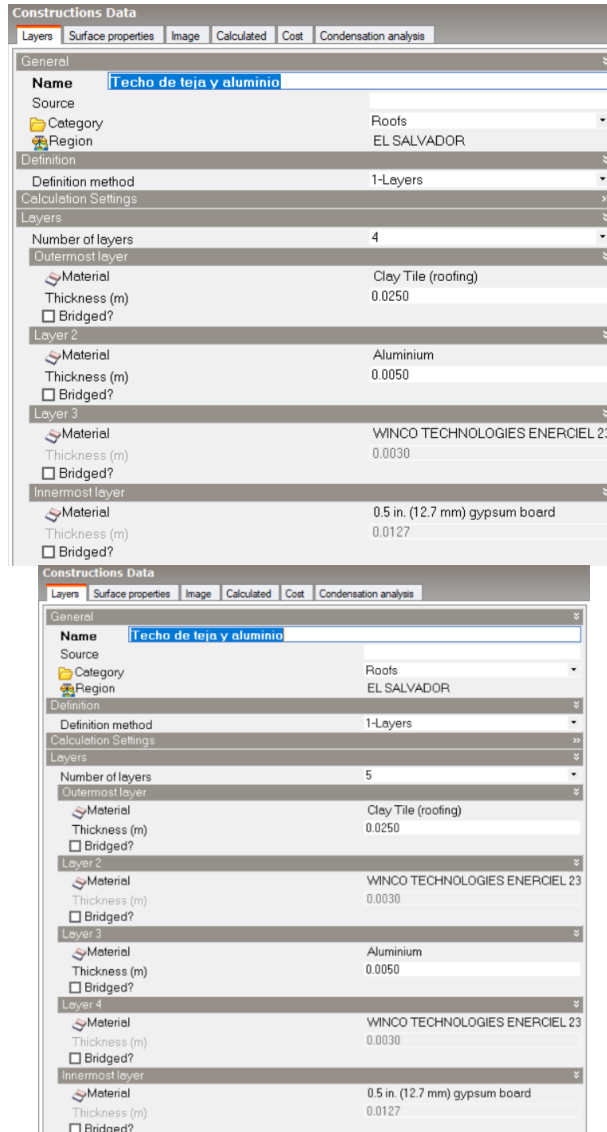


Ilustración 17 Detalles constructivos de los cielos falsos con una y dos capas de PCM

Resultados de la simulación

A continuación se presentan los resultados de la distribución de temperatura y humedad relativa.

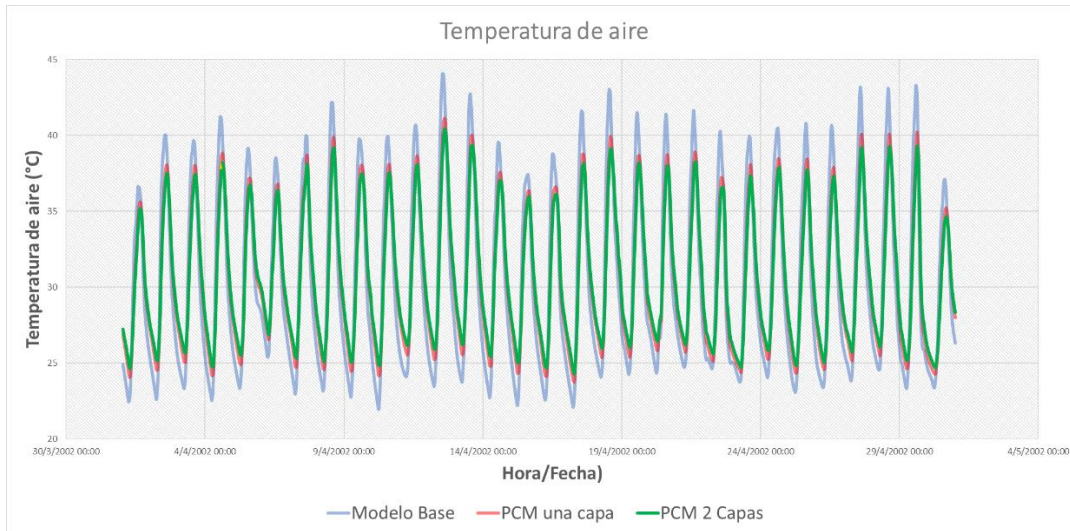


Ilustración 18 Comparación de temperatura para casos PCM

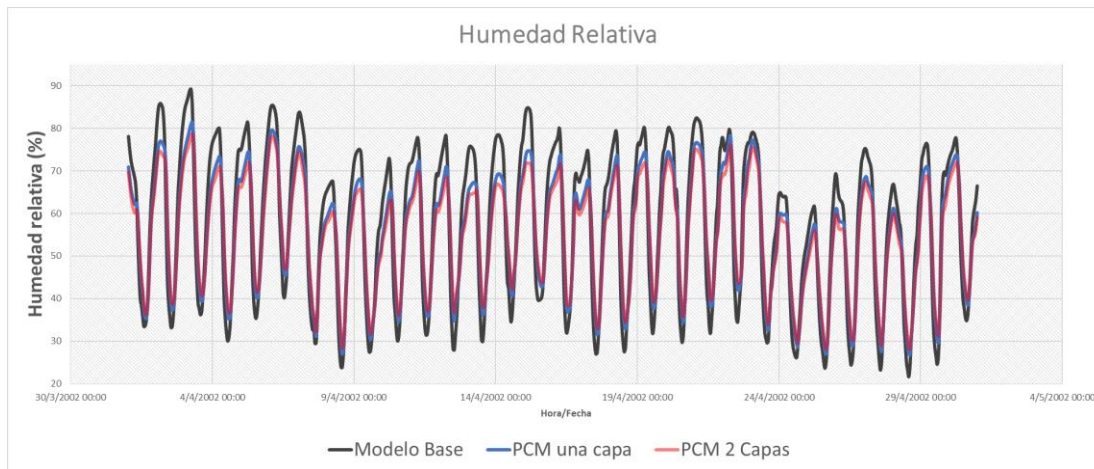


Ilustración 19 Comparación de humedad relativa para casos PCM

Visualmente, la diferencia entre los tres modelos es notable. Puede observarse que tanto en temperatura como en humedad relativa hay un amortiguamiento de las distribuciones cuando se incorpora el material PCM, en comparación con el caso base. En otras palabras, los valores máximos de temperatura y humedad relativa son reducidos significativamente, lo cual es positivo, ya que se mejora el confort térmico bajo condición crítica.

Tabla 1 Comparación de variables de confort para los casos simulados

Caso	Temperatura promedio	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Humedad relativa promedio	Humedad relativa máxima	Humedad relativa mínima
Caso base	30.32°C	44.04°C	21.97°C	57.61%	89.18%	21.60%
PCM 1 capa	30.55°C	41.15°C	23.76°C	55.86%	81.39%	26.85%
PCM 2 capas	30.65°C	40.44°C	24.31°C	55.25%	78.69%	28.04%

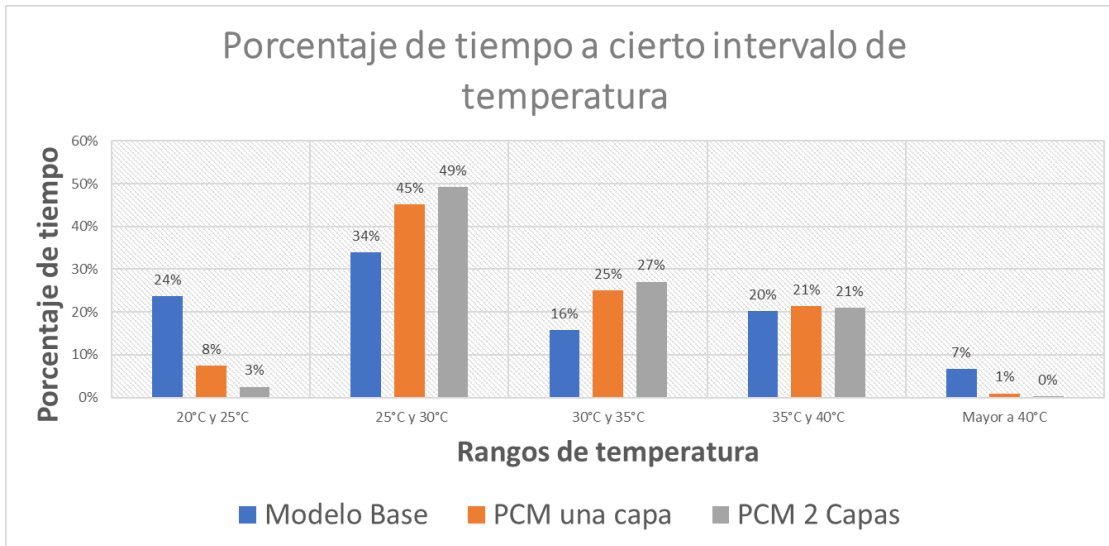


Ilustración 20 Distribución de temperaturas para opciones PCM

A partir de los resultados obtenidos, puede notarse que la tecnología PCM permite concentrar las temperaturas en el rango 25°C – 30°C, minimizando los porcentajes en los rangos superior e inferior. Esto significa que el edificio se mantendrá en condiciones más favorables la mayoría del tiempo, en especial cuando el clima es más cálido.

