

Enfriamiento evaporativo indirecto: predicción del comportamiento térmico en ciudades brasileñas

CRUZ, Eduardo M. G.
KRÜGER, Eduardo L.¹

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. ekruger@utfpr.edu.br

Resumen

En este trabajo, se presentan las predicciones de temperatura interior de una edificación provista de un Sistema Pasivo de Enfriamiento Evaporativo Indirecto (SPEEI) como medio de climatización pasiva (Vivienda Bioclimática Prototipo-VBP-1) en cuatro ciudades del nordeste brasileño: Teresina, Petrolina, Fortaleza y Natal. La VBP-1 fue diseñada y construida en Maracaibo, Venezuela (latitud 10°34' N, longitud 71°44' W, elevación de 66 m sobre el nivel del mar) y monitoreada durante el periodo de febrero a septiembre de 2006. Basado en el análisis del comportamiento térmico del sistema y en la data de temperatura registrada durante una fase del monitoreo fueron desarrolladas las formulas predictivas de la temperatura máxima, media y mínima interior. Las mismas fueron validadas con la data de la segunda fase de monitoreo. Se evalúa en este trabajo la aplicabilidad de estas fórmulas para analizar el comportamiento térmico del sistema en condiciones climáticas diferentes a las que permitieron la generación de las mismas. La eficiencia del sistema de enfriamiento se evalúa en términos de su capacidad para reducir la temperatura media interna respecto a la exterior y del porcentaje del tiempo en que se logran condiciones de confort térmico. Los resultados muestran importantes capacidades de reducción de la temperatura interna (enfriamiento): 1.8oC en Teresina, 2.1oC en Petrolina, 1.1oC en Fortaleza y 1.4oC en Natal, y como consecuencia, el logro de condiciones de confort en todos los casos en la mayor parte del año.

Palabras-clave: comportamiento térmico, enfriamiento evaporativo indirecto, predicción de temperatura interior, clima tropical.

Abstract

In this paper, we present the indoor temperature predictions of a building provided with an indirect evaporative cooling system as a means of passive cooling (Vivienda Bioclimática Prototipo -VBP-1) in four cities in northeastern Brazil: Teresina, Petrolina, Fortaleza and Natal. The VBP-1 was designed and built in Maracaibo, Venezuela (latitude 10°34' N, longitude 71°44' W, elevation of 66 m above sea level) and monitored from February to September 2006. Predictive formulas that represent maximum, average and minimum indoor temperatures were developed based on the analysis of the thermal performance of the system and the data temperature recorded during part of the whole monitoring period. The formulas were validated against measurements taken independently in different time periods. This paper evaluates the applicability of these formulas to analyze the thermal performance of the system in different climatic conditions to those used to generate them. The cooling system efficiency is evaluated in terms of its capacity to reduce the indoor average temperature relative to outdoors and of the percentage of time in thermal comfort are achieved compared to outdoor comfort conditions. The results show significant cooling capacities to reduce indoor temperature: 1.8°C in Teresina, 2.1°C in Petrolina, 1.1°C in Fortaleza and 1.4°C in Natal, and consequently achieving comfort conditions in all cases, most of the year.

Keywords: thermal performance, indirect evaporative cooling, indoor temperature prediction, tropical climate.

1. Introducción

En lugares húmedos y calientes, se recomienda que las condiciones de temperatura interior se mantengan inferiores a las del exterior. Teniendo en cuenta que las fluctuaciones de temperatura al aire libre en estas condiciones son bastante pequeñas y la humedad es alta durante todo el día (Koenigsberger et al. 1974, Szokolay 1987, Givoni 1997), no resulta eficaz ni el uso de masa térmica, beneficiándose de enfriamiento nocturno, ni el enfriamiento por evaporación directa, la cual puede aumentar la humedad interior. En general, la recomendación es adoptar la ventilación cruzada permanente, como un medio de mejorar la pérdida de calor por evaporación sobre la superficie del cuerpo y eliminar el exceso de ganancia de calor. La ventilación natural debe pasar no sólo a través del edificio, sino además sobre la superficie del cuerpo de los ocupantes para aliviar la incomodidad térmica (Koenigsberger et al. 1974). Para tales climas, también es aconsejable construir viviendas con materiales de baja capacidad térmica, utilizando construcciones livianas. Sin embargo, la ventilación cruzada permanente durante el día en las construcciones livianas no permite bajar la temperatura interior por debajo de los niveles al aire libre. La temperatura máxima interior normalmente será muy cercana a la máxima exterior, que puede estar por encima del rango de confort humano.

