

CONTROL DE LA VENTILACIÓN PASIVA PARA ENFRIAMIENTO

Passive ventilation control for cooling

JUAN PEDRO AYALA
IRENE MARINCIC LOVRIHA
Universidad de Sonora

Recibido: 02 de diciembre de 2016. Aceptado: 18 de julio de 2017.

RESUMEN

El objetivo de este artículo es mostrar el proceso de creación de un modelo de predicción para el control de los dispositivos de ventilación pasiva en un clima cálido seco que, mediante un control manual adecuado de los sistemas de ventilación pasiva, logrará una temperatura menor comparada con la temperatura en ausencia de ventilación en temporada de transición. Este artículo deriva de una investigación realizada en el Posgrado en Humanidades en la Universidad de Sonora. Los conceptos principales son predicción y control: la predicción es la clave del control e, incluso, de la modificación del curso de los acontecimientos. Se utilizó el método de regresión lineal, uno de los métodos de predicción científica más utilizado debido a la amplitud de su adaptabilidad, el cual consiste en un análisis estadístico para estudiar la relación entre variables. El modelo matemático se enfoca en la predicción de temperaturas interiores con base en temperaturas exteriores. Se desarrolló a partir de la caracterización, por medio de mediciones, del comportamiento térmico de la vivienda estudiada y de las características del clima local. Mediante la correlación lineal y múltiple se desarrollaron fórmulas para predecir la temperatura interior horaria con base

en las variables más significativas del exterior. La metodología seguida en esta investigación puede utilizarse para estudios y futura aplicación con el objetivo de lograr un ahorro energético. Esta investigación tiene la particularidad que fue realizada en clima cálido seco en un modelo de vivienda de tamaño real, por lo que puede ser útil para desarrolladores e investigadores.

Palabras clave: predicción temperaturas; modelo matemático; control; ventilación pasiva.

ABSTRACT

The aim of this paper is to show the process of creating a prediction model for the control of passive ventilation system in a hot dry climate. The paper shows that, by the right manual control of passive ventilation systems, a lower indoor temperature can be achieved, compared with the temperature without ventilation, during transition seasons. The investigation was carried out in the frame of postgraduate studies at the University of Sonora. The main concepts are prediction and control. The prediction is the key of the control, even it can change the course of the events. A linear regression method was used, which is one of the most used scientific prediction me-

thods due to its adaptability. This method is a statistical analysis for estimating the relationships among variables. The mathematical model focuses on predicting indoor temperatures, based on outdoor temperatures. It was developed starting from the characterization, by measurements, of the thermal behavior of the dwelling studied, and of the local climate characteristics. By linear and multiple correlation, formulas were developed to predict the hourly interior temperature, based on the most relevant exterior variables. The methodology followed in this research can be used for other studies and future applications with energy savings purposes. This research has the particularity that was carried out in a hot dry climate and in a full scale housing prototype. Because of this, it can be useful for housing developers and researchers.

Key words: temperature prediction; mathematical model; control; passive ventilation.

1. INTRODUCCIÓN

Este estudio se llevó a cabo en una zona de clima extremo, donde las temperaturas suben tanto que el bienestar físico de los seres humanos puede verse afectado. Con el desarrollo de la tecnología, la humanidad ha logrado vencer estos obstáculos y resolver, aparentemente de forma fácil, el problema con climatización artificial; pero esta facilidad ha implicado un aumento importante en el consumo de energía. Además, este incremento conlleva la necesidad de una mayor infraestructura para su producción y distribución, lo que ocasiona un grave problema económico y ambiental. Con el consumismo que promueve soluciones fáciles y la arbitrariedad en la edificación y el desarrollo urbano, se ha dejado de lado la utilidad de la arquitectura pasiva, que quizá no resuelva el problema completamente, pero puede ayudar a aminorarlo.

Las altas temperaturas se presentan predominantemente durante el verano y las épocas de transición (primavera y otoño), que aunque son cálidas, no son tan extremas. Esta situación rep-

resenta una oportunidad para obtener beneficios de la arquitectura pasiva, que en esta zona impacta mayormente en el ahorro de energía, ya que puede ayudar a reducir el periodo de uso de la climatización artificial, lo que aporta beneficios tanto económicos como de salud.

La propuesta consiste en utilizar la ventilación pasiva nocturna como sistema de enfriamiento durante las épocas de transición, con el fin de lograr el confort térmico sin necesidad de la climatización artificial. La climatización artificial quizá no pueda dejar de utilizarse en la época de temperaturas más extremas; pero, en las épocas de transición, cuando también suele utilizarse, podría sustituirse por la ventilación pasiva nocturna y, en consecuencia, se lograría un considerable ahorro energético.

La ventilación no puede utilizarse todo el día sin ningún control, debido a las amplias fluctuaciones diarias de temperatura, por lo que debe ser controlada para una mayor eficiencia. El objetivo de esta investigación es predecir dicho control, en un estudio de caso, mediante un modelo matemático.

2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

Los conceptos principales de esta investigación son la predicción y el control. Según Bunge (1995), la predicción es una manera eficaz de poner a prueba las hipótesis, pero también es la clave del control e, incluso, de la modificación del curso de los acontecimientos. La predicción científica se funda sobre leyes e informaciones específicas fidedignas, relativas al estado de cosas actual o pasado. Para Bunge, la predicción científica se caracteriza por su perfectibilidad antes que por su certeza, y afirma que las predicciones que se hacen con la ayuda de reglas empíricas son a veces más exactas que las predicciones penosamente elaboradas con herramientas científicas (leyes, informaciones específicas y deducciones) y pone como ejemplo frecuente el de los pronósticos meteorológicos.

Uno de los métodos de predicción científica más recurrido debido a la amplitud de su adaptabilidad es el método de regresión lineal. Este método consiste en un análisis estadístico para estudiar la relación entre variables. El análisis de regresión lineal, en general, puede utilizarse para explorar y cuantificar la relación entre una o más variables independientes o predictoras a partir de la cual explicar o predecir el valor de una variable dependiente o criterio. El análisis de regresión lineal puede ser simple o múltiple. En el primero se intenta explicar o predecir la variable dependiente a partir de una única variable independiente, mientras que en el segundo se tiene un conjunto de variables independientes para estimar la variable dependiente (Rodríguez y Morar, 2002).

Por otra parte, en este trabajo, los sistemas para los cuales se estudia la predicción del control son los sistemas de ventilación pasiva en arquitectura. La ventilación pasiva se obtiene cuando el aire crea corrientes en el interior de un espacio al realizar una serie aberturas o perforaciones en fachadas opuestas y perpendiculares a la dirección del viento, para que este entre y renueve el aire interior (Giménez, 2011; Alfaro, 2005).

Aunque los sistemas artificiales para enfriar el aire permiten alcanzar los requisitos de confort térmico en todo momento, con independencia de las condiciones exteriores del clima del lugar, la ventilación natural o pasiva, como técnica pasiva de enfriamiento, es una alternativa más económica y contribuye a detener la escalada actual de consumo de energía (Alfaro, 2005). Sin embargo, mientras que la ventilación natural es conceptualmente simple y la más barata opción para enfriar el edificio, es también la más difícil de controlar, ya que las fuerzas motrices del viento y, por lo tanto, las tasas de flujo de aire, varían de manera constante con el tiempo (Dias, 2010).

El movimiento de la ventilación natural es bastante complejo. Se da por las diferencias de presión creadas a través de las aberturas de los edificios y por las diferencias de temperatura entre interior y exterior. En muchos casos, se calcula empíricamente, mediante resultados obtenidos

de prueba y error, o bien a través de túneles de viento.

Givoni y Vecchia (2001) realizaron una investigación experimental en la que hicieron mediciones de temperaturas interiores en dos viviendas habitadas en Descalvado, Brasil. A partir de dichas mediciones desarrollaron fórmulas que predicen las temperaturas máximas, medias y mínimas al interior de estas viviendas. Los autores encontraron que las temperaturas máxima, media y mínima interiores pueden predecirse con base en las temperaturas medias diarias exteriores.