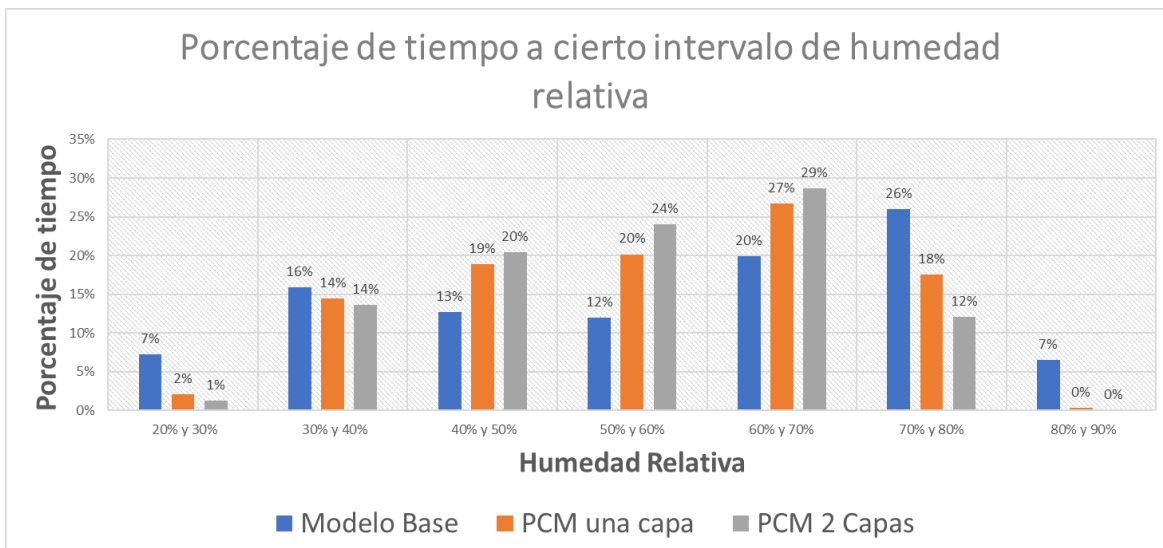


Ilustración 21 Comparación de porcentaje de tiempo a cierto intervalo de humedad relativa

Con respecto a la humedad relativa, se observa un comportamiento similar. Se concentran los valores entre 40% -70%, minimizando los porcentajes en los rangos superior e inferior, implicando que se tendrá más horas de ocupación bajo condiciones de confort.

Caso 5: Rueda Desecante

La rueda desecante es una tecnología que permite cambiar las condiciones de humedad relativa en un espacio habitado a través de la deshumidificación directa del aire. El proceso de deshumidificación se obtiene por medio de la transferencia de calor y masa entre una corriente húmeda de aire y un material poroso de naturaleza higroscópica, aprovechando la diferencia en relaciones parciales del vapor de agua. Por tanto, la humedad del aire es extraída por adsorción de partículas de agua, produciendo una liberación de calor, que además de deshumidificar el aire, incrementa su temperatura. La desventaja del proceso de la rueda desecante es que eventualmente el material poroso usado se satura de agua, por lo cual debe ser regenerado de forma cíclica a fin de permitir una deshumidificación continua.

Se simularon tres variantes para esta tecnología. 1) Una rueda desecante convencional. 2) Una rueda desecante con un sistema de interenfriamiento de aire, a la salida de la rueda desecante. 3) Una rueda desecante con un enfriador evaporativo indirecto a la salida de la rueda desecante. Los detalles de cada modelo son presentados a continuación.

