

Simulación Dinámica y Estudio Comparativo de diferentes Configuraciones de Sistemas de Enfriamiento Evaporativo para Mexicali, México

Ricardo O. Gallegos¹, Nicolás L. Velázquez² y Aníbal L. Luna¹

Universidad Autónoma de Baja California, 1) Facultad de Arquitectura y Diseño, 2) Instituto de Ingeniería, Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal s/n Col. Insurgentes Este, Mexicali, B.C.-México (e-mail: rikrdo@uabc.mx nicolasvelazquez@uabc.mx anibal@uabc.mx)

Resumen

Se ha realizado el dimensionamiento y evaluación de diferentes configuraciones de sistemas de enfriamiento evaporativo para acondicionamiento de espacios en vivienda de tipo económico para Mexicali, México, mediante simulación con TRNSYS 16. Se analizan configuraciones que incluyen intercambiadores de calor, enfriadores evaporativos indirectos y unidades de desecante sólido. Los principales criterios para clasificar las distintas configuraciones fueron el confort térmico, el número de componentes y la eficiencia. Los resultados muestran que la configuración que incluye un intercambiador que pre-enfría el aire con el proveniente de la vivienda, es capaz de proporcionar condiciones de confort con el menor número de componentes, aunque en una pequeña fracción del tiempo durante el día no se satisfacen totalmente. Si se requiere satisfacer totalmente el confort, los sistemas con desecante sólido son la opción más adecuada.

Palabras clave: enfriamiento evaporativo, datos climatológicos, climatización, desecante sólido, simulación dinámica

Dynamic Simulation and Comparative Study of Several Systems of Evaporative Cooling for Mexicali, México

Abstract

The design and evaluation of several configurations of evaporative cooling systems for air conditioning of a dwelling for low-income sectors in Mexicali, Mexico using simulation with TRNSYS 16.A is presented in this paper. The configurations studied include direct as well as indirect evaporative cooling with heat exchange and also systems with solid desiccant. The main rating parameters to classify the different configurations are the internal comfort conditions, the efficiency and the number of required equipments. The results show that the best configuration is one that includes a heat exchanger that pre-cools the air inlet stream with a cooling stream delivered by air coming from the dwell, but there is a small fraction of the time during the day that comfort is not met. If thermal comfort is to be met during the whole day, solid desiccant systems are the best choice.

Keywords: evaporative cooling, climatic data, air conditioning, solid desiccant systems, dynamic simulation

INTRODUCCIÓN

En la ciudad de Mexicali, con un clima cálido extremo, el uso de aire acondicionado es una necesidad para el desarrollo de las actividades humanas. La obtención de confort térmico en las edificaciones es una meta tanto para diseñadores y constructores, como para los usuarios, ya que el consumo de energía eléctrica para aire acondicionado es elevado, con la consecuente merma en el poder adquisitivo de las familias. Se ha estimado que la demanda de electricidad para satisfacer los requerimientos de acondicionamiento de aire para el sector residencial son del orden de 103 MW, cuando una de las centrales geotermoeléctricas que abastecen a la ciudad (Cerro Prieto IV) tiene una capacidad de 100 MW (Gallegos et al., 2006). Los sistemas de refrigeración más usados en Mexicali son los de compresión mecánica de vapor, los cuales son altos consumidores de energía. Durante algún tiempo en la historia de la ciudad, se usaron de forma intensiva los sistemas de enfriamiento evaporativo, y aún se usan en ciertos sectores de la población. En 1995, la tercera parte de la población usaba sistemas de enfriamiento evaporativo (Sández, 1996).

Para conservar la simplicidad y bajo consumo de energía eléctrica de los sistemas de enfriamiento evaporativo y aprovechar todas sus ventajas, es posible obtener diferentes configuraciones, las cuales requieren ser estudiadas. En un estudio reciente, Heidarinejad et al. (2008), realizan la comparación de cinco esquemas de enfriamiento evaporativo directo, indirecto y combinado para diferentes condiciones climatológicas. Sin embargo, el indicador de la factibilidad de uso de cada sistema es la temperatura del aire a la salida del equipo, sin considerar el efecto en el edificio.

Los sistemas de enfriamiento evaporativo han sido estudiados y clasificados atendiendo a criterios termodinámicos: de eficiencia energética, mediante el valor de EER (energy efficiency rating) por Al-Juwayhel et al. (2004), análisis de exergía y COP (Yanjun et al., 2007). Estos criterios, si bien son necesarios para detectar los puntos del sistema donde existen oportunidades de mejora, o describir el uso que se le da a la energía primaria con que operan, no toman en cuenta la eficacia del sistema para cumplir con las condiciones de confort, bajo las diferentes condiciones climatológicas del lugar, lo cual resulta crítico cuando se tienen altas humedades.

En este trabajo se dimensiona y estudia el comportamiento operativo de los sistemas de enfriamiento evaporativo y se clasifican teniendo como criterio principal su aptitud para proporcionar condiciones de confort térmico, durante toda la temporada en que se requiere enfriamiento para la vivienda. La idea central es someter el aire que entra al equipo de enfriamiento evaporativo a procesos previos de secado e intercambios de calor para quitarle humedad y preenfriarlo, de tal forma que se obtenga una menor temperatura del aire que entra al espacio, no importando si se tiene una humedad alta en el ambiente. Es necesario conocer el comportamiento de los sistemas de enfriamiento evaporativo, atendiendo principalmente al criterio de eficacia para mantener condiciones de confort en los espacios y buscando la máxima eficiencia de operación con el mínimo de equipos, para reducir la inversión inicial y costo de operación.

Descripción de la edificación

La vivienda que se simuló térmicamente y fue acoplada a los sistemas de enfriamiento evaporativo, pertenece a lo que los organismos desarrolladores, financiadores y administradores de vivienda en México, han catalogado como vivienda económica, esto es, que no exceda en costo de 117 veces el salario mínimo del Distrito Federal (vsm) y está destinada a sectores de la sociedad de bajos recursos económicos, con salario de hasta 3.9 vsm.

El edificio simulado corresponde a un prototipo de vivienda que representa al 85%, de un fraccionamiento compuesto de 9,500 viviendas construidas entre 1995 y 2004 (UABC, 2006). El prototipo se consideró con orientación norte-sur, ya que la mayor parte del sembrado de vivienda corresponde a esta orientación. El área de enfriamiento a satisfacer es de 43 m², con un volumen de 107 m³. Cuenta con un espacio común (sala-comedor-cocina), una recámara y un baño, en una planta, como se muestra en la Fig. 1. Los materiales considerados en la construcción se muestran en la tabla 1.