Krüger y Givoni (2009) llevaron a cabo una investigación en la que hicieron un monitoreo a largo plazo de una casa solar pasiva. De acuerdo con datos climáticos, registrados en una estación meteorológica adyacente, desarrollan fórmulas para predecir las temperaturas del aire en el interior del edificio. Utilizaron estas fórmulas para calcular el rendimiento térmico del edificio en verano, para evaluar el confort y predecir los requerimientos de refrigeración. Con base en estas predicciones se realizan acciones estratégicas de acuerdo con los cambios de necesidades para lograr el confort. Las temperaturas interiores fueron controladas principalmente por la manipulación de ventanas y persianas, con el fin de utilizar ventilación pasiva y protección y captación solar (según se requiriera).

3. MÉTODO

Se realizó un estudio de tipo experimental cuantitativo en un prototipo de vivienda en clima cálido seco. El estudio abarcó mediciones, procesamiento de datos, análisis, y se dividió en tres fases: la primera consistía en mediciones y la elaboración de un modelo preliminar; la segunda en el desarrollo del modelo de predicción buscado y la tercera en la evaluación y mejora de este modelo.

La primera fase es de caracterización del comportamiento térmico de la vivienda por medio de mediciones y análisis estadístico. A partir de ello, y tomando en cuenta las bases teóricas

y metodológicas de los conceptos y estado del arte (mencionadas en el punto 2), se desarrolló un modelo previo. En la segunda fase se tomó el modelo previo y se procedió a experimentar con él, a la par que se analizaron los resultados y se desarrolló el modelo hasta encontrar una serie de fórmulas para predecir la temperatura horaria interior, los que conforman el modelo propuesto. La tercera fase consistió en evaluar y validar el modelo propuesto por medio de un análisis comparativo y nuevas mediciones.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO DE VIVIENDA

Para llevar a cabo el estudio experimental se utilizó un prototipo de vivienda construido dentro del Campus Central de la Universidad de Sonora, en la ciudad de Hermosillo, Sonora, México. La ubicación de la vivienda es $29^{\circ}4'55.15''$ de latitud norte y $110^{\circ}57'30.85''$ de longitud oeste, y una elevación de 207 metros sobre el nivel del mar. El clima de la región, según la clasificación climática de Köppen, es de tipo desértico cálido (árido) y se designa como BWh (Inzunza, 2005). Este clima se caracteriza por su aridez extrema y sus escasas e irregulares precipitaciones, que son inferiores a los 250 mm anuales, lo que provoca la sequedad del aire, ya que el balance precipitación/evaporación es siempre deficitario. Los cielos son claros y la radiación solar es intensa. Las temperaturas en este clima son elevadas durante el período en que el sol está alto y se presentan amplias oscilaciones entre el día y la noche (entre 12°C y 19°C). En verano, la temperatura promedio máxima es de 39°C y la temperatura promedio mínima es de 25°C (SMN, 2010).

El prototipo de vivienda monitoreado (figuras 1 y 2) es de interés social, diseñado para una familia joven de dos a cuatro miembros. El área habitable de la vivienda es de 37 m^2 . El prototipo construido es un modelo experimental no habitado. La vivienda está orientada en un eje norte-sur, y su fachada principal se orienta hacia el Sur. Las ventanas están ubicadas en las fachadas sur y norte y cuentan con protecciones solares. Las fachadas este y oeste son ciegas. Este prototipo

fue construido con paneles de concreto celular (Hebel) en techos y los muros son parte de bloques de tierra compactada y parte de bloques de concreto celular, con acabado liso en exteriores y pintado de color claro. Las ventanas de la cocina, baño y recámara son de doble vidrio y la ventana de la sala es de vidrio sencillo.

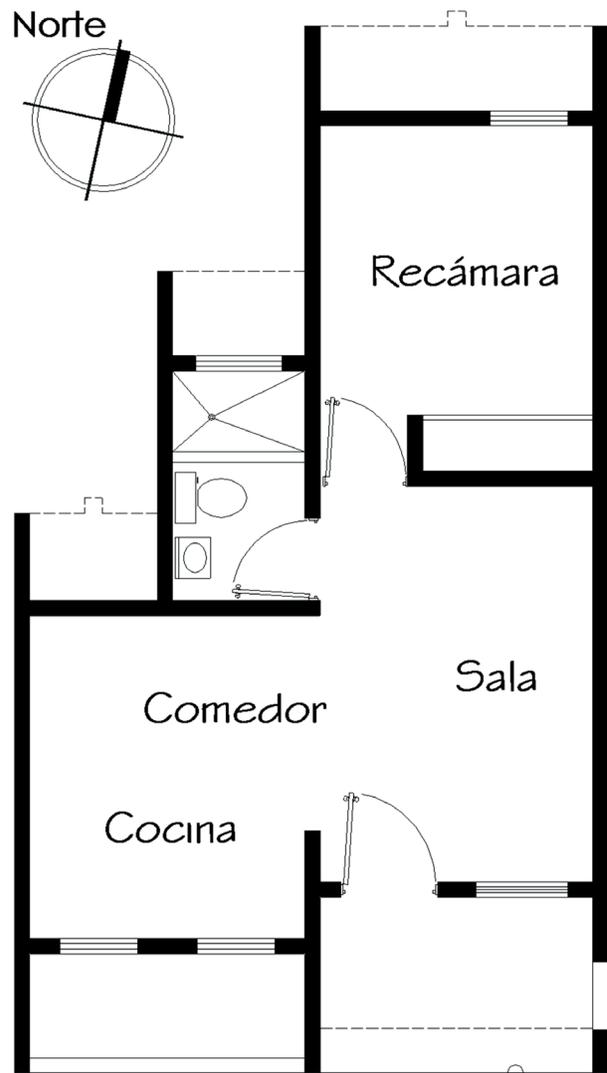


FIGURA 1. Planta arquitectónica del prototipo de vivienda monitoreado, ubicado dentro del Campus Central de la Universidad de Sonora. Fuente: Elaboración propia.

3.2 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Se utilizó para la medición de temperaturas interiores un sistema de monitoreo por medio de sensores marca HOBO serie U12. El equipo está



FIGURA 2. Fachada principal del prototipo de vivienda monitoreado, ubicado dentro del Campus Central de la Universidad de Sonora. Fuente: Elaboración propia.

compuesto por sondas de acero inoxidable (HOBO U12 Stainless Steel Temperature Logger -U12-015) y registradores de datos (HOBO U12 Temp/RH/Light/External Data Logger -U12-012) (figura 2). A través de este equipo se obtuvieron los datos de temperatura de bulbo seco al interior de la vivienda.

Los sensores están ubicados al centro de cada uno de los espacios principales de la vivienda. El sensor 1, con número de serie 1281406, está ubicado en la sala. El sensor 2, con número de serie 1281404, está ubicado en la cocina-comedor y el sensor 3, con número de serie 1281417, está ubicado en la recámara.



FIGURA 3. Equipo de medición: sonda y registrador de datos marca HOBO serie U12. Fuente: www.onsetcomp.com

Las mediciones de las temperaturas de bulbo seco interiores registradas por los tres sensores fueron promediadas, pues se toma la vivienda completa como un solo espacio que funciona



FIGURA 4. Ubicación de los sensores en los espacios principales de la vivienda: sensor 1 (izquierda), sensor 2 (centro) y sensor 3 (derecha). Fuente: Elaboración propia.

como un solo sistema de ventilación, debido a su reducido tamaño. Esta consideración se hace con base en Krüger y Givoni (2009), quienes consideran como un solo espacio un apartamento de 55 m².