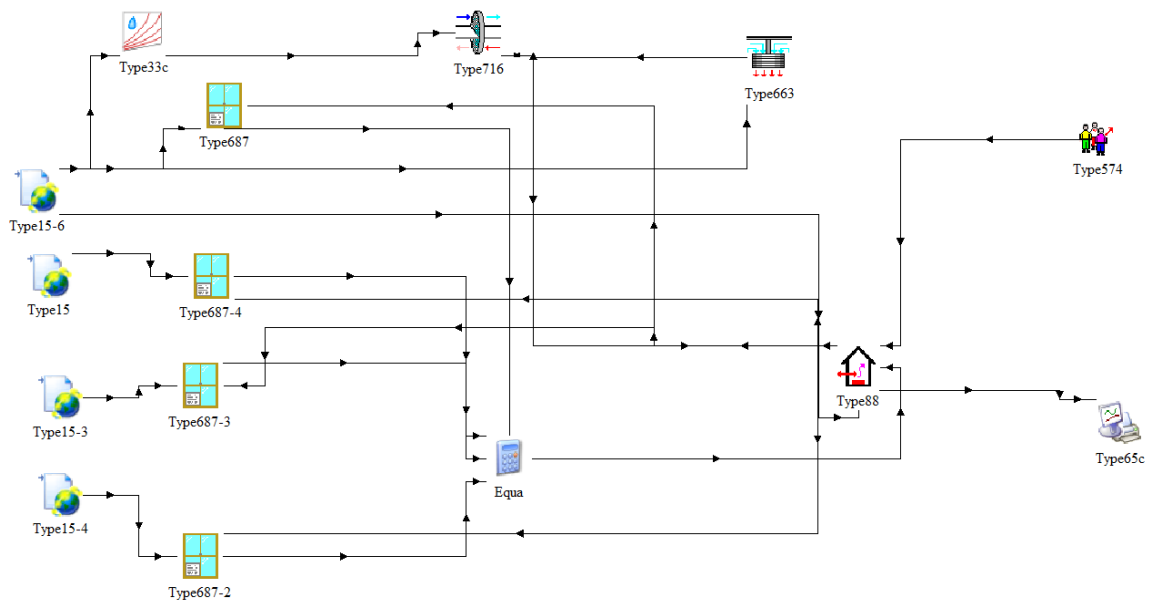


Ilustración 22 Diagrama de simulación para la rueda desecante sencilla

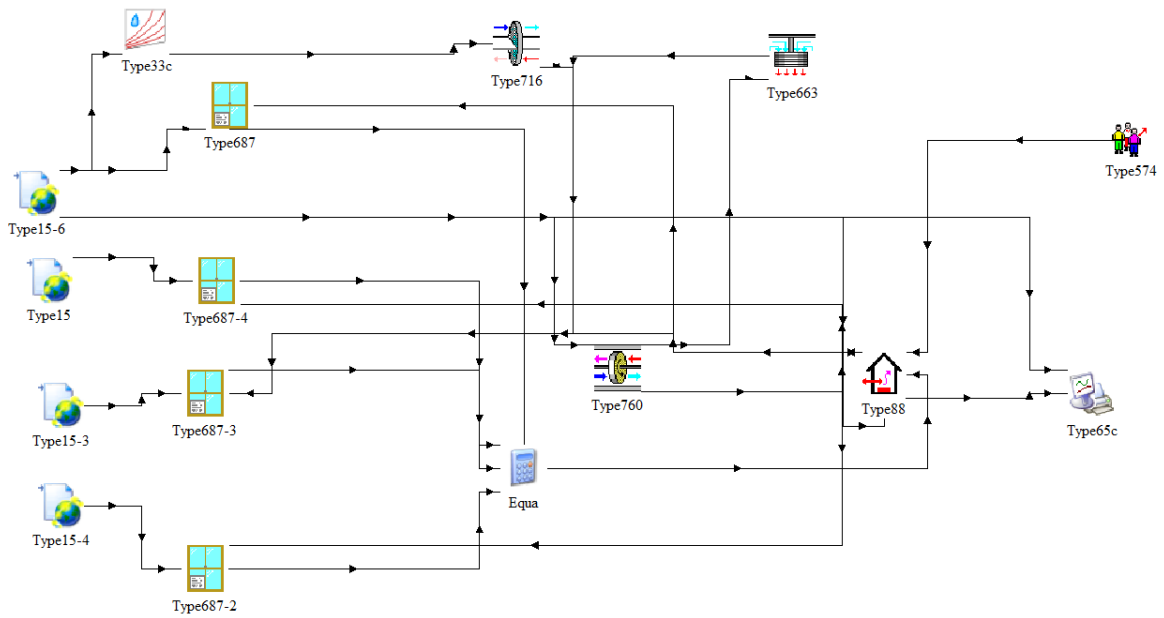


Ilustración 23 Diagrama de simulación para la rueda desecante con recuperación de calor

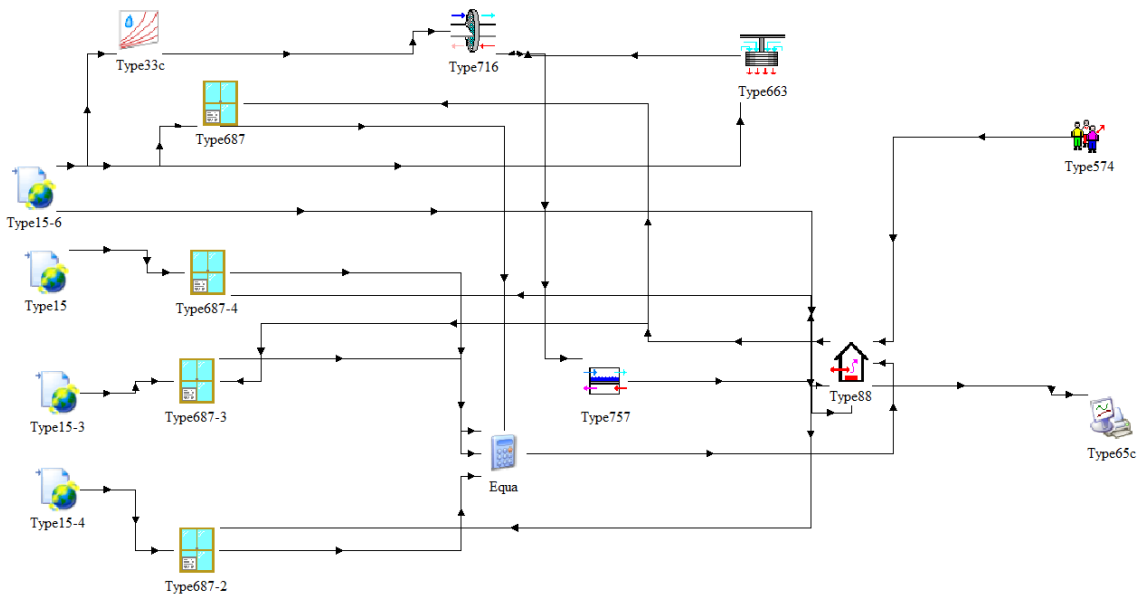


Ilustración 24 Diagrama de simulación con rueda desecante con enfriamiento evaporativo indirecto

Resultados de la Simulación

Los resultados de la distribución de temperatura y humedad absoluta son presentados a continuación.

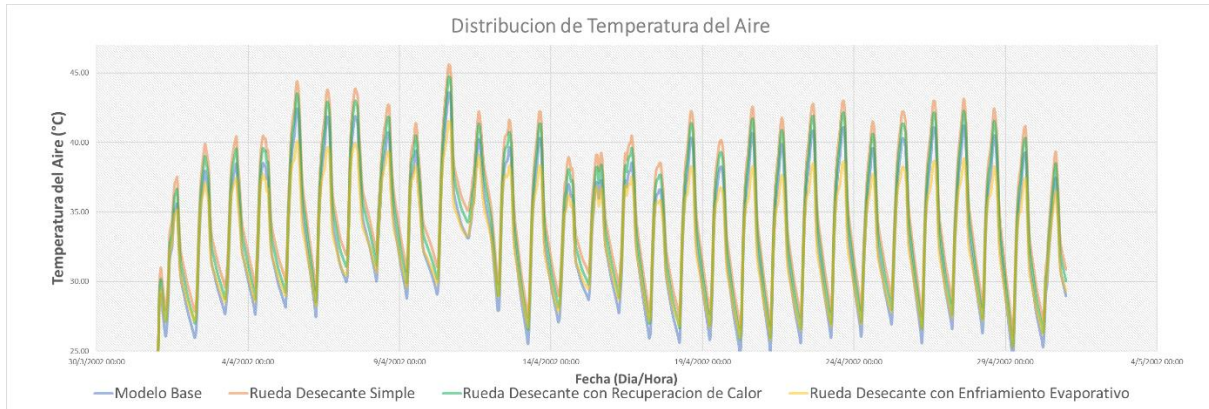


Ilustración 25 Comparación de distribución de temperatura para tres opciones de rueda desecante

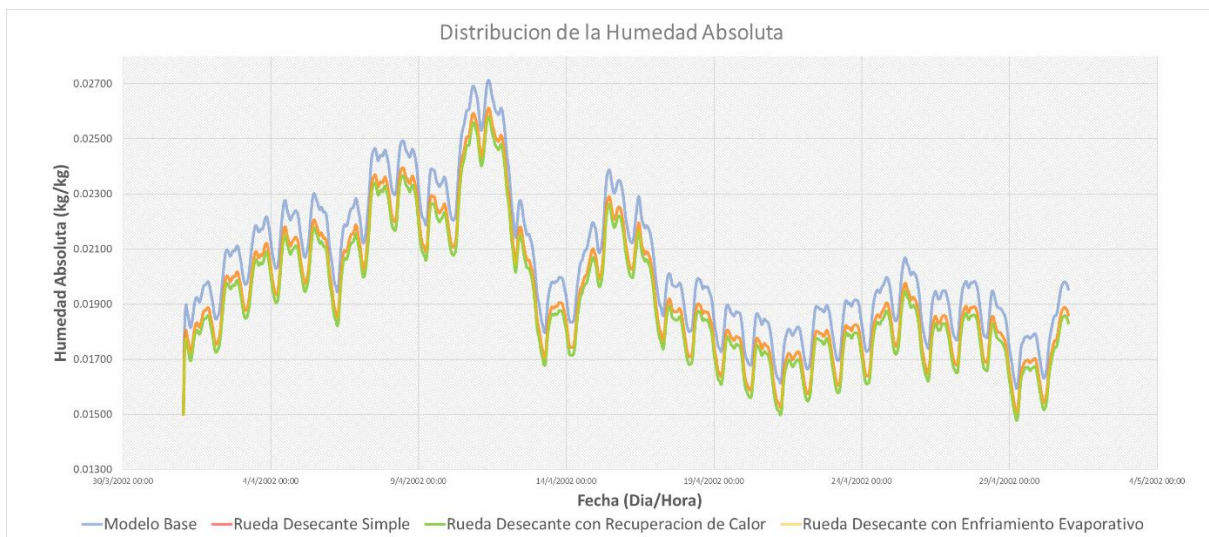


Ilustración 26 Comparación de la distribución de la humedad absoluta para tres opciones de rueda desecante

En la gráfica de distribución de temperatura, se observa que con las configuraciones 1, 2 y 3 se incrementan los picos de temperatura, en comparación con el caso base. El incremento de temperatura es más significativo para la configuración 1, rueda desecante convencional, como era de esperarse, al no incorporar un mecanismo de enfriamiento del aire después de la deshumidificación. La temperatura promedio obtenida es de 26.41°C para el caso base, 28.42°C para la rueda desecante convencional, 27.49°C para la rueda desecante con recuperación de calor y 26.85°C para la rueda desecante con enfriamiento evaporativo. Las temperaturas pico observadas son 38.91°C/15.55°C para el caso base, 41.06/17.34°C para la rueda desecante convencional, 40.09 °C/17.47 °C para la rueda desecante con recuperación de calor y 37.13 °C/16.81 °C para la rueda desecante con enfriamiento evaporativo.