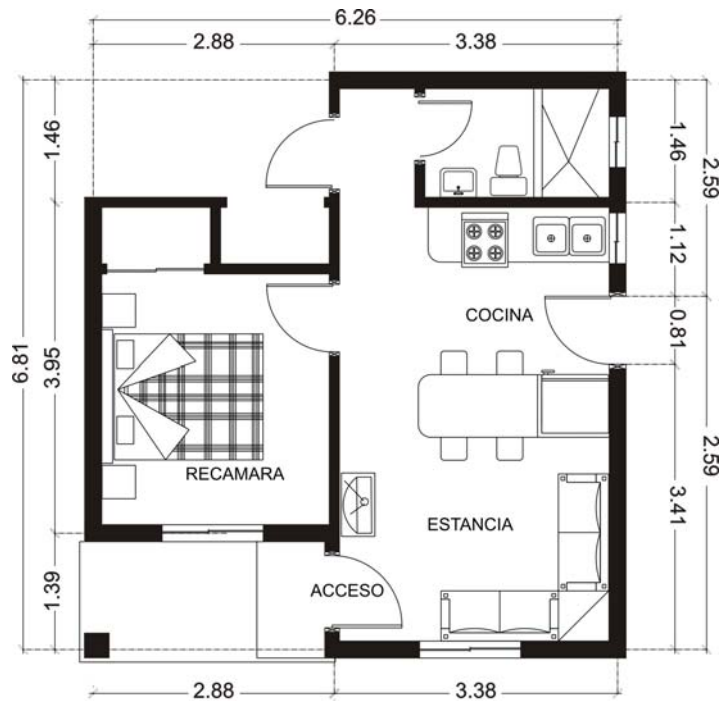


Fig. 1: Vista de planta de la vivienda en estudio.

Tabla 1: Materiales y sistemas constructivos de la vivienda en estudio.

| ELEMENTO | SISTEMA CONSTRUCTIVO | SUPERFICIE (m ²) |
|------------------|--|------------------------------|
| Techo | 0.015 m yeso interior, vigueta y bovedilla de 0.15 m | 43.00 |
| Piso | Concreto armado de 0.10 m | 43.00 |
| Fachada Norte | | |
| Muros exteriores | Block Hueco de concreto de 0.12 m | 20.96 |
| Fachada Sur | | |
| Muros exteriores | Block Hueco de concreto de 0.12 m | 17.1 |
| Ventanas | Corrediza marquetería de aluminio, vidrio sencillo | 2.68 |
| Fachada Este | | |
| Muros exteriores | Block Hueco de concreto de 0.12m | 23.34 |
| Ventanas | Corrediza marquetería de aluminio, vidrio sencillo | 0.94 |
| Puertas | Tipo tambor. | 1.70 |
| Fachada Oeste | | |
| Muros exteriores | Block Hueco de concreto de 0.12m | 19.74 |

Sistemas de enfriamiento evaporativo

Existen varias configuraciones de los sistemas de enfriamiento evaporativo, en este caso se estudian 17 diferentes opciones, entre las que se encuentran el enfriador evaporativo convencional (comúnmente llamado cooler), enfriador evaporativo con intercambiador de calor, enfriador evaporativo indirecto y enfriador evaporativo con desecante sólido regenerado con energía solar, entre otros que se enlistan a continuación.

1.- Enfriador evaporativo convencional (1CI): Esta configuración, como se muestra en la Fig. 2, consiste únicamente en el enfriador evaporativo (EE) que inyecta aire a la casa.

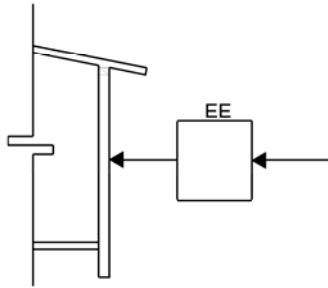


Fig. 2: Configuración con enfriador evaporativo convencional (1CI).

2.- Configuraciones de enfriador evaporativo con intercambiador calor: Estas opciones incorporan un intercambiador de calor (IC) para preenfriar la corriente de aire que llega al enfriador evaporativo (EE), la corriente fría del intercambiador de calor puede provenir de un enfriador evaporativo de retorno, que enfría aire proveniente de la casa, configuración 2HXCICR, o bien una corriente de aire proveniente de la casa sin enfriamiento evaporativo, configuración 2HXCI. La idea es proporcionar un aire más frío al enfriador evaporativo para que la temperatura de salida de éste sea menor. Bajo este mismo concepto, pero no introduciendo humedad adicional al espacio se propone la configuración 2HXCR, que mantiene el intercambiador de calor con aire del ambiente como corriente caliente y aire extraído de la casa y enfriado con un enfriador evaporativo como corriente fría. La salida de la corriente caliente se introduce directamente a la casa. Estas tres configuraciones se esquematizan en la Fig. 3.

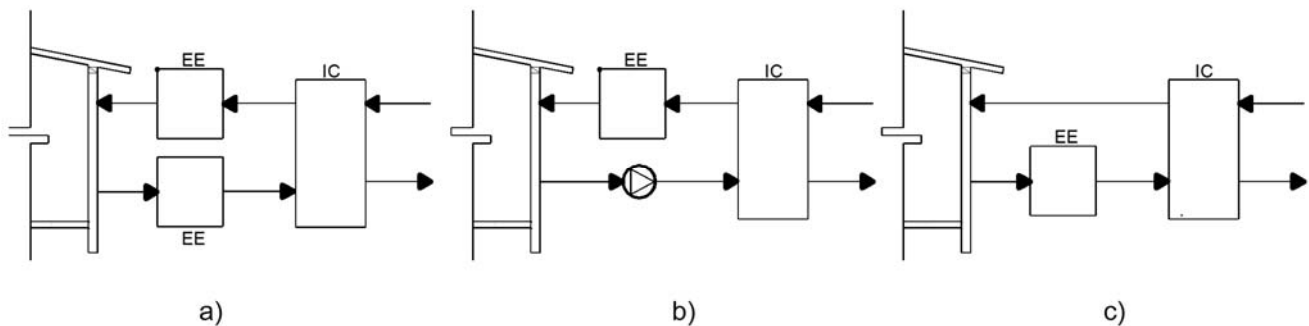


Fig. 3: Configuraciones de enfriamiento evaporativo con intercambiador de calor. a) 2HXCICR, b) 2HXCI y c) 2HXCR).