Para la medición de temperaturas exteriores se utilizó la Estación Meteorológica del Laboratorio de Energía y Medio Ambiente (LEMA) de la Universidad de Sonora, que mide, procesa y almacena datos ininterrumpidamente cada 10 minutos. En esta estación se monitorean variables climáticas como temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, precipitación, presión atmosférica, radiación solar global y difusa, radiación infrarroja y radiación UV. También se miden magnitudes lumínicas del ambiente, como iluminancia global y difusa. La estación está ubicada a una distancia de 100 metros del modelo construido del prototipo de vivienda analizado. De ella se tomaron, para este estudio, los datos de temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento y radiación solar global.

3.3 PERIODOS DE MEDICIÓN

Debido a las características del clima cálido seco, en este estudio se considera la ventilación pasiva para enfriamiento. Durante el verano, las temperaturas son tan extremas que no es posible enfriar con ventilación y es necesaria la utilización de sistemas de enfriamiento artificial, pero durante los periodos de transición (primavera y otoño) –en los que también se utiliza climatización artificial– hay más posibilidades de enfriamiento nocturno con ventilación pasiva.

El primer periodo de medición fue durante los meses de julio, agosto, septiembre y octubre de 2012, con el fin de caracterizar el comportamiento de la vivienda. Debido a las características del clima y de la vivienda se determinaron dos periodos de medición en las estaciones de transición en primavera y otoño. Durante la primavera de 2013 se realizaron mediciones durante el mes de marzo y todo el mes de mayo. En el otoño de 2013 se hicieron mediciones del 14 de octubre al 14 de noviembre.

3.4 ETAPAS DE EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS

3.4.1 VENTANAS CERRADAS

Durante los meses de julio, agosto, septiembre y octubre de 2012, se llevaron a cabo mediciones con base en el monitoreo con sensores y se recabaron datos como temperaturas interiores y exteriores, velocidad del viento y radiación solar. Durante este periodo de medición las ventanas de la vivienda estuvieron siempre cerradas. Este periodo de experimentación y análisis tuvo como objetivo caracterizar el comportamiento térmico de la vivienda, probar modelos estadísticos de predicción con datos obtenidos de las mediciones y tener un modelo estadístico previo que sirvió de guía para llevar a cabo las primeras mediciones destinadas a obtener el modelo definitivo propuesto.

Terminadas las mediciones, utilizando hojas de cálculo de la herramienta informática Microsoft Excel, se analizaron los datos recabados mediante correlación lineal y múltiple. Se correlacionaron temperaturas diarias y horarias

interiores con múltiples combinaciones de las variables exteriores, se desarrollaron fórmulas para predecir la temperatura interior con base en las variables más significativas del exterior (temperatura, velocidad del viento y radiación solar) (Givoni y Vecchia, 2001) y se llevaron a cabo evaluaciones y comprobaciones con la misma serie de datos obtenidos de las mediciones. De las fórmulas con mejor coeficiente de correlación, se formó un modelo para predecir la temperatura interna promedio horaria de la vivienda con las ventanas siempre cerradas.

3.4.2 VENTANAS ABIERTAS

Durante el mes de marzo de 2013, se llevaron a cabo mediciones con base en un monitoreo con sensores, mediante el cual se recabaron datos como temperaturas interiores y exteriores, velocidad del viento y radiación solar. Durante este periodo de medición las ventanas de la vivienda estuvieron siempre abiertas. Este período de experimentación y análisis tuvo como objetivo caracterizar el comportamiento térmico de la vivienda al darse el flujo de aire por ventilación pasiva y obtener un modelo estadístico previo, que sirvió de guía para llevar a cabo las primeras mediciones destinadas a obtener el modelo definitivo propuesto.

Terminadas las mediciones, utilizando hojas de cálculo de la herramienta informática Microsoft Excel, se analizaron los datos recabados mediante correlación lineal y múltiple. Se correlacionaron temperaturas diarias y horarias interiores con múltiples combinaciones de las variables exteriores, se desarrollaron fórmulas para predecir la temperatura interior con base en las variables más significativas del exterior (temperatura, velocidad del viento y radiación solar) (Givoni y Vecchia, 2001) y se llevaron a cabo evaluaciones y comprobaciones con la misma serie de datos obtenidos de las mediciones. De las fórmulas con mejor coeficiente de correlación, se formó un modelo para predecir la temperatura interna promedio horaria de la vivienda con las ventanas siempre abiertas.

3.4.3 CONTROL DE VENTANAS

Si las ventanas permanecen cerradas, la transferencia de calor entre exterior e interior (en ambos sentidos) se da por medio de la envolvente, cuyo efecto es más retardado que si se da por medio de la ventilación con las ventanas abiertas. Pero si las ventanas permanecen siempre abiertas puede haber efectos negativos. Como se mencionó en el punto 2, el movimiento de la ventilación natural se da por las diferencias de presión creadas a través de las aberturas de los edificios y por las diferencias de temperatura entre interior y exterior. Durante el día, cuando las temperaturas exteriores son mayores a las interiores, las ventanas abiertas permiten que el viento cálido acelere la transferencia de calor hacia el interior, de manera más rápida que por convección (aire-superficie) y conducción a través de la envolvente, lo cual causa un efecto negativo para la obtención del confort al interior de la vivienda. Durante la noche es en sentido contrario, las ventanas abiertas aceleran la transferencia de calor del interior hacia el exterior, más que a través de la envolvente, que es un efecto positivo. Por lo tanto, la transferencia de calor a través de las ventanas es ventajosa sólo si se controla, es decir, si estas se abren o cierran según sea conveniente.

Durante el mes de mayo de 2013, se llevaron a cabo mediciones con base en el monitoreo con sensores donde se recabaron datos como temperaturas interiores y exteriores, velocidad del viento y radiación solar. Durante este periodo de medición se controló la apertura de las ventanas de la vivienda (abriéndolas y cerrándolas). Para determinar dicho control se evaluaron datos de temperatura exterior horaria, tomados de las predicciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), en los modelos estadísticos obtenidos de los datos medidos del año 2012 y de marzo de 2013. Los datos arrojados por los modelos y los obtenidos del SMN se evaluaron en las siguientes reglas: a) abrir ventanas cuando la temperatura interior sea 1°C mayor que la temperatura exterior ($T_{\text{int}} - T_{\text{ext}} > 1^{\circ}\text{C}$) y b) cerrar ventanas cuando la temperatura interior sea 1°C menor que la temperatura exterior ($T_{\text{ext}} - T_{\text{int}} > 1^{\circ}\text{C}$) (Breesch *et al.*, 2011). Las

reglas que se aplicaron al control de cada día fueron las que, en conjunto, arrojaron menos horas de ausencia de ventilación por ventanas.

Después de cinco días de mediciones, utilizando hojas de cálculo de la herramienta informática Microsoft Excel, se analizaron los datos recabados mediante correlación lineal y múltiple. Se correlacionaron temperaturas horarias interiores con múltiples combinaciones de las variables exteriores, se desarrollaron fórmulas para predecir la temperatura interior con base en las variables más significativas del exterior (temperatura, velocidad del viento y radiación solar) (Givoni y Vecchia, 2001) y se llevaron a cabo evaluaciones y comprobaciones con la misma serie de datos obtenidos de las mediciones. De las fórmulas con mejor coeficiente de correlación se formó un modelo provisional para predecir la temperatura interna promedio horaria de la vivienda con control de ventanas. El resto de las mediciones del mes de mayo se realizaron mientras se aplicaba el control a las ventanas, resultado de la evaluación de los datos arrojados por el modelo provisional en las reglas presentadas en el párrafo anterior.