Bajo tales condiciones climáticas, el uso de un sistema de enfriamiento por evaporación puede parecer a primera vista inadecuado. Un sistema de enfriamiento evaporativo directo sólo aumentará la humedad interior y no será muy eficiente, teniendo en cuenta el bajo potencial evaporativo en este tipo de clima. Sin embargo, sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto, como los estudiados experimentalmente por González (1997), se pueden utilizar para enfriar partes de la estructura del edificio sin aportar humedad adicional al aire interior. El sistema desarrollado consiste en utilizar un techo-estanco sobre el área a ser enfriada. La temperatura del agua en el estanque es cercana a la temperatura de bulbo húmedo promedio y el techo, enfriado por el estanque, actúa como un disipador de calor del espacio debajo de él.

El Sistema Pasivo de Enfriamiento Evaporativo Indirecto (SPEEI) utilizado en la Vivienda Bioclimática Prototipo (VBP-1) en Maracaibo, Venezuela, ha permitido reducciones de la temperatura media interior de 0.8oC por debajo de la temperatura media del ambiente. La reducción de la temperatura máxima interior alcanzado hasta 2.4oC en condiciones de funcionamiento óptimas y, debido a la alta capacidad térmica del techo-estanco, las fluctuaciones de temperatura interior han sido aproximadamente de un tercio de la oscilación de la temperatura exterior

(1.2oC en comparación con los 4oC del exterior) (González et al, 2006). Los resultados del monitoreo térmico confirmaron así el potencial de enfriamiento del sistema, incluso en el clima caliente-húmedo de Maracaibo.

El comportamiento térmico del SPEEI, en cuanto a sus temperaturas máximas, medias y mínimas, se puede determinar mediante la aplicación de fórmulas predictivas desarrolladas en base a datos resultado del monitoreo térmico del sistema. Se ha demostrado que es posible conocer el comportamiento térmico del SPEEI de la VBP-1 en condiciones climáticas diferentes a las que fueron utilizadas para generar las formulas predictivas que lo caracterizan, como fue evaluado en el caso de su aplicación en Sede Boquer (Kruger, González, Givoni, 2011). Esta investigación surge con el propósito de evaluar la aplicabilidad del SPEEI en otras regiones donde existe la necesidad de enfriamiento a lo largo de todo el año, y a la que se responde en general con el uso de sistemas convencionales de aire acondicionado, que tienen un impacto ambiental y energético importante. En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación de las formulas predictivas del SPEEI en cuatro ciudades del noreste brasileño, dos en la costa con condiciones climáticas cálidas y húmedas (Fortaleza y Natal) y dos del interior de condiciones climáticas cálidas y semiáridas (Teresina y Petrolina). La eficiencia del sistema de enfriamiento se evalúa en cada una de estas ciudades en términos de su capacidad para reducir la temperatura interna respecto a la exterior y del porcentaje del tiempo en que se logran condiciones de confort térmico comparado con las condiciones climáticas existentes.

2. La vivienda experimental VBP-1 en Maracaibo, Venezuela

La Vivienda Bioclimática Prototipo VBP-1 fue diseñada y construida en Maracaibo, como parte de un proyecto de investigación patrocinado por el sector privado y la Universidad del Zulia (LUZ). Este proyecto tuvo como objetivo, entre otros, aplicar los conocimientos adquiridos sobre materiales, criterios de diseño bioclimático para climas cálido-húmedos y sistemas pasivos de enfriamiento en una vivienda de bajo costo (González et al. 2000).

Esta vivienda experimental se encuentra ubicada en un sector de la ciudad en proceso de consolidación. Está situada en una parcela de 12 de ancho y 20 m de fondo, con su eje principal este-oeste (figura 1). La superficie total construida es de 87 m² en su primera etapa y consta de una área común con cocina, comedor y área social, dos dormitorios (NB y SB), servicio con baño separado y un

espacio independiente (colindante con el espacio publico), que puede ser utilizado por la familia para actividades comerciales. Un patio central en la fachada sur y otro de menor tamaño hacia este, son parte de la vivienda.

El sistema constructivo utilizado se basa en una estructura de concreto armado tradicional con una cubierta a base de viguetas y elementos prefabricados con concreto aligerado. Los cerramientos verticales están compuestos por paredes

fabricadas con bloques de cemento aligerado y bloques de ventilación. La tabla 1 presenta un resumen de las características termo-físicas de la envolvente de la VBP-1.