3.- Configuraciones que usan enfriamiento evaporativo indirecto. El enfriamiento evaporativo indirecto, consiste en someter el aire a enfriar (corriente primaria) a un intercambio de calor sin contacto físico con una corriente de aire (secundaria) que está siendo enfriada por enfriamiento evaporativo. Ambos procesos, el de intercambio de calor y el de enfriamiento evaporativo se llevan a cabo en el mismo equipo. La ventaja de estos sistemas es que aprovechan el abatimiento de temperatura que proporciona el enfriamiento evaporativo, pero no introducen humedad adicional a los espacios a acondicionar. La configuración 3EI (Fig. 4a) consiste en un enfriador evaporativo indirecto en el que la corriente primaria se toma del ambiente y la corriente secundaria del aire extraído de la casa. Las siguientes alternativas incorporan un intercambiador de calor (HX) antes del enfriador evaporativo indirecto, con la idea de preenfriar el aire y obtener temperaturas menores al ser inyectado al espacio. La alternativa 3EIHXSCH (Fig. 4b) toma aire del exterior, lo preenfía en un intercambiador de calor, en el que la corriente fría la constituye la corriente secundaria del enfriador evaporativo indirecto, y ya preenfriado se introduce como corriente primaria al enfriador evaporativo indirecto, después del cual entra a la vivienda. La corriente secundaria es aire que proviene del espacio. En la alternativa 3EIHXSAA (Fig. 4c) la corriente secundaria del enfriador evaporativo indirecto proviene del ambiente y retorna a él una vez que intercambia energía con la corriente primaria. La alternativa 3EIHXSAH (Fig. 4d) es similar a la anteriormente descrita, pero la corriente secundaria después del enfriador evaporativo indirecto, se introduce al intercambiador de calor. La Fig. 4e) representa la configuración 3EIHXCRSAA. En ella, la corriente secundaria del enfriador evaporativo se toma del ambiente y regresa a él y la corriente fría del intercambiador de calor proviene de una corriente de aire que se toma de la vivienda y se enfría con un enfriador evaporativo.

Estas configuraciones se proponen para buscar un nivel óptimo de preenfriamiento en la corriente primaria y sus esquemas se muestra en la Fig. 4.

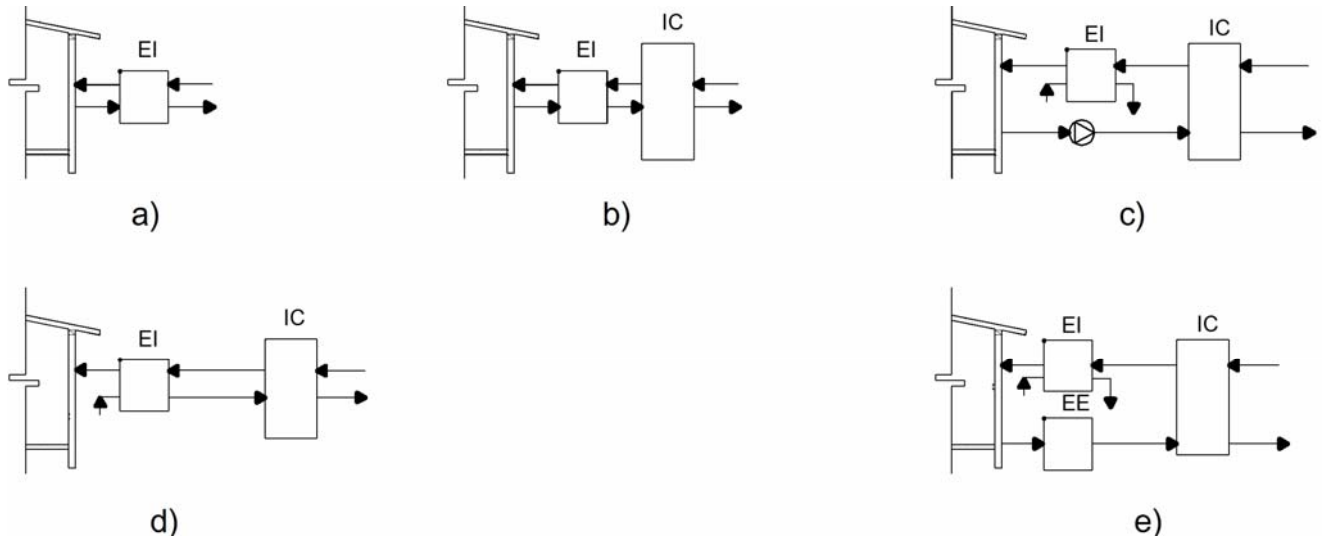


Fig. 4: Configuraciones de enfriamiento evaporativo indirecto. a) 3EI, b) 3EIHXSCH, c) 3EIHXSA, d) 3EIHXSAH y e) 3EIHXCRSA.

4.- Configuraciones con sistema desecante sólido. Previendo que en épocas en que el aire del ambiente sea muy húmedo, la eficacia del enfriamiento evaporativo disminuya por haber una menor posibilidad de abatimiento de temperatura, se incluye en las propuestas anteriores un sistema previo de desecante sólido (también puede ser líquido). En todos los casos la regeneración del desecante se lleva a cabo mediante un calentador de aire del ambiente que utiliza agua proveniente de un sistema solar de calentamiento. Estas configuraciones, después del sistema desecante, son equivalentes a las anteriormente descritas y se muestran en la Fig. 5. La alternativa 2RHXCICR que incluye un sistema de desecante sólido con su parte regenerativa, un intercambiador de calor y los enfriadores evaporativos de inyección y retorno, equivale al llamado ciclo Pennington (Lamp y Ziegler, 1998). En el caso de los sistemas estudiados el aire necesario para la regeneración se toma del ambiente, en lugar de tomar el aire que viene del intercambiador de calor. En simulaciones previas se observó que para el clima de Mexicali esta configuración es mejor ya que el aire llega menos húmedo.