Terminadas las mediciones del mes de mayo, para las que se utilizaron hojas de cálculo de la herramienta informática Microsoft Excel, se analizaron los datos recabados mediante correlación lineal y múltiple. Se correlacionaron temperaturas horarias interiores con múltiples combinaciones de las variables exteriores, se desarrollaron fórmulas para predecir la temperatura interior con base en las variables más significativas del exterior (temperatura, velocidad del viento y radiación solar) (Givoni y Vecchia, 2001) y se llevaron a cabo evaluaciones y comprobaciones con la misma serie de datos obtenidos de las mediciones. De las fórmulas con mejor coeficiente de correlación se formó un modelo para predecir la temperatura interna promedio horaria de la vivienda con control de ventanas.

3.4.4 CONTROL DE VENTANAS. VALIDACIÓN

Durante parte de los meses de octubre y noviembre de 2013, se llevaron a cabo mediciones por medio de monitoreo con sensores, donde se re-

cabaron datos como temperaturas interiores y exteriores, velocidad del viento y radiación solar. Durante este periodo de medición las ventanas de la vivienda fueron controladas (abriéndolas y cerrándolas). Para determinar las horas en que se aplicó el control a las ventanas se evaluaron temperaturas horarias, tomadas de las predicciones del SMN, en el modelo propuesto, descrito en el subcapítulo anterior.

Al terminar las mediciones, se hicieron comparaciones entre las horas de control arrojadas por el modelo y las obtenidas por datos reales. También se realizaron comparaciones entre temperaturas interiores predichas y medidas. Se analizaron las diferencias mediante tablas y gráficos para dar una idea de la eficiencia de predicción del modelo propuesto.

4. RESULTADOS

4.1 PREDICCIÓN DE TEMPERATURAS INTERIORES

Con base en los primeros dos periodos de medición y análisis (julio, agosto, septiembre y octubre de 2012 y marzo de 2013) se determinó la variable exterior más significativa para predecir la temperatura interior en la vivienda monitoreada. A partir de este análisis, para los siguientes periodos se tomaron en cuenta solo las temperaturas exteriores para obtener las fórmulas de predicción de las temperaturas interiores.

La primera parte de la predicción consistió en desarrollar fórmulas para predecir la temperatura interior promedio de las 24 horas del día. A partir de ellas se conformó un modelo matemático que sirve para predecir el control adecuado de los sistemas de ventilación pasiva para enfriamiento.

El modelo que se propone se deriva del análisis y manejo de una etapa de medición en que los dispositivos de ventilación pasiva fueron controlados para obtener una temperatura mínima posible dentro de la vivienda, lograda solo por la manipulación de estos elementos. Esta etapa de medición sucedió en el intervalo del 2 al 30 de mayo de 2013.

Para desarrollar las 24 fórmulas primero se analizó, mediante gráficos y coeficientes de correlación lineal, los patrones de correlación entre la temperatura interior promedio de las 24 horas y las siguientes variables exteriores: temperatura promedio, temperatura mínima, temperatura máxima, temperatura promedio del día anterior, temperatura mínima del día anterior, temperatura máxima del día anterior.

Se encontró que, para predecir la temperatura interior de las primeras 15 horas, es conveniente usar la temperatura promedio exterior del día anterior; para las horas restantes es conveniente usar la temperatura promedio exterior. Todos los coeficientes de correlación lineal resultaron mayores a 0.84 siendo la media 0.91.

La figura 5 muestra que las primeras 15 horas de temperatura interior pueden ser relacionadas con la temperatura promedio exterior del día anterior. La figura 6 muestra que las últimas nueve horas de temperatura interior pueden ser relacionadas con la temperatura promedio exterior.

Para aumentar la posibilidad de predecir días con distinta distribución horaria se procedió a

realizar regresiones lineales múltiples, teniendo como variable Y la temperatura interior de cada hora, como X1 la temperatura exterior diaria de mejor correlación declarada en el párrafo anterior y como X2 la temperatura horaria exterior correspondiente a la misma hora interior. Todos los coeficientes de correlación lineal resultaron mayores a 0.88, siendo la media 0.93. De estas regresiones lineales múltiples resultaron las 24 fórmulas que conforman el modelo propuesto.

4.2 MODELO PARA PREDECIR EL CONTROL DE LA VENTILACIÓN PASIVA

Se presentan las 24 fórmulas, que conforman el modelo propuesto para predecir la temperatura interior $T_{int i}$ en las 24 horas del día, mediante la fórmula 1 y su respectiva tabla complementaria (tabla 1).

$$T_{int i} = A*B + C*T_{ext i} + D \quad (1)$$

donde A, B, C y D son coeficientes que se hallan en la tabla 1 y $T_{ext i}$ es la temperatura exterior a la hora i .

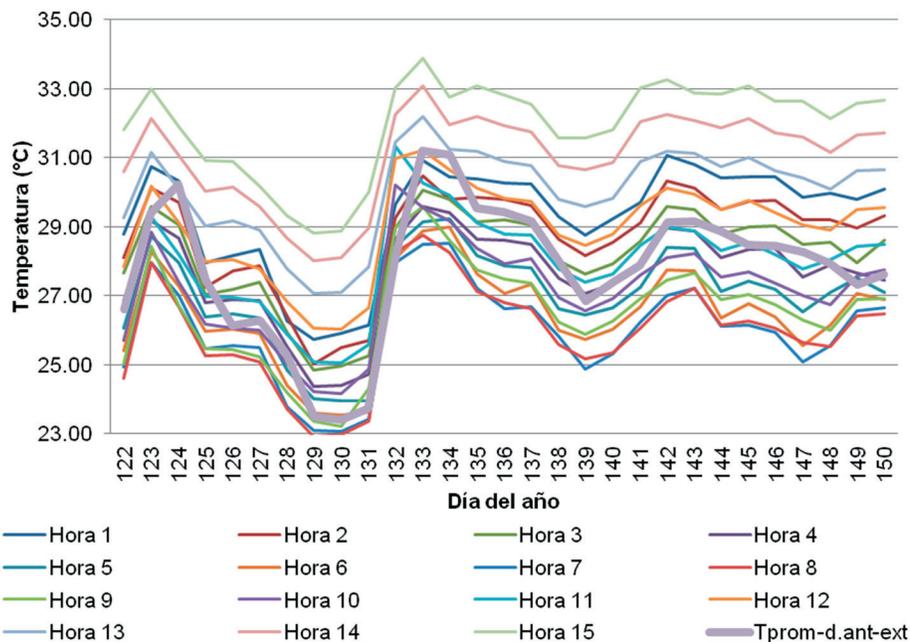


FIGURA 5. Gráfica que muestra temperaturas interiores de las primeras 15 horas y la temperatura promedio exterior del día anterior en periodo de monitoreo de mayo. Fuente: Elaboración propia.

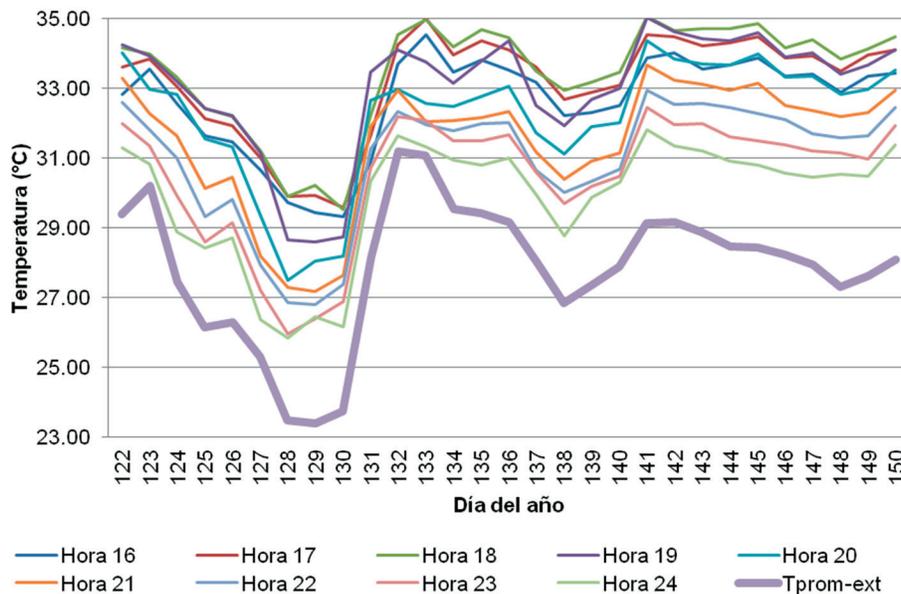


FIGURA 6. Gráfica que muestra temperaturas interiores de la hora 16 a la hora 24 del día y la temperatura promedio exterior en periodo de monitoreo de mayo. Fuente: Elaboración propia.