La zona de dormitorios contempla un Sistema Pasivo de climatización basado en Enfriamiento Evaporativo Indirecto (SPEEI) instalado en el techo de la zona de dormitorios (figuas 2 y 3). En este sistema, el agua, expuesta a un flujo de aire controlado con un pequeño extractor, reduce su temperatura hasta acercarse a la temperatura de bulbo húmedo (TBH) del ambiente. Una lámina metálica cubierta por una película de polietileno sirve de soporte al agua y permite una

Tabla 1: Características termo-físicas de la envolvente de la VBP-1

<i>Materiales</i>	<i>Conductividad (W/mK)</i>	<i>Densidad (kg/m³)</i>	<i>Calor específico (J/kgK)</i>
<i>Paredes externas (de adentro a fuera)</i>			
20mm friso de cemento y arena	0,698	1800	1005
150mm bloque de cemento hueco	0,499 (e)	1800	$\rho C_p = 3.272 * 10^6$
20mm friso de cemento y arena	0,698		
<i>Paredes internas (de adentro a fuera)</i>			
20mm friso de cemento y arena	0,698	1800	1005
150mm bloque de cemento hueco	0,499 (e)	1800	$\rho C_p = 3.272 * 10^6$
20mm friso de cemento y arena	0,698		
<i>Piso (de adentro a fuera)</i>			
50mm cemento hueco	0,53	1570	1000
120mm Concreto vaciado	1,75	2300	920
<i>Techo (de adentro a fuera)</i>			
Vigas de concreto prefabricadas	1,75	2300	920
3mm lámina de acero	46	7900	454
0,2mm Pelicula de polietileno	0,33	1526	1645
30~40mm Agua	0,582	1000	4187
300~900mm Cámara ventilada	0,026	1,223	1063
0,2mm Pelicula de polietileno	0,33	1526	1645
200~300mm Cámara ventilada	0,026	1,223	1063
10mm lámina de poliestireno	0,036	41	1500
0,8mm Lámina galvanizada Pin blanc	46	7900	454
<i>Aberturas</i>			
	<i>Área neta (m²)</i>	<i>U (W/m² K)</i>	<i>Transmitancia solar (%)</i>
2 Ventanas de vidrio batiente	2,80	5,73	80
2 puertas de madera contrachapada	3,20	2,09	0

Figura 1: Planta de La vivienda VBP-1

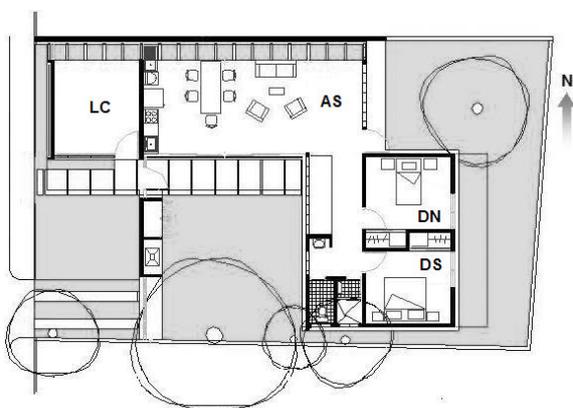


Figura 2: Esquema del SPEEI

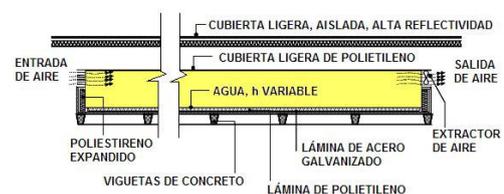


Figura 3: El techo-estanque sobre dormitorios



Tabla 2: Fórmulas predictivas para el techo-estanque (pond) y para los dormitorios norte (NB) y sur (SB)

$Pond = 3.67 + 0.6449*WBT + 0.3261*Tavg - 0.0638*Swing - 1.68*Water - 0.5*Fans$	Eq.1
$SB_Max = -0.15 + 0.1333*Tavg + 0.6477*Pond + 0.2312*RnAvg + 0.1985*Swing + 0.8*Use$	Eq.2
$SB_Avg = -1.0 + 0.1568*Tavg + 0.5925*Pond + 0.2899*RnAvg + 0.0406*Swing + 0.7*Use$	Eq.3
$SB_Min = 1 + 0.5414*Pond + 0.3298*RnAvg + 0.0932*Tmin + 0.41*Use - 0.0668*Tdrop$	Eq.4
$NB_Max = -1.8 + 0.1616*Tavg + 0.5455*Pond + 0.3732*RnAvg + 0.113*Swing$	Eq.5
$NB_Avg = -2.3 + 0.1744*Tavg + 0.5319*Pond + 0.381*RnAvg + 0.0011*Swing$	Eq.6
$NB_Min = 1 + 0.5414*Pond + 0.3298*RnAvg + 0.0932*Tmin - 0.0668*Tdrop$	Eq.7

Leyenda:

WBT – Temperatura de bulbo húmedo

Tavg – Temperatura media diaria exterior

Tmin – Temperatura mínima diaria exterior

RnAvg – Temperatura media de los 10 días previos

Swing – Amplitud de la temperatura diaria (Tmax-Tmin)

Pond – Temperatura del agua en el techo-estanque (Eq.1)

Tdrop o Tmax(n-1) -Tmin – Diferencia de temperatura entre máxima del día anterior y mínima del día actual.