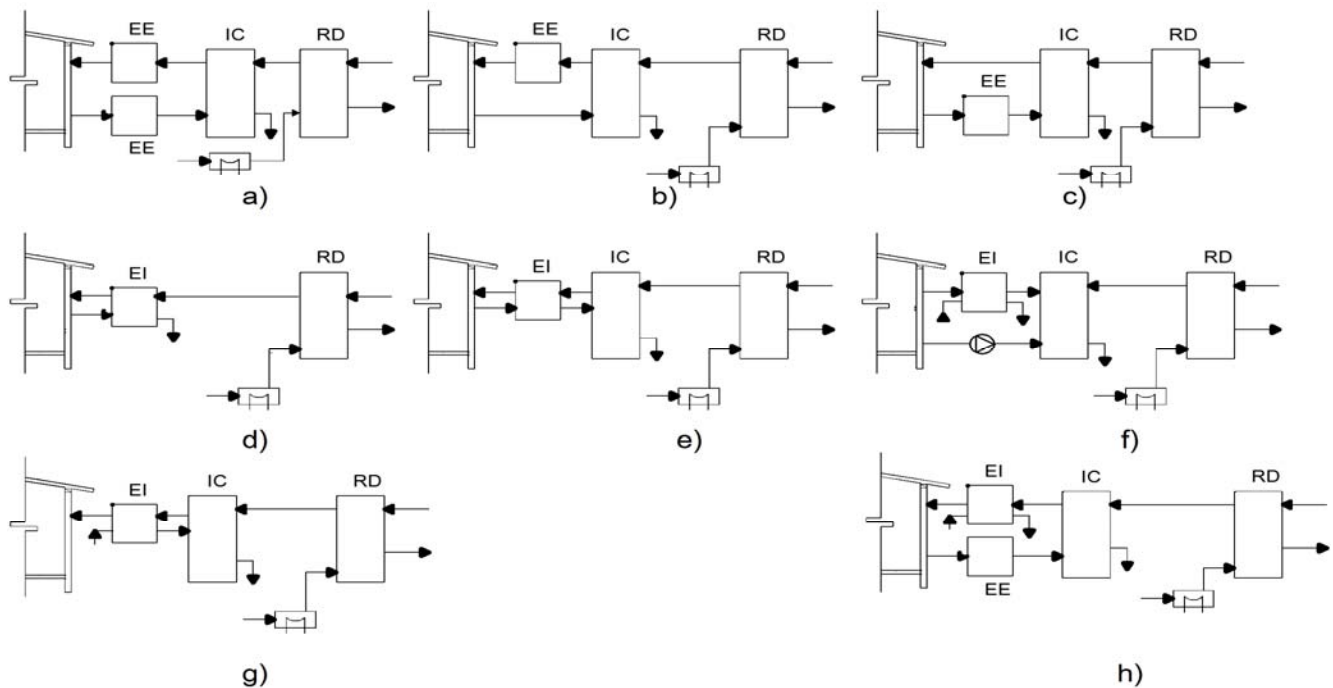


Fig. 5: Configuraciones de enfriamiento evaporativo con sistema desecante sólido, a) 2RHXCICRR, b) 2RHXCICR, c) 2RHXCICR, d) 3REI, e) 3REIHXSCH, f) 3REIHXSA, g) 3REIHXSAH y h) 3REIHXCRSA.

METODOLOGÍA

El dimensionamiento, estudio operativo y evaluación de las configuraciones del enfriamiento evaporativo, se realiza mediante la simulación con TRNSYS 16. Los criterios de jerarquización de las alternativas son: la aptitud del sistema, la eficiencia global como un indicador del costo de operación y el número de equipos necesarios como un indicador de la inversión inicial.

Para estimar la aptitud de un sistema de acondicionamiento térmico de espacios, para satisfacer las condiciones de confort, se recurre al indicador de confort conocido como PMV (predicción del voto promedio por sus siglas en inglés), que agrupa las diferentes variables que intervienen en el balance térmico del cuerpo humano, tales como temperatura, humedad y velocidad del aire así como nivel de actividad y arropamiento de la persona en una escala de siete puntos establecidos en la norma ISO 7730 (ISO, 2005), según la tabla 2.

Tabla 2: Escala de percepciones de Confort térmico según ISO.

| Valor de PMV | Percepción |
|--------------|----------------------|
| +3 | Muy caliente |
| +2 | Caliente |
| +1 | Ligeramente caliente |
| 0 | Neutral |
| -1 | Ligeramente frío |
| -2 | Frío |
| -3 | Muy frío |

Se estableció como criterio de confort aceptable para la ciudad de Mexicali un valor de PMV entre -1 y 1 de acuerdo a la norma ISO 7730 (2005) sin embargo, un valor de PMV inferior a -1 si bien indica condiciones fuera de confort, estas condiciones de insatisfacción son por frío, lo que supone que el sistema de enfriamiento trabaja aceptablemente, por lo tanto el indicador de aptitud se da por el porcentaje de horas durante el periodo en que el PMV es menor de 1, inversamente, para el caso de un sistema de calefacción, la aptitud del sistema estaría dada por los valores de PMV mayores de -1. En ambos casos se toma la fracción del tiempo en la que ocurren estos valores, definiéndose así el indicador denominado como factor de aptitud.

La simulación dinámica de un sistema, requiere de programas que sean capaces de acoplar y resolver las diferentes ecuaciones algebraicas y diferenciales que lo modelan, teniendo la posibilidad de establecer cambios en algunos parámetros o variables y conocer su respuesta dinámica ante ellos. Uno de los simuladores mas versátiles es el conocido como TRNSYS, que es un simulador de estado dinámico, capaz de simular sistemas solares térmicos y fotovoltaicos, comportamiento térmico de edificaciones, sistemas de refrigeración, sistemas eólicos, de celdas de hidrógeno, etc. El simulador parte de archivos de datos meteorológicos tipo TMY (año típico meteorológico, por sus siglas en inglés). Para el caso de Mexicali, no se contaba con un archivo TMY, por lo que hubo la necesidad de construirlo de acuerdo al procedimiento recomendado por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos (NREL por sus siglas en inglés) (Marion,1995), a partir de datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional sintetizados según la metodología recomendada por Heard y Alpuche (2001).

Las cargas térmicas del edificio y su acoplamiento con el sistema de enfriamiento se simularon hora por hora durante la temporada calurosa del año (Mayo 1 a Octubre 31), con el módulo TYPE 56a de TRNSYS. Se incorporaron al módulo las cargas internas debidas a iluminación, equipo electrodoméstico y habitantes. Se consideró una infiltración natural de 1.6 cambios de aire por hora y el efecto del sistema de enfriamiento se modeló considerando una corriente proveniente del enfriador evaporativo. Se incluyó al módulo el cálculo de PMV, como indicador de confort, con una actividad metabólica para cada una de cuatro personas de 1.2 met y un factor de arropamiento de 0.6 clo.

Se realizaron simulaciones para todo el periodo con necesidades de enfriamiento de manera horaria, y a partir de los resultados de las simulaciones se calculó la aptitud del sistema, la temperatura de la vivienda, el calor extraído de la corriente de aire de inyección, el calor extraído de la vivienda, entre otros. Para fines comparativos, el flujo de aire a través de los sistemas de enfriamiento evaporativo es el mismo en todos los casos. Asimismo, no se incluyó ningún tipo de control en los sistemas simulados, ni automático, ni por parte del usuario, con la idea de probar la aptitud de cada sistema por sí misma, en el entendido de que cualquier situación de desconfort por frío puede evitarse no usando el sistema o mediante control automático.

El dimensionamiento del equipo de enfriamiento evaporativo consiste básicamente en determinar el flujo másico que debe pasar por él, para satisfacer una cierta carga térmica con una diferencia de temperaturas disponible entre la temperatura a la salida y la temperatura deseada en el espacio. La temperatura de salida depende de las condiciones ambientales y de la eficiencia adiabática de enfriamiento. Las ecuaciones que determinan estos valores se muestran a continuación (Kreider et al., 2002).

Temperatura de salida:

$$T_o = T_{bs} - \eta(T_{bs} - T_{sat}) \quad (1)$$

Flujo másico del equipo:

$$\dot{m} = \frac{Q}{C_p(T_d - T_o)} \quad (2)$$

La eficiencia del sistema, que indirectamente es un indicador del costo de operación, se da en en todos los casos en términos del coeficiente de desempeño global (COP), en términos del enfriamiento producido en la vivienda (Q_v).

$$COP = \frac{Q_v}{\sum \text{Energía requerida}} \quad (3)$$

La energía necesaria para producir el efecto refrigerante, es la energía eléctrica necesaria para operar las bombas y ventiladores de los enfriadores evaporativos, los sistemas rotatorios del intercambiador de calor y la rueda desecante, el ventilador para la corriente de regeneración del desecante y la energía térmica necesaria para ese proceso. Es importante señalar que algunos investigadores en el caso de sistemas con desecante calculan el COP como la cantidad de energía retirada del aire de entrada dividida entre la energía necesaria para regenerar el desecante (Esfandiari et al., 2006).