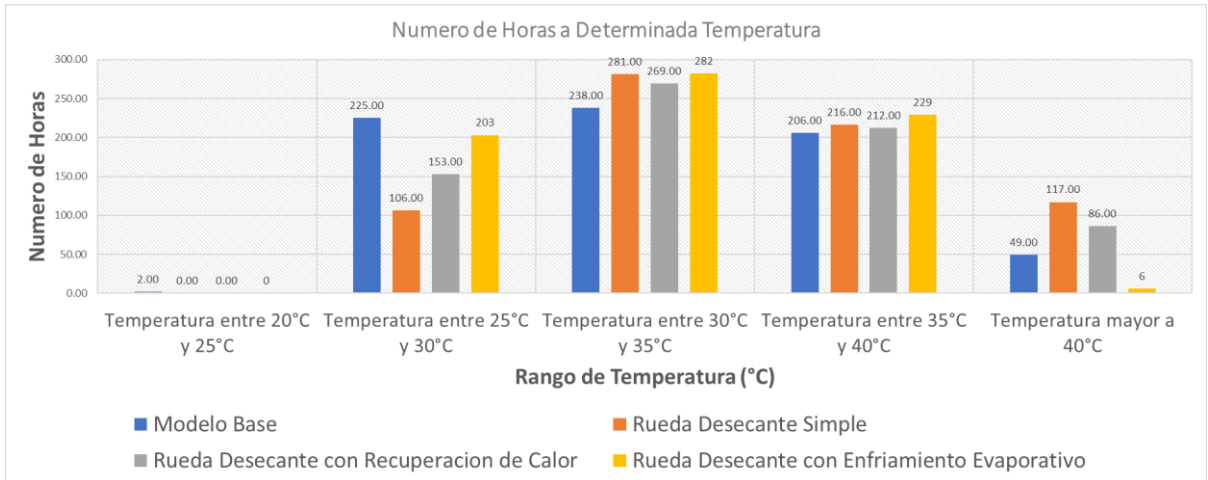


Ilustración 27 Comparación de número de horas a determinado rango de temperatura

La figura anterior permite visualizar la distribución de temperatura por rangos. La configuración con un mejor desempeño es el sistema de rueda desecante con enfriamiento evaporativo. Dicho sistema permite minimizar los picos de temperatura superiores a 40°C, manteniendo temperaturas entre 25°C y 40°C el resto del tiempo. Puede afirmarse que mejora el caso base en temperatura. El peor sistema, desde la perspectiva de la temperatura es la configuración de rueda desecante convencional, porque se observan más picos de temperatura arriba de 40°C que en el caso base. Por otro lado, la especialidad de las ruedas desecante, el control de humedad, queda de manifiesto en la figura siguiente, en la cual se visualiza que con las configuraciones simuladas, se obtiene muchas más horas a humedades bajas, en comparación con el caso base, cumpliéndose por lo tanto la expectativa. Puede afirmarse, entonces, que la configuración de rueda desecante con enfriamiento evaporativo presenta los mejores resultados, al reducir simultáneamente la temperatura y humedad del espacio habitado.

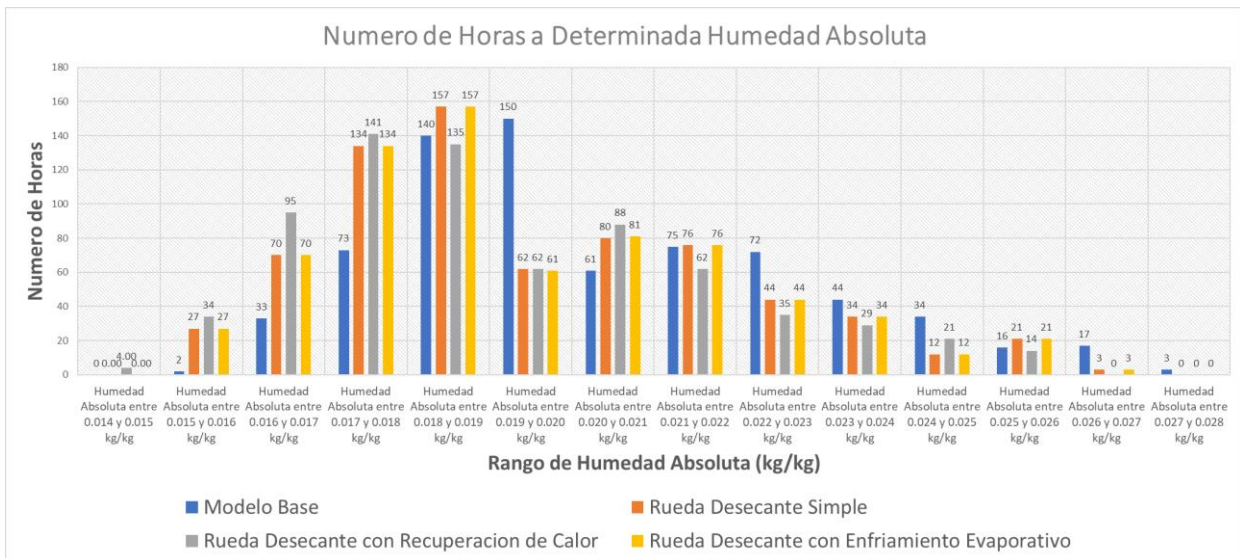


Ilustración 28 Comparación de horas a cierto rango de humedad absoluta

Análisis del Costo del Ciclo de Vida para Sistemas Desecantes Pasivos y Sistema AC Convencional

A partir de los resultados, puede observarse que el mejor rendimiento, en cuanto a sistemas pasivos de enfriamiento y deshumidificación se refiere, es el sistema de la rueda desecante con enfriamiento evaporativo. Este sistema mostró un buen desempeño, al disminuir la temperatura de salida del aire a la salida de la rueda desecante por debajo de los valores de temperatura promedio observados en el caso de control, así como también una capacidad considerable de deshumidificación para un rango amplio de humedades absolutas ambientales.

Con base en este comportamiento, se selecciona el sistema mencionado con el fin de pasar a la etapa de rendimiento económico. Para evaluar si este sistema ofrece alguna ventaja económica respecto a un sistema de aire acondicionado convencional, se realiza un análisis de costo del ciclo de vida de ambos sistemas. Para el análisis, se parte de las siguientes premisas:

- Se considera ambos sistemas por un periodo establecido de 15 años.
- La inversión inicial cubre los costos de adquisición e instalación, así como también fletes de importación y costo de repuestos.
- Se toma como parámetro una tasa interna de retorno (TIR) del 15%.
- Se asume que los costos de operación se incrementan en 5% anual, mientras que los costos de mantenimiento aumentan en 5% anual durante los primeros cinco años, en el 10% anual durante los siguientes cinco años, y en 15% anual durante los últimos cinco años.