TABLA 1. Tabla complementaria de fórmula 1, con hora del día *i*, coeficientes *A* y *C*, variable *B* e intersección *D* para las fórmulas predictivas de las 24 horas del día

| I | A | B | C | D |
|----|-------|--|--------|--------|
| 1 | 0.769 | Temperatura exterior promedio del día anterior | -0.046 | 9.055 |
| 2 | 0.669 | Temperatura exterior promedio del día anterior | 0.027 | 9.495 |
| 3 | 0.610 | Temperatura exterior promedio del día anterior | 0.072 | 9.547 |
| 4 | 0.583 | Temperatura exterior promedio del día anterior | 0.103 | 9.113 |
| 5 | 0.517 | Temperatura exterior promedio del día anterior | 0.164 | 9.128 |
| 6 | 0.454 | Temperatura exterior promedio del día anterior | 0.222 | 9.210 |
| 7 | 0.425 | Temperatura exterior promedio del día anterior | 0.284 | 8.026 |
| 8 | 0.381 | Temperatura exterior promedio del día anterior | 0.367 | 6.584 |
| 9 | 0.444 | Temperatura exterior promedio del día anterior | 0.359 | 4.605 |
| 10 | 0.460 | Temperatura exterior promedio del día anterior | 0.229 | 7.768 |
| 11 | 0.513 | Temperatura exterior promedio del día anterior | 0.154 | 9.026 |
| 12 | 0.525 | Temperatura exterior promedio del día anterior | 0.135 | 10.080 |
| 13 | 0.495 | Temperatura exterior promedio del día anterior | 0.157 | 11.111 |
| 14 | 0.441 | Temperatura exterior promedio del día anterior | 0.196 | 12.182 |
| 15 | 0.411 | Temperatura exterior promedio del día anterior | 0.238 | 12.314 |
| 16 | 0.579 | Temperatura exterior promedio | 0.055 | 14.670 |
| 17 | 0.602 | Temperatura exterior promedio | 0.065 | 14.210 |
| 18 | 0.535 | Temperatura exterior promedio | 0.147 | 13.723 |
| 19 | 0.407 | Temperatura exterior promedio | 0.379 | 9.774 |
| 20 | 0.429 | Temperatura exterior promedio | 0.379 | 9.007 |
| 21 | 0.530 | Temperatura exterior promedio | 0.305 | 8.121 |
| 22 | 0.635 | Temperatura exterior promedio | 0.190 | 8.186 |
| 23 | 0.720 | Temperatura exterior promedio | 0.148 | 6.609 |
| 24 | 0.839 | Temperatura exterior promedio | -0.033 | 7.373 |

Fuente: Elaboración propia.

Con base en estas fórmulas (fórmula 1 y tabla 1) se desarrolló el modelo que predice la hora de apertura y cierre de los dispositivos de ventilación pasiva. El modelo arroja las dos siguientes acciones de control de la ventilación pasiva:

- Abrir ventanas cuando la temperatura interior sea mayor que la temperatura exterior ($T_{int} > T_{ext}$).
- Cerrar ventanas cuando la temperatura interior sea menor que la temperatura exterior ($T_{int} < T_{ext}$) (Breesch *et al.*, 2011).

Los datos de entrada del modelo son las temperaturas horarias exteriores; y los datos de salida, las temperaturas horarias interiores y las horas en que se deben abrir y cerrar ventanas.

4.3 EVALUACIÓN DEL MODELO

Se probó el modelo para todos los días de la etapa de medición de mayo y se comparó con los datos medidos.

Las gráficas de las figuras 7 y 8 muestran, cada una, la temperatura exterior medida, la temperatura interior medida y la temperatura interior calculada con base en las fórmulas predictivas con variables de entrada diarias y horarias medidas del modelo para un día del año. Se puede observar en ellas cómo los puntos de cruce entre

la temperatura exterior y la temperatura interior son similares para la temperatura exterior medida y la temperatura interior calculada con el modelo. Las líneas rectas continuas indican la hora en que deben estar abiertas las ventanas. De la comparación de las horas de ventilación o no ventilación obtenidas por el modelo y las obtenidas de la medición se encontró que el modelo acertó en 98.28% de las horas.

La figura 9 muestra la correlación entre temperatura horaria interior medida y calculada para el periodo de monitoreo de mayo. El valor de correlación R es igual 0.98.

4.4 VALIDACIÓN DEL MODELO PARA PREDECIR EL CONTROL DE LA VENTILACIÓN PASIVA

Para validar el modelo resultado del periodo de monitoreo de mayo, se realizó otra etapa de monitoreo y mediciones mientras se llevaba a cabo el control de los dispositivos de ventilación. Dicho control fue regido por el modelo mencionado y antes descrito, para tal fin se introdujeron los datos necesarios tomados del SMN. Esta etapa de medición sucedió en el intervalo del 14 de octubre al 13 de noviembre de 2013. Para llevar a cabo la validación del modelo, se realizaron evaluaciones del mismo con los datos obtenidos en este

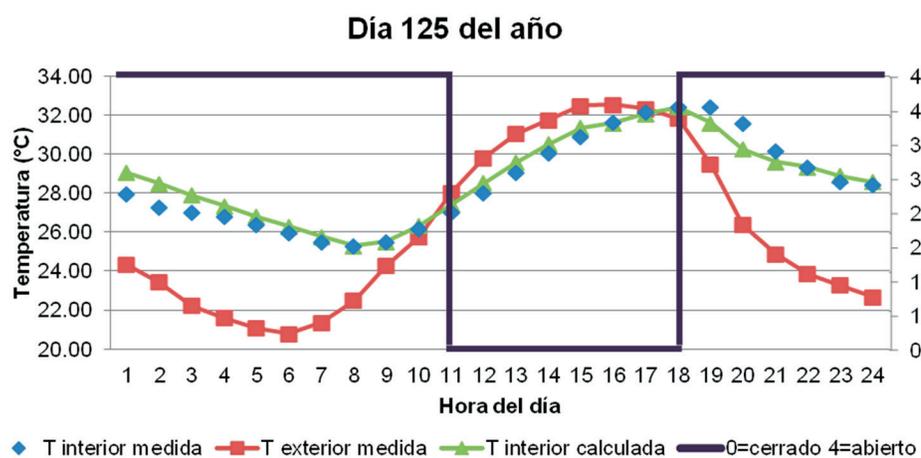


FIGURA 7. Gráfica de temperatura exterior medida, temperatura interior medida y temperatura interior calculada con base en las fórmulas predictivas con variables de entrada diarias y horarias medidas del modelo para el día 125 del año. La línea recta oscura indica si las ventanas deben estar abiertas (arriba) o cerradas (abajo). Fuente: Elaboración propia.