Para dimensionar el equipo, se partió de las condiciones de menor humedad del periodo, con esto se obtiene un valor de flujo mínimo a partir del cual se busca el dimensionamiento preciso, pues la diferencia entre la temperatura de bulbo seco y la de saturación es grande, haciendo que la temperatura de salida sea baja y por lo tanto el denominador en la ecuación 2 se hace mayor. A partir de este valor mínimo se hicieron simulaciones en el sistema de enfriamiento evaporativo (1CI) y se fue aumentando el valor del flujo másico, hasta que la aptitud del sistema no variara, estableciendo de esta forma el valor con el que se simularon todas las configuraciones, con el objeto de tener una comparación sobre la misma base. La metodología seguida se resume en la Fig. 6.

RESULTADOS

Un resumen de los datos meteorológicos obtenidos con el archivo típico creado para Mexicali, se muestra en la Fig. 7, el cual incluye los promedios, máximos y mínimos de temperatura y humedad. Se pueden apreciar temperaturas máximas de hasta 45°C. Respecto a la humedad relativa, aunque los promedios oscilan entre el 30 y 50 % en el año, existen en invierno humedades cercanas al 100

%, que se presentan de la noche a la madrugada, y en el verano se observan asimismo incrementos similares que se presentan por las mañana, hacia las 6 A.M. Las humedades relativas altas, mayores al 70% se dan solamente en 51 horas del periodo considerado.

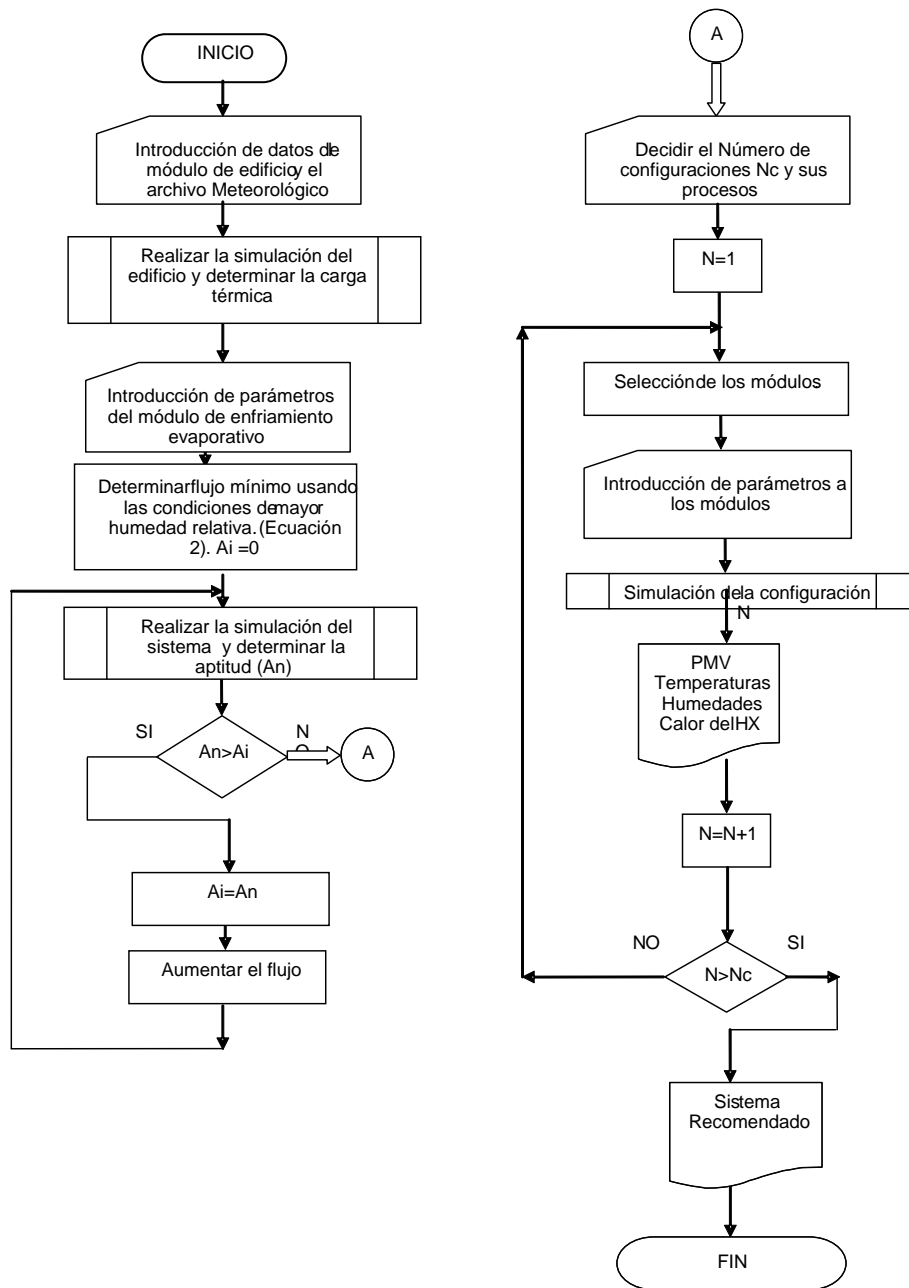


Fig. 6: Diagrama de Flujo de la metodología.

La carga térmica del edificio se determinó mediante una simulación con TRNSYS utilizando el mismo modelo de edificio, pero sin incluir sistemas de enfriamiento, resultando necesaria una potencia de extracción de calor de 2.81 KW para una temperatura de diseño interior de 25°C, con una extracción de calor total de 44.7 MJ. El flujo másico de los enfriadores evaporativos resultó de 5321 Kg/h.

Los resultados de las simulaciones en términos de aptitud del sistema, COP y número de equipos requeridos como criterios de jerarquización se muestran en la tabla 3. También se incluye el calor extraído de la vivienda (Q) y un indicador de si el sistema introduce humedad adicional a la vivienda. Con dichos resultados, los usuarios actuales de los sistemas de enfriamiento evaporativo, pueden ver qué modificaciones tienen que hacer, para mejorar energéticamente su sistema o aumentar sus

condiciones de confort. De la misma forma, los desarrolladores de vivienda nueva, pueden evaluar qué sistema les convendría más instalar. Cabe comentar que estos resultados dependen del clima de cada lugar, por lo que solo se podría extrapolar a otros lugares con climas similares al de Mexicali.