Sistema de Aire Acondicionado

El sistema de aire acondicionado convencional incurre en un número considerable de gastos, principalmente debidos a la alta carga térmica del sitio, como también al valor de las unidades que se seleccionaron. Dado que se busca enfriar una carga térmica de 55 kW en un espacio residencial, se optó por sistemas tipo Mini Split. El inconveniente de estos sistemas es que las capacidades en las cuales se fabrican no son capaces de satisfacer la carga de diseño, por lo que se tomó la decisión de dividir la carga equitativamente en cuatro unidades de cuatro toneladas con un costo unitario de 4000 USD y un costo de mantenimiento de 100 USD anuales. Gráficamente, los resultados se ven de la siguiente manera:

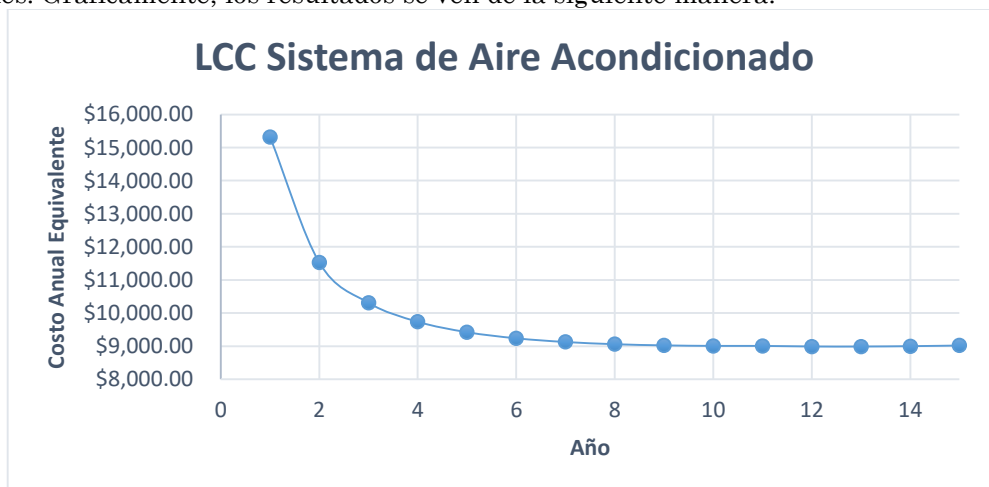


Ilustración 29 Análisis de costo de ciclo de vida de sistema de aire acondicionado convencional

Los resultados muestran que el mínimo de costos de operación y mantenimiento se da en el año 13, con un costo anual equivalente de 8989.52 USD, mientras que el costo presente total luego de 15 años es de 52,742.91 USD. Para este caso, los costos de operación son los que encarecen el sistema. El deterioro del sistema, particularmente del compresor, es usualmente el factor más determinante en cuanto a costos de operación y mantenimiento. En este caso, el compresor tiene un COP de 4.5, lo que representa un rendimiento medio. Este rendimiento irá a la baja a medida que los componentes mecánicos se deterioren por su operación cíclica, haciendo que consuma cada vez más energía eléctrica. Así, puede observarse que los costos de operación pasan de representar el 97.9 % del costo total en el año 1 al 96% del costo total en el año 15. Esto indica que a pesar de que los costos de mantenimiento suben (como es de esperarse), los de operación lo hacen a tal ritmo que no dejan de representar el costo más significativo durante la vida útil del sistema.

Sistema de Rueda Desecante con Enfriamiento Evaporativo Indirecto

La principal desventaja de este sistema en comparación con el sistema de aire acondicionado tradicional es su necesidad de incorporar muchos elementos, lo cual lo vuelve más difícil de acoplar e instalar. A pesar de que estos elementos pueden ser abaratados en la medida que se seleccionen equipos comerciales y no equipos hechos a la medida, de igual forma se necesitara acoplarlos de forma coherente para poder garantizar los resultados deseados. Estos equipos incluyen ventiladores de tiro inducido para minimizar las pérdidas de presión, un motor eléctrico para hacer girar la rueda, una unidad de enfriamiento evaporativo indirecto, la rueda desecante (que, en este caso, se considera impresa en 3D con los materiales de impresión tradicionales) y un sistema de ductos para manejar el flujo de aire e integrar los demás elementos. Dado que no existe un precedente de un sistema como el que se plantea, se ha estimado un total de 5000 USD para cubrir los gastos de adquisición, acoplamiento e instalación del sistema. Gráficamente, los resultados se ven de la siguiente manera:



Ilustración 30 Análisis del costo de ciclo de vida del sistema de rueda desecante con enfriamiento evaporativo

En este caso, los resultados muestran que el sistema llega a su costo mínimo en el año 9, con un costo anual equivalente de 2904.40 USD y un costo presente total de 17,230.36 USD, casi tres veces menos que un sistema de aire acondicionado convencional. En este caso, los costos

de operación representan la porción más significativa del costo total. Sin embargo, a diferencia del sistema de aire acondicionado, se puede notar que estos pasan de representar un 84.4 % en el año 1 a un 73 % en el año 15, una reducción porcentual 10 veces mayor que en el otro sistema. En este equipo, el sistema de ventiladores representa el 57 % del costo total operativo, el sistema de enfriamiento evaporativo el 20 %, y el motor eléctrico de la rueda desecante el 23 %. La ventaja de estos sistemas es su alta eficiencia, por lo cual el consumo energético, a pesar de aumentar con el deterioro de los sistemas, no se incrementa de manera significativa.

Conclusiones

El caso simulado de ventilación natural mostró que mediante la utilización de un Muro Trombe, se adquiere una buena capacidad de reducir la temperatura interna del edificio, alcanzando una reducción promedio de 4°C. Sin embargo, la aplicación de esta tecnología no tiene un efecto positivo en términos de humedad.

El uso de elementos de sombra para ventanas fue simulado y se obtuvo un resultado despreciable en reducción de temperatura y humedad. Aunque la ganancia de calor solar es una Fuente de calor importante, para las condiciones simuladas, en el mes más caliente del año, no se tradujo en una mejora significativa. El caso de análisis tiene cierta geometría y su conclusión no puede generalizarse para otras construcciones en las cuales el área de exposición es más significativa.

La tecnología de materiales de cambio de fase (PCM) mostró un buen desempeño, reduciendo los picos de temperatura al aumentar la masa térmica del edificio, aunque la temperatura promedio no fue reducida significativamente.

Se exploró también la tecnología de reducción de humedad con rueda desecante. Si se utiliza un sistema convencional de rueda desecante, se observa un importante aumento en temperatura, lo cual no es deseado. Por tanto, debe incorporarse un Sistema de enfriamiento pasivo que acompañe a la deshumidificación. La mejor combinación identificada fue el sistema de rueda desecante con enfriamiento evaporativo indirecto, alcanzando una moderada reducción en temperatura y una reducción significativa en humedad, en comparación con el caso base.

Al analizar el costo de ciclo de vida, se estima que el Sistema de rueda desecante con enfriamiento evaporativo indirecto cuesta un 33% menos de lo que cuesta un Sistema convencional de aire acondicionado, siendo, por lo tanto, una opción más económica a largo plazo para mejorar las condiciones de temperatura y humedad en espacios habitados.

4. Propuesta para futuras investigaciones

La investigación bibliográfica permitió identificar la diversidad de tecnologías de bajo consumo energético para el acondicionamiento de espacios habitados y las simulaciones realizadas, con sistemas seleccionados, arrojaron insumos interesantes sobre el desempeño esperado de los sistemas para las condiciones constructivas habitables y climáticas del país.

El componente final de la investigación consiste en una propuesta de arreglo experimental para investigar el desempeño real del sistema investigado con el mayor potencial de implementación: el sistema de rueda desecante con enfriamiento evaporativo indirecto. A continuación se presentan las consideraciones y resultados del proceso de diseño del arreglo

experimental, con fines de propuesta para una investigación posterior.