Para ‘Use’ (uso del dormitorio sur): 1 = si; 0 = sin uso

Para ‘Fans’: 0 = extractor apagado; 1 = Uso de extractor de 8"; 2 = Uso de extractor de 8" y Uso de extractor de 14"

Para ‘Water’: 0 = sin agua en el techo-estanque; 1 = con agua en el techo-estanque

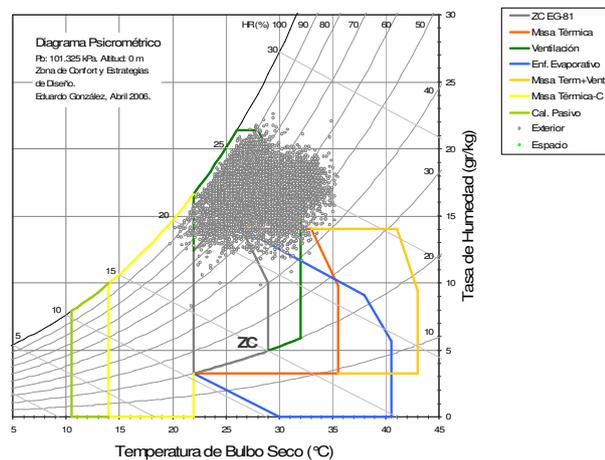
rápida transmisión de calor desde el interior de la habitación hacia el agua. El estanque de agua contempla una doble cubierta. La primera, una película de polietileno que limita el acceso de insectos, polvo y suciedad. La segunda, la cubierta exterior, de lámina metálica aislada por la superficie interior. Se produce, de este modo, una cámara de aire ventilada únicamente a través de tres conductos de entrada, debidamente protegidos con malla mosquitero, y uno de salida controlado por un extractor eléctrico.

2.1. El clima de la ciudad de Maracaibo

El clima de la ciudad de Maracaibo (latitud 10o 34' N, longitud 71o44' W, altitud 66 m sobre el nivel del mar) es clasificado como caliente y húmedo. Se caracteriza por temperaturas y humedades relativas que varían muy poco durante el año; sus valores medios oscilan de 27oC a 28.6oC y de 70% a 80% respectivamente, con amplitudes medias de 7oC a 9oC. Los datos horarios de temperatura y humedad relativa de la data climática de la estación meteorológica de Caujarito, del año 2000 se presentan en la figura 4.

Durante el año se observan dos períodos de viento bien definidos. El primero, con régimen de vientos alisios, en los meses de diciembre a abril, con velocidades medias de 3 a 5 m/s. El segundo, de mayo-noviembre, con vientos muy débiles, variables en dirección y velocidad con predominio de tiempo de calma, especialmente entre 8 a.m. y 3 p.m. La precipitación anual promedio varía entre 450 y 550 mm y la radiación global media diaria es de 4.2 kWh/m².

Figura 4: Data climática de Maracaibo



2.2. Generación de las fórmulas predictivas

Las fórmulas de predicción se han desarrollado para el SPEEI de la vivienda VBP-1 de acuerdo con el procedimiento descrito en Givoni y González (2009), basándose en los datos obtenidos durante nueve meses de monitoreo de la construcción experimental. Los datos se dividen en dos secciones, unos que se utilizaron para la generación y otros para la validación de las fórmulas.

El techo-estanque encima de los dos dormitorios ha proporcionado el enfriamiento evaporativo indirecto a los dormitorios debajo de este. Por lo tanto, una representación matemática de la temperatura del techo-estanque se necesitaba como una variable en la generación de las fórmulas de las temperaturas interiores máximas, media y mínima. Las variables de entrada en la fórmula que representa la temperatura

media del techo-estaque son la temperatura media diaria del aire (T_{avg}) y la temperatura de bulbo húmedo (WBT), la amplitud de la temperaturas diaria (Swing), la disponibilidad de agua en el estanque (Water) y el funcionamiento del extractor (Fans). La fórmula de la temperatura del techo-estaque (pond), así como las fórmulas de predicción para cada habitación se generaron a partir de los datos experimentales por análisis de regresión múltiple y se muestran en la Tabla 3. Los coeficientes de correlación entre las temperaturas medidas y las calculadas variaron dentro del rango 0.85-0.96. Dado que, el dormitorio norte no fue utilizado nunca durante el período de monitoreo, la variable “uso” no se ha incluido en las fórmulas correspondientes.