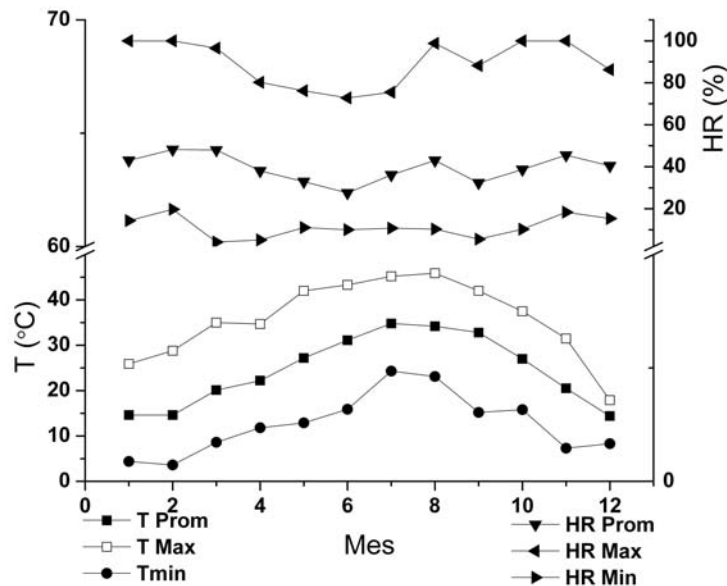


Fig. 7: Promedios, máximos y mínimos de temperatura y humedad relativa ambiental.

Tabla 3: Resultados de la simulación de configuraciones estudiadas.

| Configuración | Aptitud (%) | COP | Número de Equipos | Qv (MJ) | Introducción de Humedad |
|---------------|-------------|------|-------------------|---------|-------------------------|
| 1CI | 78.3 | 1.44 | 1 | 43.1 | SI |
| 2HXCICR | 99.4 | 1.34 | 3 | 58.3 | SI |
| 2HXCI | 93.8 | 0.97 | 2 | 61.8 | SI |
| 2HXCR | 73.2 | 1.28 | 2 | 28.9 | NO |
| 3EI | 70.4 | 1.14 | 1 | 30.0 | NO |
| 3EIHXSCH | 80.9 | 1.33 | 2 | 38.3 | NO |
| 3EIHXSAA | 66.2 | 1.11 | 2 | 33.2 | NO |
| 3EIHXSAH | 62.1 | 1.04 | 2 | 34.2 | NO |
| 3EIHXCRSAA | 82.0 | 1.43 | 2 | 31.6 | NO |
| 2RHXCICR | 100.0 | 1.42 | 5 | 39.7 | NO |
| 2RHXCI | 65.6 | 0.80 | 4 | 42.8 | NO |
| 2RHXCR | 61.0 | 0.89 | 4 | 33.1 | NO |
| 3REI | 66.3 | 0.84 | 3 | 31.3 | NO |
| 3REIHXSCH | 89.1 | 1.14 | 4 | 31.0 | NO |
| 3REIHXSAA | 59.1 | 0.83 | 4 | 30.8 | NO |
| 3REIHXSAH | 57.3 | 0.82 | 4 | 42.6 | NO |
| 3REIHXCRSAA | 84.8 | 1.10 | 4 | 41.3 | NO |

De acuerdo a los resultados de la tabla anterior, se puede establecer que el sistema que incorpora una unidad de desecante sólido, y un intercambiador de calor aire-aire con enfriador evaporativo en la inyección y en el retorno (2RHXCICR) cumple totalmente los requerimientos de confort, con una buena eficiencia, pero con la mayor inversión inicial. La siguiente opción a considerar, sería el sistema equivalente al anterior, pero sin unidad desecante (2HXCICR), la cual requiere un número menor de equipos con una eficiencia ligeramente más baja.

Estas opciones tienen el mayor potencial en las industrias, comercios, viviendas o lugares donde se tienen instalados sistemas de climatización con enfriadores evaporativos convencionales, ya que solo

se tendría que modificar un poco el sistema, agregándole los componentes faltantes, con lo cual aumentarían sus condiciones de confort.

Por otra parte, la configuración 2HXCI, que no incorpora unidad desecante y solamente tiene un enfriador evaporativo en la inyección, presenta una aptitud similar (5.6% menos) que la opción 2HXICR, con una eficiencia aceptable y menor inversión inicial que las anteriores configuraciones, pudiendo ser una muy buena opción sacrificando un poco el confort.

Teniendo presente la problemática de Mexicali, se considera que este sistema es el más promisorio para los sectores de la sociedad más desprotegidos, donde actualmente se tienen instalados enfriadores evaporativos y que con una pequeña inversión al incorporarles el intercambiador aire-aire mejorarían considerablemente sus condiciones de confort.

En la Fig. 8, se muestra el comportamiento del sistema de enfriamiento evaporativo con intercambio de calor en el periodo de interés, en términos del PMV en el interior de la vivienda, donde se compara el porcentaje del tiempo de operación en que la vivienda opera con un rango determinado de PMV, para el sistema con intercambiador de calor, contra el sistema de enfriamiento evaporativo convencional. Se observa que el PMV del sistema con intercambiador de calor, presenta un mayor porcentaje de horas con PMV negativo que el sistema convencional. Lo mismo se puede apreciar en el rango de confort (de -1 a 1), por lo que podemos concluir que el sistema con intercambio de calor tiene un mayor porcentaje de tiempo en niveles de PMV menores de cero, mientras que en el rango de 0 a 1 se tiene un menor porcentaje de tiempo. Sin embargo, en rangos de PMV mayores de 1 (disconfort por calor) el sistema con intercambio de calor tiene fracciones de tiempo mínimas, mientras que el sistema convencional presenta alrededor del 22% del tiempo. De esta forma se muestra como con la incorporación de un intercambiador aire-aire al enfriador evaporativo, se podría aumentar en 15.5% el tiempo con condiciones con confort en la vivienda de Mexicali.

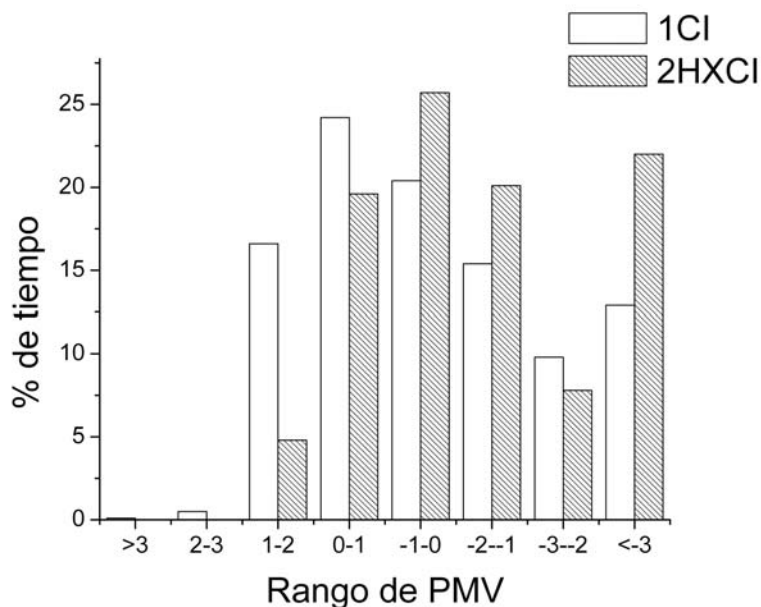


Fig. 8: Comparativo de la fracción de horas en que la vivienda se encuentra en rangos de PMV para los sistemas 1CI y 2HXCI.