Descripción del espacio a acondicionar

El espacio seleccionado para llevar a cabo el diseño del sistema de enfriamiento y deshumidificación es un laboratorio del Departamento de Ciencias Energéticas de la universidad, el cual cuenta con dimensiones de 5.2 metros de ancho, 7.0 metros de largo y 2.7 metros de alto. A continuación, se presentan imágenes del laboratorio en cuestión:



Ilustración 31 Sitio de instalación del arreglo experimental, visto desde la entrada



Ilustración 32 Sitio de instalación del arreglo experimental, visto desde el interior hacia la entrada

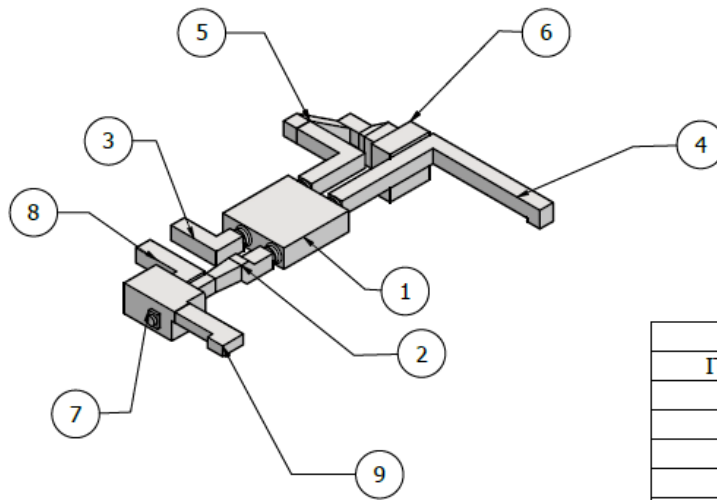
Para este espacio se realizó la simulación en DesignBuilder para estimar la carga térmica del espacio con 5 cambios de aire por hora, es decir 491.4 metros cúbicos por hora. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 2 Resultados de simulación de carga térmica

	Carga Térmica Total (kW)	Carga Sensible (kW)	Carga Latente (kW)
Laboratorio	9.50	5.63	3.87
Total	9.50	5.63	3.87

Componentes del sistema

El sistema de acondicionamiento de aire contará con distintos componentes para el cumplimiento de su objetivo, puntualmente, la rueda desecante, el recuperador de calor y el enfriador evaporativo. Además de estos componentes deberá contar con ventiladores y ductos.



PARTS LIST		
ITEM	QTY	PART NUMBER
1	1	Recuperador
2	1	Ducto Aire seco
3	1	Ducto Escape
4	1	Ducto Suministro
5	1	Ducto Aire humedo
6	1	Enfriador
7	1	Deshumidificador
8	1	Ducto Inlet
9	1	Ducto Regeneracion

Ilustración 33 Vista del sistema completo ensamblado

Rueda desecante

El primer componente es la rueda desecante, donde se lleva a cabo la deshumidificación del aire que será suministrado. Este componente es una rueda, a la cual se le inserta un material higroscópico que absorbe la humedad del aire cuando se hace pasar a través de ella, por lo que el aire sale con un menor contenido de humedad pero con una temperatura ligeramente mayor. Como consecuencia de la deshumidificación el material pierde gradualmente la capacidad de absorber más humedad, por lo que requiere ser regenerado. El proceso de regeneración consiste en hacer pasar aire a una temperatura alta para tener el fenómeno inverso, logrando que el agua contenida en el material se transfiera al aire caliente. Este componente se separa entonces en al menos dos secciones, una destinada a la deshumidificación y otra a la regeneración, a manera de garantizar el funcionamiento continuo del sistema.

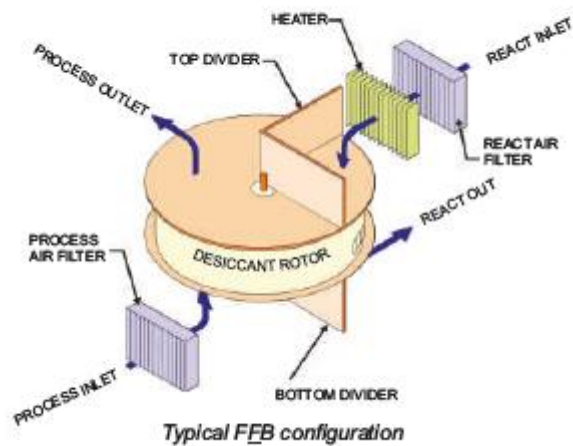


Ilustración 34 Configuración interna del deshumidificador



Ilustración 35 Deshumidificador Bry-Air modelo FFB

El sistema de deshumidificación seleccionado incorpora dentro de un solo equipo los distintos componentes necesarios para su funcionamiento, siendo estos la rueda desecante, el calentador de regeneración y los ventiladores para ambos flujos de aire. La marca seleccionada es Bry-air, con su modelo de deshumidificador FFB600, con una capacidad de flujo de 600 metros cúbicos por hora. A continuación, se muestran las especificaciones técnicas del equipo.

COMPACT DEHUMIDIFIER - FEB... SPECIFICATION

MODEL	PROCESS AIR FLOW CMH	PROCESS ESP (Pa.)	PROCESS MOTOR KW	REACT. AIR FLOW CMH	REACT. ESP (Pa.)	REACT. MOTOR KW	REACT. HEATER KW	POWER * REQD. (w/Hz.)	APPROX. WEIGHT Kg.
FEB170	170	120	0.1	57	100	0.1	2.3	230 /1/ 50	66
FEB300	300	200	0.1	100	100	0.1	3.6	230 /1/ 50	74
FEB600	600	200	0.37	200	150	0.37	7.2	415 /3/ 50	109
FEB1000	1000	200	0.75	333	150	0.75	12	415 /3/ 50	147
FEB1500	1500	250	1.5	500	150	0.75	18	415 /3/ 50	191
FEB2000	2000	250	1.5	667	150	0.75	24	415 /3/ 50	202
FEB3000	3000	250	2.2	1000	150	1.1	31.5	415 /3/ 50	235
FEB4500	4500	320	2.2	1400	249	1.1	42	415 /3/ 50	362

* Note:- Other voltage available are 200/220/240/380/440/480 VAC, 1Ph/3Ph, 50/60 Hz

Ilustración 36 Especificaciones técnicas del deshumidificador

Enfriador evaporativo

El enfriador evaporativo cuenta con una superficie con ciertas características geométricas que optimizan el intercambio de calor con el agua que corre sobre ella, por lo que de esta manera al entrar en contacto el aire con las pequeñas cantidades de agua ésta se evapora y el calor es absorbido por el aire.



Ilustración 37 Principio de funcionamiento del enfriador

Se seleccionó un enfriador de la marca Munters y modelo HM3 2000, que puede operar un flujo de hasta 2000 metros cúbicos por hora. Sin embargo, se considera que el flujo no superará los 600 metros cúbicos por hora, debido a las limitaciones dadas por el deshumidificador y porque las necesidades no son mayores a ese nivel.

Humimax™ HM3 Technical Specifications

HM3 Models		2000	5000	10000
Max humidifier air flow	[m ³ /h]	2000	5000	10000
Operating temp. dry/wet	[C°]	0-40/>0	0-40/>0	0-40/>0
Dimensions				
Depth with air deflector	[mm]	550	650	750
Depth	[mm]	350	350	350
Height	[mm]	775	1,275	1,275
Width	[mm]	730	730	1.330
Weight dry / wet	[kg]	37/45	57/66	86/107
Electrical data				
Rated voltage	[V/Hz]	230/50	230/50	230/50
Rated power	[W]	250	460	930
Rated current	[A]	1.8	2.6	4.1
Noise data				
LWA dB full speed		66	64	68
Suction-side noise levels: LwA measured as per ISO 13347/LpA measured with 1m distance to fan axis.				

Ilustración 38 Ficha técnica del enfriador evaporativo

Si bien en la figura solamente se menciona una frecuencia de 50 hz, el dispositivo cuenta con una versión que opera a 60 hz con voltaje de 120 V.

Recuperador de calor

El recuperador de calor no es más que un intercambiador de calor aire-aire, en donde el aire previamente deshumidificado transfiere calor al aire desechado del edificio después de que ha pasado por el enfriador evaporativo, que por lo tanto se encuentra a una menor temperatura.

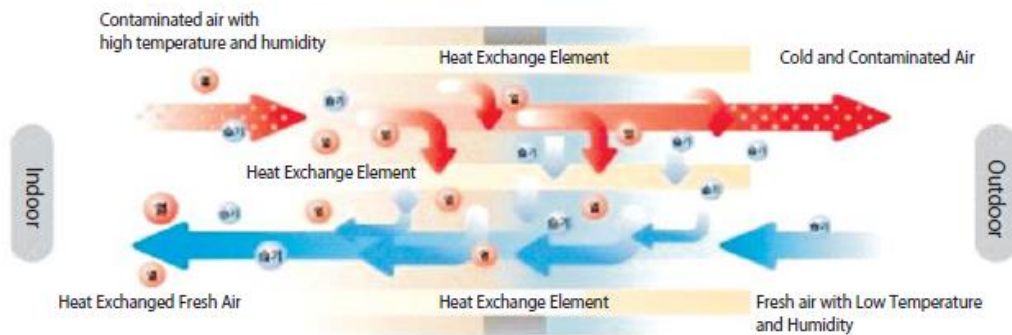


Ilustración 39 Configuración interna del recuperador de calor usado para calentar el aire de suministro



Ilustración 40 Recuperador de calor Samsung, modelo AN080JSKLN

El recuperador seleccionado es marca Samsung, modelo AN080JSKLN, con capacidad nominal de flujo de 800 metros cúbicos por hora, con dos ventiladores incorporados, para garantizar el flujo dentro del mismo.