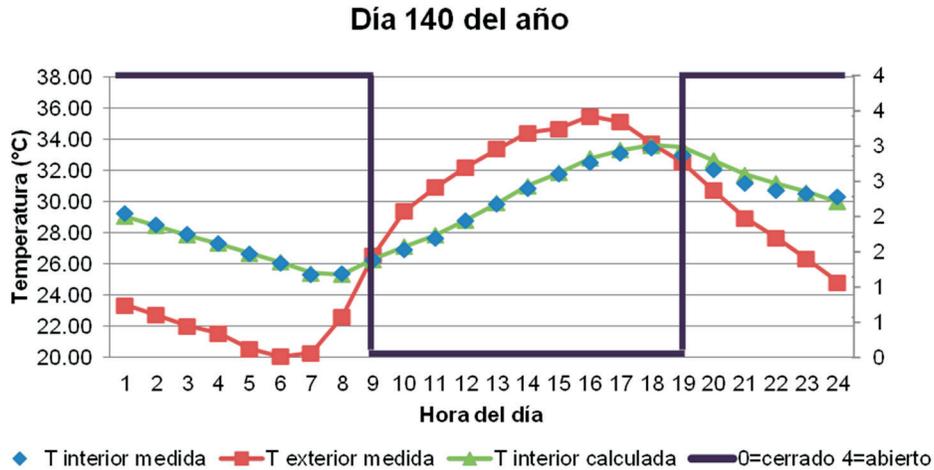


FIGURA 8. Gráfica de temperatura exterior medida, temperatura interior medida y temperatura interior calculada con base en las fórmulas predictivas con variables de entrada diarias y horarias medidas del modelo para el día 140 del año. La línea recta oscura indica si las ventanas deben estar abiertas (arriba) o cerradas (abajo). Fuente: Elaboración propia.

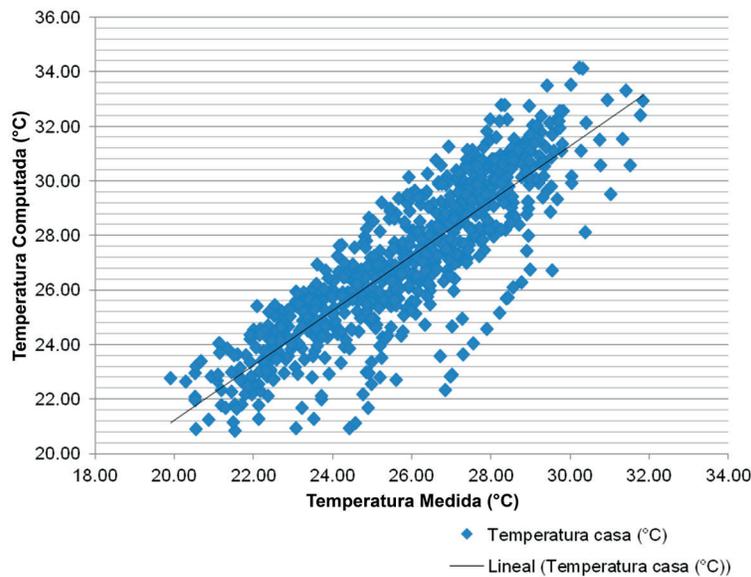


FIGURA 9. Gráfico de correlación entre temperatura horaria interior medida y calculada. Fuente: Elaboración propia.

periodo comprendido en los meses de octubre y noviembre.

Las gráficas de las figuras 10 y 11 muestran, cada una, la temperatura exterior medida, la temperatura interior medida y la temperatura interior calculada con base en las fórmulas predictivas con variables de entrada diarias y horarias medidas del modelo para un día del año. Se puede observar en ellas cómo los puntos de cruce

entre la temperatura exterior y la temperatura interior son similares para la temperatura exterior medida y la temperatura interior calculada con el modelo. Las líneas rectas continuas indican la hora en que deben estar abiertas las ventanas. De la comparación de las horas de ventilación o no ventilación obtenidas por el modelo y las obtenidas de la medición se encontró que el modelo acertó en 88,31% de las horas.

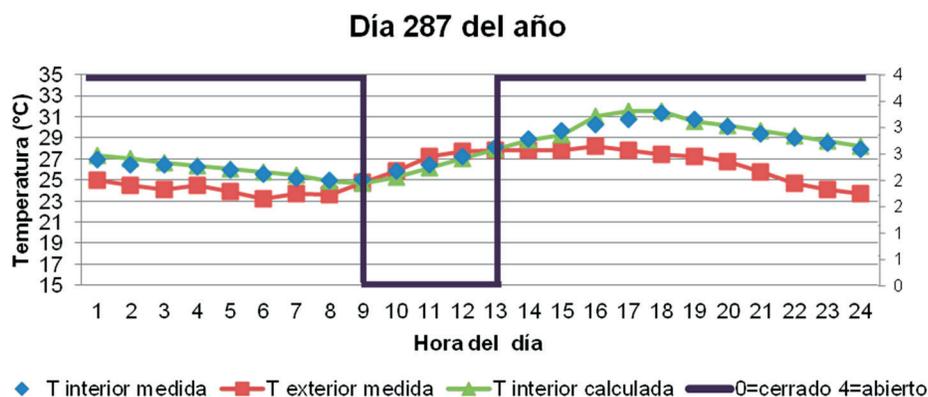


FIGURA 10. Gráfica de temperatura exterior medida, temperatura interior medida y temperatura interior calculada en base a las fórmulas predictivas con variables de entrada diarias y horarias medidas del modelo para el día 287 del año. La línea recta oscura indica si las ventanas deben estar abiertas (arriba) o cerradas (abajo). Fuente: Elaboración propia.

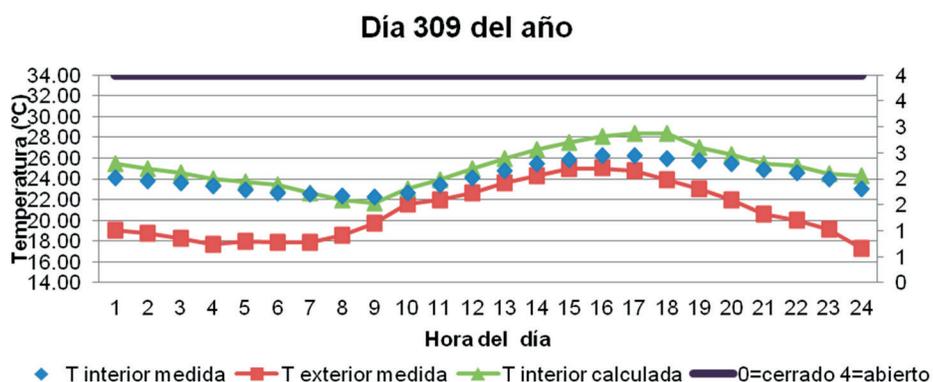


FIGURA 11. Gráfica de temperatura exterior medida, temperatura interior medida y temperatura interior calculada con base en las fórmulas predictivas con variables de entrada diarias y horarias medidas del modelo para el día 309 del año. La línea recta oscura indica si las ventanas deben estar abiertas (arriba) o cerradas (abajo). Fuente: Elaboración propia.

La figura 12 muestra la correlación entre la temperatura horaria interior medida y calculada para el periodo de monitoreo de mayo. El valor de correlación R es igual 0.86.

La tabla 2 resume los puntos 4.3 y 4.4 que corresponden a la evaluación y validación del modelo. En ella se muestra la correlación entre la temperatura horaria interior medida y la calculada por el modelo y el porcentaje de acierto que se encontró de la comparación de las horas de ventilación o no ventilación obtenidas por el modelo y las obtenidas de la medición en los periodos de transición.