Comparando el comportamiento operativo del sistema de enfriamiento evaporativo con intercambiador de calor con el sistema convencional, a nivel horario para un día típico del periodo, se obtienen los resultados que se muestran en la Fig. 9.

Se observa primeramente la temperatura en la vivienda para el sistema convencional varía entre los 24 y los 29 °C, mientras que para el sistema con intercambio de calor se mantiene entre los 23 y los 26 °C. En la misma gráfica se observa que el PMV para el sistema convencional se encuentra en valores mayores de 1 de las 8 a las 16 horas, mientras que para el sistema con intercambio de calor, durante todo el día se tienen condiciones de confort en la vivienda. Con esta información podemos

apreciar claramente como mejora o se logran mejores condiciones de confort con la incorporación del intercambiador aire-aire.

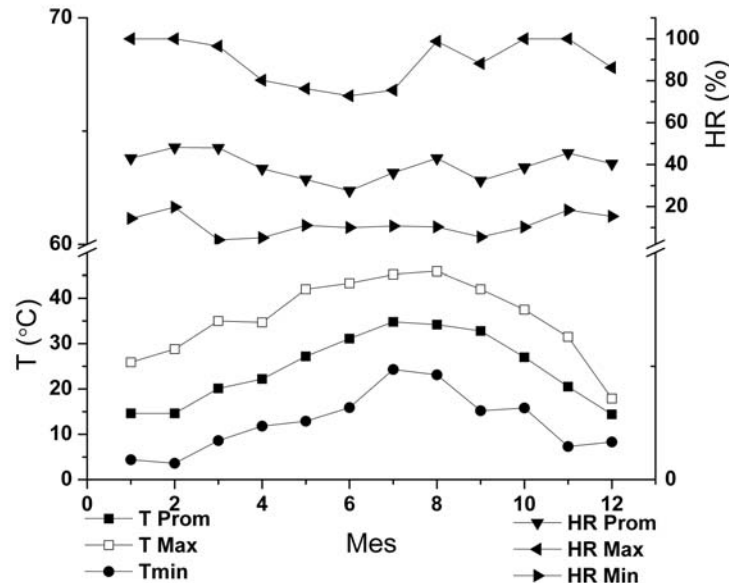


Fig. 9: Evolución horaria de la temperatura y PMV en el interior de la vivienda para el 22 de julio.

Para mostrar de una forma más clara, las ventajas de la incorporación de un intercambiador aire-aire a un enfriador evaporativo, en la Fig. 10 se representa en el diagrama psicrométrico la trayectoria del proceso para las 14:00 horas del 22 de Julio, tanto para el enfriamiento evaporativo convencional como para el enfriamiento evaporativo con intercambio de calor. El punto 1 corresponde al estado del aire ambiente, el proceso 1-2 representa el enfriamiento del aire ambiente en el intercambiador de calor y el proceso 2-3 se refiere al enfriamiento evaporativo. Al ingresar el aire del enfriador evaporativo a la vivienda, se mezcla con el aire del interior, Las condiciones del punto 4 son resultado por un lado la mezcla del aire del interior en la hora anterior de simulación con el aire que entra en las condiciones del punto 3; y por otro lado la carga térmica externa de la edificación. El aire del interior de la vivienda se toma para enfriar el aire de la corriente caliente del intercambiador de calor, pasando primero por un ventilador, que cambia ligeramente la temperatura del aire, como se muestra en el proceso 4-5. El proceso 5-6 representa la absorción de energía en la corriente fría del intercambiador de calor. En el proceso convencional, la línea 1-2' representa el enfriamiento evaporativo y el proceso 2'-3' representa la mezcla del aire de la salida del enfriador evaporativo con el aire del interior de la vivienda. Con lo anterior se puede observar claramente la ventaja de usar el intercambiador de calor, pues mientras en el enfriamiento evaporativo convencional la temperatura de la vivienda es de 29.6 °C, el sistema con intercambio de calor logra una temperatura interior de 25.6 °C, sin embargo, mientras más cercana es la temperatura del ambiente a la temperatura de la casa, existirá una menor diferencia de temperaturas entre la corriente fría y caliente del intercambiador de calor, por lo que el efecto de éste disminuirá o incluso puede invertirse si la temperatura de la vivienda es mayor que la temperatura ambiente. Este efecto se presenta solamente en el 1.4% de los casos, con humedad relativa alta, dado que el enfriador evaporativo dispone de un menor gradiente de humedad para llevar a cabo el enfriamiento adiabático. Es importante mencionar que aunque la simulación se realizó sin considerar ningún tipo de control automático o por parte del usuario, la adición de calor a la corriente de aire que entra a la vivienda o el enfriamiento por debajo de las condiciones de confort puede evitarse simplemente dejando de operar el sistema o incorporando un control automático.

Cuando el sistema no logra mantener valores de PMV menores o iguales a 1 (6.2% del tiempo según la tabla 3) es porque existe una humedad en el ambiente tan alta que el efecto del enfriamiento evaporativo disminuye o se anula o porque la corriente de enfriamiento del intercambiador de calor en realidad esta a mayor temperatura que la del aire ambiente.

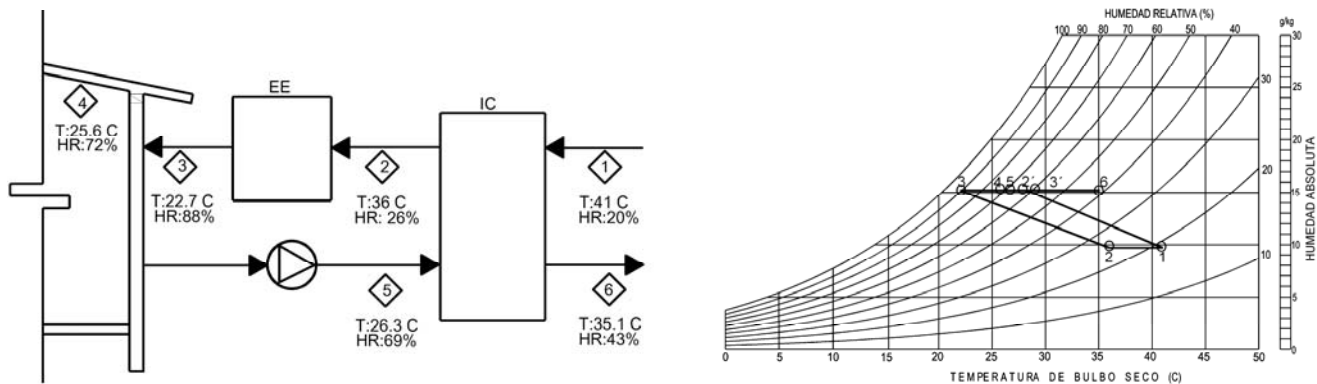


Fig. 10: Trayectoria de los procesos para las 14:00 horas del 22 de Julio.