■ AN080JSKLN

Power Source	220 - 240 V~, 50 / 60 Hz					
Ventilation Mode	Heat-Ex Ventilation			By-Pass Ventilation		
The Level of the Air Volume	Turbo	High	Low	Turbo	High	Low
Power Supply(W)	330	230	125	330	230	125
Air Volume(m ³ /h)	800	800	560	800	800	560
External Static Pressure(Pa)	155	90	80	155	90	80
Temperature Exchange Efficiency(%)	Cooling	70	70	74	-	-
	Heating	70	70	74	-	-
Enthalpy Exchange Efficiency(%)	Cooling	50	50	55	-	-
	Heating	70	70	76	-	-
Size(widthxheightxdepth)(mm)	1,220 × 340 × 1,135					
Weight(kg)	67					
Duct Size(mm)	250					
Trial Operation Conditions	1. Air Volume/ External Static Pressure, Comply with KS Heat Exhaust Ventilation System Standards(KS B6879). 2. Heat Exchange/Temperature Exchange Efficiency, Comply with regulations to promote high efficiency energy devices, [Cooling], Indoor(24°C DB/17°C WB), Outdoor(35°C DB/24°C WB) [Heating], Indoor(22°C DB/13.9°C WB), Outdoor(2°C DB/0.44°C WB)					

Ilustración 41 Especificaciones técnicas del recuperador de calor

Ductos

Los ductos servirán como el medio a través del cual se transporte el aire, por lo que deberán estar debidamente aislados, evitando que el aire de suministro gane temperatura al pasar a través del mismo.

Funcionamiento del sistema.

Habiendo descrito cada uno de los diferentes componentes del sistema y su correspondiente función, se puede ahora describir cómo operaría el sistema en su conjunto. La primera etapa del proceso es la deshumidificación del aire ambiente en la rueda desecante, donde su temperatura aumentará. El aire caliente y seco se dirige entonces al recuperador de calor, donde su temperatura se reduce al intercambiar calor con el aire proveniente del enfriador evaporativo. El aire que se extrae del espacio habitado se enfría evaporativamente y se envía al recuperador de calor, terminando aquí el proceso de acondicionamiento.

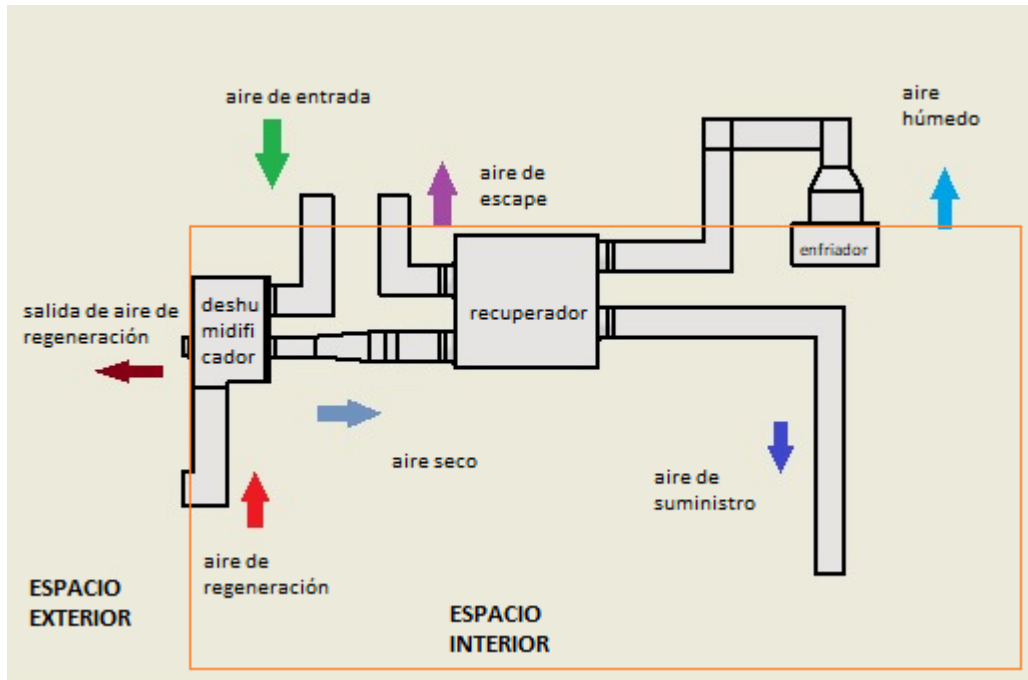


Ilustración 42 Esquema de flujo de aire en el sistema

Por otra parte, el proceso de regeneración aprovecha el aire que se extrae del espacio acondicionado, luego de que ha pasado por el recuperador, y se envía al calentador, con el fin de aumentar su temperatura a la temperatura de regeneración, haciéndose pasar por la región de la rueda que ya se ha saturado, para posteriormente ser desechado al ambiente exterior.

Presupuesto del arreglo experimental

El arreglo experimental diseñado y que se propone para una investigación a futuro, tendría un costo estimado descrito en la siguiente tabla.

Tabla 3 Presupuesto estimado del sistema

Costos estimados por componente	
Recuperador de calor Samsung AN080JSKLN	\$2,418.00
Enfriador Munters HM3 2000	\$494.00
Deshumidificador Bry Air FFB600	\$520.00
Ductos	\$260.00
Sensores de temperatura, flujo y humedad relativa	\$1,000.00
Equipo de cómputo para el monitoreo de variables	\$1,000.00
Costos de instalación	\$1,138.40
Total	\$6,830.40

Diseño de experimentos

La idea del arreglo experimental es servir como prototipo para el estudio de la tecnología más prometedora de climatización con bajo consumo de energía, determinada por la presente investigación. A continuación, se detallan los objetivos, parámetros y condiciones de experimentación sugeridas.

Objetivo del Experimento: Evaluar el desempeño energético, térmico y económico del prototipo, bajo condiciones reales.

Es importante confirmar los resultados de la simulación y obtener datos reales de desempeño del sistema. Para ello, deberá monitorearse los siguientes parámetros:

- Temperaturas de aire en los siguientes puntos del sistema: aire de entrada, aire de regeneración, aire de escape, aire seco, aire de suministro, aire húmedo.
- Humedad relativa del aire en los siguientes puntos del sistema: aire de entrada, aire de regeneración, aire de escape, aire seco, aire de suministro, aire húmedo.
- Temperatura y humedad relativa del aire del laboratorio.
- Consumo energético del deshumidificador, recuperador y enfriador.

Con dicha información sería posible determinar con precisión la viabilidad del sistema como un sustituto de un sistema convencional, y confirmarse los resultados de desempeño térmico, energético y económico obtenidos en la investigación.

Las condiciones experimentales sugeridas son:

- Condiciones climáticas de alta temperatura y humedad relativa, tales como las identificadas en el mes de junio, para la simulación.
- Condiciones de alta humedad, propias del invierno.
- Condiciones de temperatura media, en los meses de diciembre y enero.

Es posible analizar casos particulares, junto con una evaluación continua durante un periodo de un año, pudiendo obtener resultados que permitan un análisis más profundo y generar publicaciones académicas.

5. Discusión Final y Conclusiones

En la presente investigación se identificaron una diversidad de tecnologías para controlar la temperatura y la humedad con un bajo consumo de energía, con ventajas y desventajas en situaciones específicas de aplicación. Sin embargo, se concluyó que la forma más efectiva para lograr el resultado deseado, es decir aproximarnos al confort térmico en espacios habitables, es combinar tecnologías que controlen la humedad y temperatura por separado.