4.5 CONSIDERACIONES SOBRE LA INFLUENCIA DEL VIENTO EN EL MODELO

4.5.1 INCIDENCIA DEL VIENTO SOBRE VENTANAS

Como se ha demostrado mediante correlaciones lineales, la velocidad y dirección del viento no tienen una clara influencia como para introducirse en el modelo matemático para predecir la temperatura interior en este caso de estudio. Para comprobar el porqué para esta casa habitación en especial no influye de manera significativa la velocidad y dirección del viento en la predicción de la temperatura interior, se procedió como se expresa a continuación:

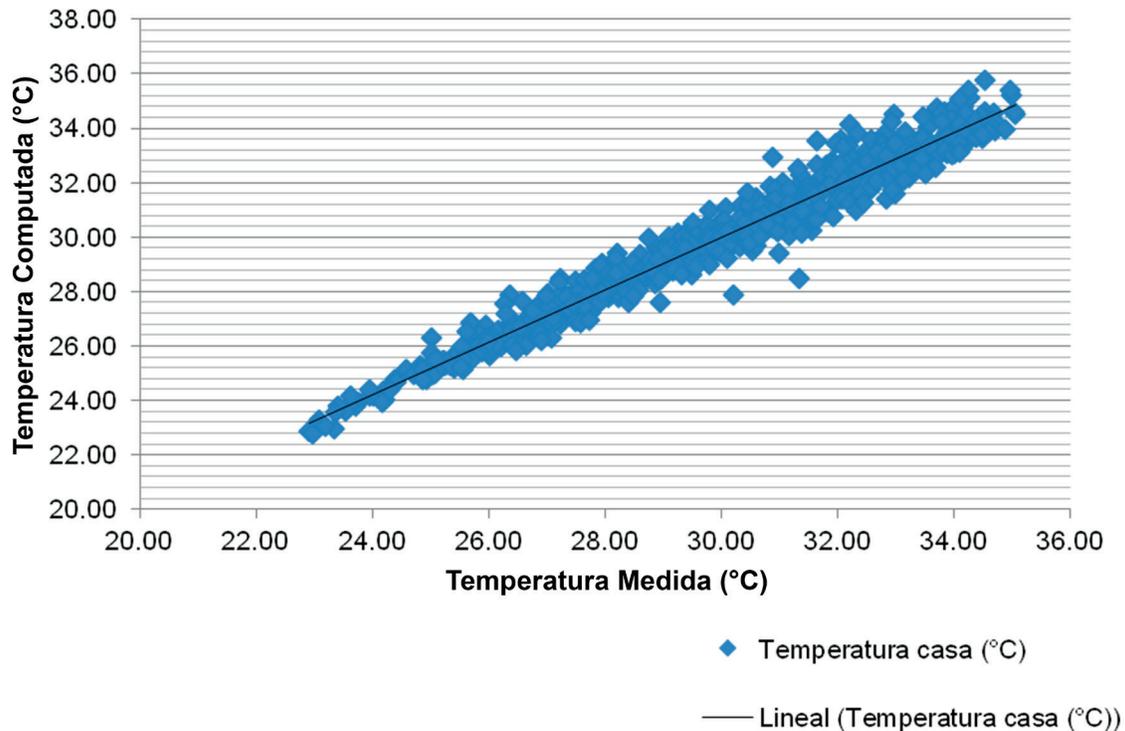


FIGURA 12. Gráfica de correlación entre la temperatura horaria interior medida y calculada. Fuente: Elaboración propia.

TABLA 2. Resumen de los resultados de la evaluación y validación del modelo propuesto

| Etapa | Situación | Periodo de monitoreo | Valor de correlación R ² | Acierto en la predicción del control (% de horas) |
|--|--|----------------------|-------------------------------------|---|
| Medición | Ventanas cerradas | Julio-octubre | — | — |
| | Ventanas abiertas | Marzo | — | — |
| Predicción-Evaluación de modelo propuesto con mediciones | Control de ventanas con modelos previos | Mayo | 0.98 | 98.28% |
| Predicción-Validación de modelo propuesto con mediciones | Control de ventanas con modelo propuesto | Octubre-noviembre | 0.86 | 88.31% |

Fuente: Elaboración propia.

De los datos obtenidos cada 10 minutos (en las mediciones del mes de mayo) de la dirección del viento y el azimut de cada ventana, se encontró el ángulo formado por el azimut de la normal de cada ventana y la dirección del viento. Para cada ventana se determinó, para los datos obtenidos cada 10 minutos, cuándo el viento no entró en absoluto a causa de la ubicación de la ventana y de las obstrucciones solares verticales.

La tabla 3 muestra el porcentaje de no incidencia del viento en las 4.176 mediciones del mes de mayo del año 2013 en cada una de las cinco ventanas de la vivienda; el promedio de la no incidencia en las cinco ventanas y la no incidencia simultánea en todas las ventanas. Con estos datos se puede ver que, debido a la forma de la casa estudiada, en la mayoría de las mediciones el viento no incidió o estuvo incidiendo poco sobre el área

total de ventanas. Por lo tanto, es de esperarse que, para este caso de estudio con ventilación pasiva, la velocidad y dirección del viento no influya en la predicción de la temperatura interior, pero sí lo haga para su temperatura.

4.5.2 FLUJO DE AIRE SIN OBSTRUCCIONES

El flujo de aire sin obstrucciones involucra la velocidad del viento, la dirección del viento, el azimut de la ventana y las dimensiones de la ventana. Por lo tanto, es ideal para tomarse como variable de entrada en la creación de fórmulas predictivas de la temperatura interior. A pesar de que para este caso de estudio, por lo que se ha expuesto en el apartado anterior, la influencia del viento no es significativa para la creación de dichas fórmulas, se presenta el procedimiento seguido para encontrar el flujo de aire sin obstrucciones.

De los datos obtenidos cada 10 minutos (en las mediciones del mes de mayo) de la dirección del viento y el azimut de cada ventana se encontró el ángulo formado por el azimut de la normal de cada ventana y la dirección del viento. Para cada ventana se encontró, para los datos a cada 10 minutos, cuándo el viento no entró en absoluto a causa de la localización de la ventana y de las obstrucciones solares verticales. Para cada ventana, solo en los datos en que sí incidió el viento, se encontró la componente de la velocidad del viento paralela a la normal de la ventana, multiplicando la velocidad del viento por el coseno del ángulo formado por el azimut de la normal de la ventana y la dirección del viento. Para cada

ventana y para los 4,176 datos, la componente de la velocidad del viento se multiplicó por el área de cada ventana, encontrando así el flujo de aire sin obstrucciones para cada ventana. Para cada dato se sumó el flujo de aire sin obstrucciones de las cinco ventanas. Al igual que las otras variables tratadas anteriormente, se encontraron promedios horarios y promedios diarios para el flujo de aire sin obstrucciones. Lo anterior se expresa en la fórmula 2.

$$\text{Flujo de aire sin obstrucciones} = \frac{\text{Componente de la velocidad del viento} * \text{Área de incidencia del viento}}{(2)}$$

Para una casa habitación distinta a la tratada en este estudio, se esperaría que el viento influyera en las fórmulas para predecir la temperatura interior. Esto se comprobaría encontrando coeficientes de correlación para los promedios horarios o diarios del flujo de aire sin obstrucciones con la temperatura interior promedio horaria. Y se tomaría como una variable más en las regresiones lineales múltiples para encontrar las fórmulas predictivas de la temperatura promedio horaria interior.

4.6. COMPARACIÓN DE TEMPERATURAS INTERIORES AL APLICAR EL MODELO

Se muestra la comparación de temperaturas interiores y exteriores entre dos años de mediciones en el mismo periodo. El periodo de medición es el comprendido entre el 14 de octubre y el 31 de octubre. En el año 2012, en este período se reali-

TABLA 3. Porcentaje de no incidencia del viento en las 4,176 mediciones del mes de mayo del año 2013 en cada una de las cinco ventanas de la vivienda

| | No incide en área ventana norte | No incide en área ventana baño | No incide en área ventana sur izquierda | No incide en área ventana sur derecha | No incide en área ventana sur pórtico | Promedio | No incide en ventana alguna |
|--|---------------------------------|--------------------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|----------|-----------------------------|
| Porcentaje de no incidencia del viento | 94% | 98% | 79% | 69% | 78% | 83% | 58% |

Fuente: Elaboración propia.

zaron mediciones con las ventanas cerradas durante todo el día; y en el año 2013, se realizaron mediciones aplicando la predicción del control arrojado por el modelo propuesto.