En la Fig. 11, se presenta el calor retirado del aire en la corriente caliente del intercambiador de calor, de acuerdo a los rangos de humedad ambiente, se desglosa en cantidad de calor retirado máxima, mínima y promedio. La cantidad de calor mínima que se retira del aire es de 340 w a humedades menores de 60%. El calor extraído del aire decae con el aumento de humedad hasta el 70%, a partir de donde la cantidad de calor retirada se hace cero o negativa. La cantidad de calor máxima que se retira del aire es de 5.25 Kw y esto como se esperaba, se da cuando se tiene la humedad relativa más baja (de 10 a 20%). Se puede apreciar que es muy poco el tiempo donde el intercambiador de calor aire-aire no opera en modo de enfriamiento.

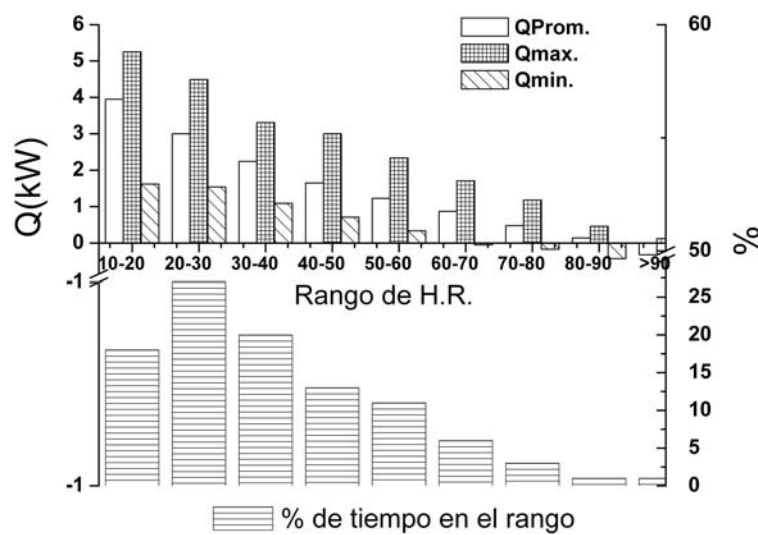


Fig. 11: Calor retirado del aire por rangos de humedad relativa y frecuencia.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en el estudio operativo riguroso, hora por hora durante toda la temporada con requerimientos de enfriamiento, de las diecisiete configuraciones estudiadas, las mejores opciones para el uso del enfriamiento evaporativo para el clima de Mexicali, atendiendo al criterio de un PMV menor de 1 (aptitud) son el ciclo de Pennington, seguido de un sistema con intercambiador de calor y enfriadores evaporativos de inyección y retorno y en tercer lugar la configuración que incluye un intercambiador de calor y un enfriador evaporativo de inyección solamente. Las tres alternativas comparadas con el enfriador evaporativo convencional, presentan mejoras sustanciales en las condiciones y permanencia de confort térmico de la vivienda.

Atendiendo al criterio de un menor número de equipos que disminuya la inversión inicial, la configuración más prometedora para la vivienda económica de Mexicali es la que incluye un

intercambiador de calor y un enfriador evaporativo de inyección, ya que la diferencia en la aptitud del sistema contra los dos primeros es mínima y requiere solo dos equipos. Pero hay que considerar que el intercambiador de calor es más eficiente mientras mayor sea la diferencia entre la temperatura ambiente y la de la habitación.

El intercambiador de calor incorporado puede no funcionar eficazmente cuando la humedad relativa del ambiente es mayor del 70 %, lo que sucede en el 1.2% del tiempo, y aun en estos casos si el usuario continúa operando el sistema, las condiciones de confort no se alteran negativamente pues el PMV continúa siendo menor de 1.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología su apoyo en forma de beca para la realización de estudios de doctorado del primer autor, así como el apoyo otorgado a los autores por el Programa de Estímulos al Personal Académico de la Universidad Autónoma de Baja California.

NOMENCLATURA

| | |
|-----------------|---|
| Cp | Calor específico del aire (J/kg K). |
| m | Flujo másico a través del enfriador evaporativo (kg/s). |
| Q | Carga térmica de la edificación (W). |
| Qv | Calor retirado de la vivienda (MJ) |
| T | Temperatura (°C). |
| Subíndices | |
| Bs | Bulbo seco. |
| o: | Salida. |
| sat: | Saturación |
| Letras Griegas: | |
| η | Eficiencia de saturación adiabática. |

REFERENCIAS

- Al-Juwayhel, F., H. El-Dessouky, H. Ettouney y M. Al-Qattan; *Experimental Evaluation of One, Two, and Three Stage Evaporative Cooling Systems*, Heat Transfer Engineering: 25(6), 72–86 (2004)
- Esfandiari, F., D. Van Passen y M. Saidi; *Modeling and simulation of desiccant wheel for air conditioning*. Energy and Buildings: 38(10), 1230-1239 (2006)
- Gallegos R., N. Velázquez, A. Luna y G. Bojórquez; *Limitations in the use of evaporative cooling for air conditioning in the hot arid climate of Mexicali Mexico*. Proceedings of the First Joint ANES-ASME Meeting (CD), Veracruz, México 2-6 de Octubre (2006)
- Heard, C. y G. Alpuche; *Análisis de datos climatológicos y cálculo de propiedades psicrométricas para el simulador DOE*. Memorias de la XXV Semana Nacional de Energía Solar, 33-37, San Luis Potosí, México 1 a 5 de Octubre (2001)
- Heidarinejad, G., M. Heidarinejad, S. Delfani y J. Esmaeelian; *Feasibility of using various kinds of cooling systems in a multi-climates country*, Energy and Buildings: 40(11), 1946-1953 (2008)
- Kreider, J., P. Curtiss y A. Rabi *Heating and Cooling of Buildings*. Segunda edición, Mc Graw Hill, Nueva York, USA (2002)
- ISO: International Standard 7730:2005(E), Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Third Edition 2-41, Génova, Suiza (2005)
- Lamp, P. y F. Ziegler, *European research on solar-assisted air conditioning*, International Journal of Refrigeration: 21(22), 89-99 (1998)

Marion, W. y K. Urban; *User's manual for TMY2* National Renewable Energy Laboratory (1995) <http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/tmy2/overview.html>. Acceso:22 Octubre 2007.

Sández, A., *Contexto de la política tarifaria residencial del sector eléctrico y estimación de la función consumo eléctrico residencial: el caso de Mexicali, Baja California (1990-1992)*, Estudios Fronterizos: No23, 23-38 (1996)

UABC; *Confort térmico y ahorro de energía en la vivienda económica en México, regiones clima cálido seco y cálido húmedo*. Proyecto CONACYT CONAFOVI 2004-01-20. Reporte de proyecto (2006)

Yanjun,D., G. Tianshu, L. Yong y W. Ruzhu; *Development of a novel two-stage solar desiccant cooling system driven by solar air collector*. 2nd International Conference Solar Air-Conditioning Tarragona, España 18-19 de Octubre (2007)