El desempeño de las tecnologías investigadas es altamente dependiente de las condiciones climáticas del lugar. Debe evaluarse, en cada caso particular, la viabilidad de una tecnología determinada o la combinación de tecnologías en tres dimensiones. En primer lugar, se debería estimar cuál es la reducción de temperatura y humedad que puede alcanzarse con la tecnología

apropiada para las condiciones del lugar. Además, se debe estimar el consumo energético requerido por dicha tecnología. Por último, el costo de ciclo de vida, el cual incluye la adquisición y operación del sistema durante su vida útil, determinará la viabilidad económica.

Seleccionamos y evaluamos, utilizando simulaciones, ciertas tecnologías con alto potencial de viabilidad en el contexto salvadoreño. En el caso de la tecnología de muro Trombe, se encontró que permite una reducción de 4°C en promedio, pero sin consecuencias en cuanto a la humedad. Las protecciones de ventana simuladas no presentaron una ventaja significativa en comparación con el caso base. Los materiales de cambio de fase (PCM) tienen un alto potencial para reducir los picos de temperatura, aunque la temperatura promedio no mejora significativamente.

Se probó además la tecnología de deshumidificación con rueda desecante. Esta tecnología, en su forma convencional, logra el objetivo de reducir la humedad, si bien a costa de un incremento no deseado en temperatura. Es necesario incorporar un sistema de enfriamiento pasivo para lograr el efecto combinado de control de temperatura y humedad. La opción más viable identificada consistió en una combinación de rueda desecante con enfriador evaporativo indirecto, logrando una reducción significativa en humedad y una reducción moderada en temperatura. Se determinó, además, que el costo de vida de este sistema es equivalente a un 33% del costo de un sistema convencional de enfriamiento con aire acondicionado.

Por lo tanto, consideramos que es viable implementar, con un presupuesto de investigación razonable, una prueba piloto del sistema más prometedor determinado por esta investigación, en los laboratorios de la UCA. La implementación propuesta de las tecnologías estudiadas, requiere la utilización de equipos y tecnologías existentes en el mercado, pero es su combinación, aplicada a nuestro contexto, lo que las vuelve innovadoras, constituyéndose en un ejemplo de transferencia de tecnología apropiada. Aunque en el diseño del arreglo experimental se seleccionó equipos y componentes disponibles en el mercado internacional, no se descarta que parte de los mismos puedan ser fabricados en el país. El equipo de investigación estima que es posible fabricar en su totalidad un sistema de este tipo, usando la capacidad instalada de los talleres de metal-mecánica nacionales.

La investigación buscaba identificar y evaluar tecnologías para la deshumidificación de espacios habitables, con un mínimo o nulo consumo de energía, para el contexto salvadoreño. Estas tecnologías son una alternativa de bajo costo a los sistemas de aire acondicionado, que están en creciente demanda y cuya operación implica altos niveles de emisiones contaminantes, además de altos costos de energía. Es especialmente importante identificar opciones de bajo costo para edificios residenciales ubicados en zonas cálidas y húmedas, pues sus usuarios generalmente no pueden costear la adquisición y operación de sistemas de climatización convencionales. Creemos que la presente investigación permite abrir nuevas posibilidades para un desarrollo tecnológico más pertinente, que dé respuesta a la problemática de brindar confort térmico a los habitantes de los edificios de manera sostenible.

Aunque la investigación concluye que, de las opciones disponibles, una de ellas es la más prometedora, no se descarta que, a futuro, otras combinaciones de sistemas sean también viables. Si bien en la etapa de simulaciones se limitaron las opciones a estudiar, el análisis podría expandirse a otras opciones y combinaciones de sistemas de enfriamiento y deshumidificación de bajo consumo de energía. Particularmente, no se descarta la combinación de un sistema de muro Trombe, con materiales PCM, en conjunto con el sistema de rueda desecante con enfriamiento indirecto evaporativo. Dichas tecnologías han dado resultados favorables, ya sea en reducción de picos, reducción de promedios de temperatura y humedad, por lo cual su combinación podría ser objeto de estudio y de interés en futuras investigaciones.

6. Referencias

- Aflaki, A., Mahyuddin, N., & Awad, Z. A. C. M. (2012). *Study on Efficiency of Passive Cooling Strategies on Thermal Comfort Attainment Within Tropical Climate*.
- Afonso, C. F. (2006). Recent advances in building air conditioning systems. *Applied Thermal Engineering*, 26(16), 1961-1971.
- ASHRAE (2019). *ASHRAE/ANSI Standard 55-2019 Thermal environmental conditions for human occupancy*. 2019, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, GA.
- Chen, X., Riffat, S., Bai, H., Zheng, X., & Reay, D. (2020). Recent progress in liquid desiccant dehumidification and air-conditioning: A review. *Energy and Built Environment*, 1(1), 106-130.
- Chua, K. J., Chou, S. K., Yang, W. M., & Yan, J. (2013). Achieving better energy-efficient air conditioning—a review of technologies and strategies. *Applied Energy*, 104, 87-104.
- Djongyang, N., Tchinda, R., & Njomo, D. (2010). Thermal comfort: A review paper. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(9), 2626-2640.
- El Loubani, M., Ghaddar, N., Ghali, K., & Itani, M. (2020). Hybrid cooling system integrating PCM-desiccant dehumidification and personal evaporative cooling for hot and humid climates. *Journal of Building Engineering*, 33, 101580.
- Fanger, P. O. (1967). Calculation of thermal comfort-introduction of a basic comfort equation. *ASHRAE Transactions*, 73.
- Geetha, N. B., & Velraj, R. (2012). Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage—A review. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 29(2), 913-946.
- Imbach, P., Chou, S. C., Lyra, A., Rodrigues, D., Rodriguez, D., Latinovic, D., ... & Georgiou, S. (2018). Future climate change scenarios in Central America at high spatial resolution. *PloS one*, 13(4), e0193570.
- Lan, L., Wargocki, P., & Lian, Z. (2011a). Quantitative measurement of productivity loss due to thermal discomfort. *Energy and Buildings*, 43(5), 1057-1062.
- Lan, L., Wargocki, P., Wyon, D. P., & Lian, Z. (2011b). Effects of thermal discomfort in an office on perceived air quality, SBS symptoms, physiological responses, and human performance. *Indoor air*, 21(5), 376-390.
- Martínez, L. A., Romero, C. M., Castellanos, F. A., Chávez, M. W., Flores, C. M., Rodríguez, L., ... & Ariza, R. I. (2018). Energy Simulation of Proposed Net Zero Energy Laboratory Building in Central America. In *2018 IEEE 38th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVIII)* (pp. 1-6). IEEE.
- Multiconsult y Cia. LTDA (2011). Informe final preliminar del estudio caracterización de la curva de demanda uso final de la energía para ser aplicados al desarrollo de proyectos de eficiencia energética, recuperado de:

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwixiaORzZzsAhWiwVkkHXIuBOMQFjAFegQIBBAC&url=http%3A%2F%2Festadisticas.cne.gob.sv%2Fwp-content%2Fuploads%2F2016%2F09%2FEstudio_Curva_Demanda.pdf&usg=AOvVaw1j3NtFr9pwtLo7wtk4Zus6

- Nussbaumer, P., Bazilian, M., & Modi, V. (2012). Measuring energy poverty: Focusing on what matters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 231-243.
- O'Connor, D., Calautit, J. K., & Hughes, B. R. (2016). A novel design of a desiccant rotary wheel for passive ventilation applications. *Applied Energy*, 179, 99-109.
- Omer, A. M. (2008). Renewable building energy systems and passive human comfort solutions. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(6), 1562-1587.
- Pauken, M. (1999). Sleeping soundly on summer nights: The first century of air conditioning. *ASHRAE journal*, 41(5), 40.
- Safizadeh, M. R., Morgenstern, A., Bongs, C., Henning, H. M., & Luther, J. (2016). Optimization of a heat assisted air-conditioning system comprising membrane and desiccant technologies for applications in tropical climates. *Energy*, 101, 52-64.
- Sartori, I., Napolitano, A., & Voss, K. (2012). Net zero energy buildings: A consistent definition framework. *Energy and buildings*, 48, 220-232.