Las tablas 4 y 5 muestran las temperaturas interiores promedio, mínima promedio y máxima promedio; temperaturas exteriores promedio, mínima promedio y máxima promedio, y diferencia entre temperaturas interiores y temperaturas (temperatura interior-exterior) promedio, mínima promedio y máxima promedio en el periodo de medición del 14 al 31 de octubre del año 2012 y del año 2013, respectivamente.

En el periodo comprendido del 14 hasta el 31 de octubre, al observar las tablas 4 y 5 se nota que en el año 2012 la temperatura interior promedio fue 2.85°C mayor que la temperatura exterior promedio; en cambio, en el año 2013 fue de 1.3°C la diferencia, siendo la temperatura interior promedio de 25.8°C. En el año 2012 la temperatura interior mínima fue 7.76°C mayor que la temperatura exterior promedio, en cambio en el año 2013 fue de 5.29°C la diferencia, siendo la temperatura interior promedio de 22.15 °C. En el año 2012 la temperatura interior máxima fue 2.53°C menor que la temperatura exterior promedio; en cambio

TABLA 4. Temperaturas interiores promedio, mínima promedio y máxima promedio; temperaturas exteriores promedio, mínima promedio y máxima promedio, y diferencia entre temperaturas interiores y temperaturas (temperatura interior-exterior) promedio, mínima promedio y máxima promedio en el periodo de medición del 14 al 31 de octubre de 2012

| 14-31 de octubre de 2012 | | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-----------------|-----------------|
| Temperatura exterior (°C) | | | | Temperatura interior (°C) | | |
| Promedio | Mínima promedio | Máxima promedio | Máxima-Mínima | Promedio | Mínima promedio | Máxima promedio |
| 25.16 | 17.95 | 32.75 | 14.81 | 28.02 | 25.71 | 30.23 |
| Temperatura interior-exterior (°C) | | | | | | |
| Promedio | | Mínima promedio | Máxima promedio | | | |
| 2.85 | | 7.76 | -2.53 | | | |

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 5. Temperaturas interiores promedio, mínima promedio y máxima promedio; temperaturas exteriores promedio, mínima promedio y máxima promedio, y diferencia entre temperaturas interiores y temperaturas (temperatura interior-exterior) promedio, mínima promedio y máxima promedio en el periodo de medición del 14 al 31 de octubre de 2013

| 14-31 de octubre de 2013 | | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-----------------|-----------------|
| Temperatura exterior (°C) | | | | Temperatura interior (°C) | | |
| Promedio | Mínima promedio | Máxima promedio | Máxima-mínima | Promedio | Mínima promedio | Máxima promedio |
| 24.54 | 16.86 | 32.07 | 15.21 | 25.84 | 22.15 | 28.98 |
| Temperatura interior-exterior (°C) | | | | | | |
| Promedio | | Mínima promedio | Máxima promedio | | | |
| 1.30 | | 5.29 | -3.09 | | | |

Fuente: Elaboración propia.

en el año 2013 fue de 3.03°C la diferencia, siendo la temperatura interior máxima de 28.98°C . Se observa que en 2013, año en que se aplicó el modelo propuesto, las temperaturas interiores fueron más bajas que en 2012. De las diferencias entre temperaturas interiores y exteriores se hace notar la ventaja de la aplicación del modelo propuesto.

5. CONCLUSIONES

Como se demuestra en este artículo, es posible predecir la temperatura promedio de las 24 horas del día en una vivienda de interés social, con reducido margen de error, a partir de la temperatura promedio diaria exterior. Y parece posible tener una predicción más cercana si se utilizan las temperaturas promedio diaria y promedio horaria exteriores. Y con esto, mediante regresiones lineales múltiples y reglas de control, se puede formar un modelo matemático para predecir el control de los dispositivos de ventilación.

Como se demostró en el punto 4.6, mediante el control manual adecuado de los sistemas de ventilación pasiva, se logró una temperatura menor comparada con la temperatura en ausencia de ventilación en el mes de octubre, es decir, en época de transición. Se esperaría que una vivienda con mayor área de ventanas y con una configuración física que permitiese mayor flujo de aire hacia el interior tuviera una diferencia más notable, en cuanto a temperatura interior, entre ventilación controlada y ausencia de ventilación, con lo que se lograría una menor temperatura interior. Para desarrollar un modelo para una vivienda como la descrita, al seguir la metodología propuesta en este estudio, se encontraría probablemente que el flujo de aire sin obstrucciones sería una variable significativa para predecir la temperatura interna. Entonces, en consecuencia, a la fórmula 1 se agregaría esta variable.

Resulta importante aclarar que el modelo, tal como se presenta en la fórmula 1 y en la tabla 1, funciona para predecir el control de la ventilación pasiva específicamente en la vivienda estu-

diada. Se podría utilizar, con reservas, el modelo descrito con los coeficientes específicos de la tabla 1 para predecir el control de los dispositivos de ventilación pasiva en viviendas con dimensiones, sistemas constructivos y área de ventanas similares en clima cálido seco. Para otros climas y otras configuraciones de vivienda es necesario estudiar a fondo los contextos específicos porque las variables a tomarse en cuenta pueden cambiar, además de que las fórmulas de predicción cambiarán definitivamente.

Aplicar el modelo, con su respectivo procedimiento para desarrollar las fórmulas predictivas, en un fraccionamiento de vivienda en serie de interés social puede ser fructífero. Seguir la metodología y el procedimiento para desarrollar las fórmulas predictivas en un par de viviendas posibilitaría predecir cercanamente el control adecuado de los dispositivos de la ventilación pasiva en todo el fraccionamiento –en épocas de transición– y así reducir el periodo de uso de los sistemas de climatización artificial en cada una de las viviendas. De esta manera es posible lograr un considerable ahorro energético.

6. AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo a la formación. Al Dr. Ricardo Gallegos, a la Dra. Guadalupe Alpuche y a la Dra. Ana Borbón por su acertada asesoría.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro Gutiérrez, Rodrigo Rafael (2005). *Evaluación práctica del aislamiento acústico de ductos utilizados para la ventilación forzada de viviendas*. Tesis de licenciatura. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Breesch, Hilde; De Meester, Bram; Klein, Ralf y Versele, Alexis (2011). "Evaluation of Passive Cooling in Low Energy Police Office. PLEA 2011 - 27th Conference on Passive and Low Energy Architecture". Lovaina la Nueva, 13-15 de julio, pp. 751-756.

- Bunge, Mario (1995). *La ciencia, su método y su filosofía*. México: Grupo Patria Cultural.
- Días Bordalo Junior, Hamilton (2010). *Estrategias de ventilación natural en edificios para la mejora de la eficiencia energética*. Tesina de maestría. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Giménez Arias, Jorge Enrique (2011). *Ökohaus, viviendas en el jardín*. Tesina de maestría. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Givoni, B. y Vecchia, F. (2001). "Predicting Thermal Performance of Occupied Houses". *The 18th International Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Florianópolis, 7-9 de noviembre.
- Inzunza, Juan Carlos (2005). "Clasificación de los climas de Köppen". *Ciencia... Ahora*, núm. 15, año 8, pp. 1-14.
- Krüger, Eduardo y Givoni, Baruch (2009). "Thermal Monitoring and Indoor Temperature Predictions in a Passive Solar Building in an Arid Environment". *Proceedings of ISES World Congress 2007*, (vol. I – vol. V), pp. 432-435.
- Marincic, I.; Ochoa, J. M.; Alpuche, M.G. y Gómez-Azpeitia, G. (2009). "Adaptive Thermal Comfort in Warm Dry Climate: Economical Dwellings in Mexico". *PLEA2009 - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Quebec, 22-24 de junio.
- Rodríguez Jaume, María José y Morar Catala, Rafael (2002). *Estadística informática: casos y ejemplos con el SPSS*. Alicante: Universidad de Alicante.