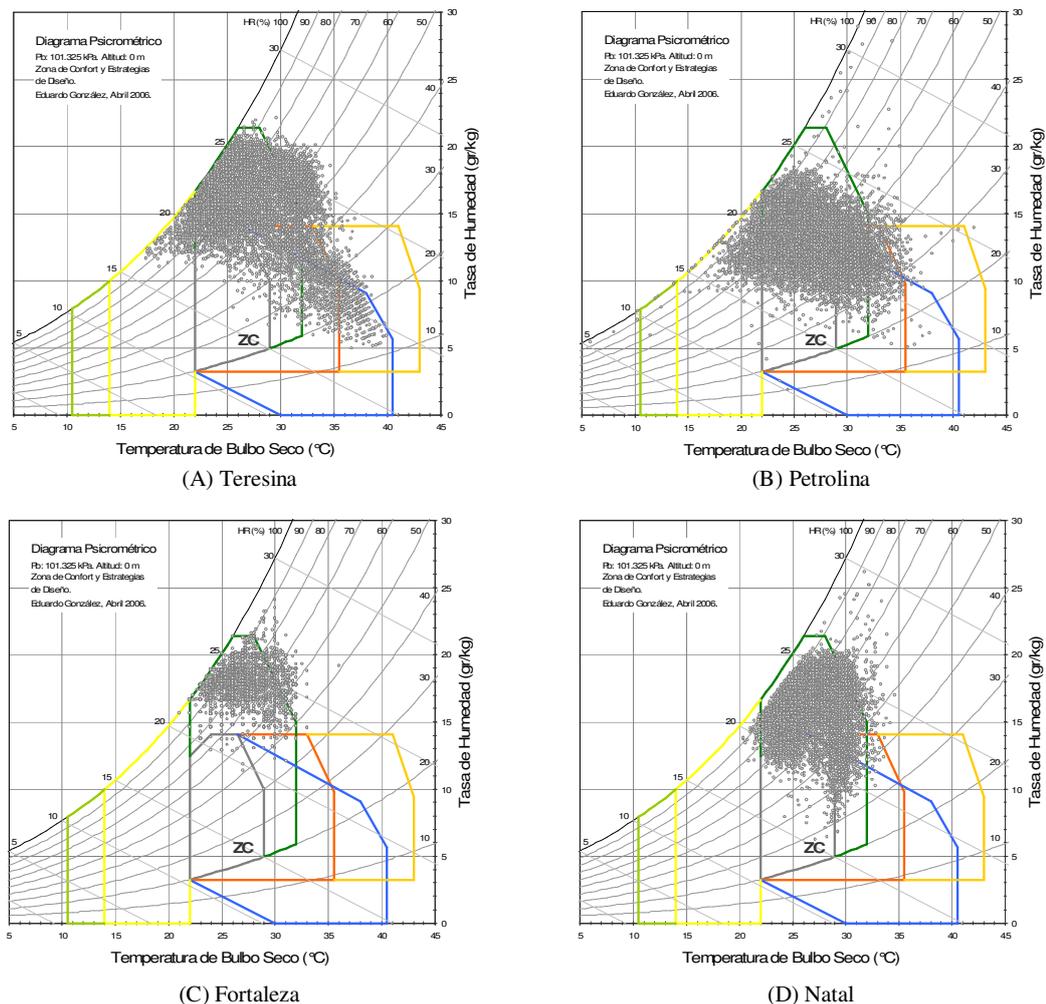
3. La vivienda VBP-1 en cuatro ciudades de Brasil

Se han seleccionado cuatro ciudades del noreste brasileño para hacer un primer estudio de aplicación del SPEEI en esta región. Por un lado han sido seleccionadas las ciudades de Teresina (lat. 5.05oS) y Petrolina (lat. 9.35oS) dos ciudades donde, en principio, se estimó que su aplicación podía ser

bastante eficaz dada sus condiciones de altas temperaturas medias máximas (Teresina = 34.1oC y Petrolina = 31.7oC) acompañadas de amplitudes medias diarias relativamente altas (Teresina = 11.5oC y Petrolina = 9.7oC). Estos climas presentan diferencias medias de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo relativamente buenas para el aprovechamiento de esta técnica de enfriamiento pasivo (Teresina = 4.8oC –max de 9.7oC- y Petrolina = 5.8oC –max de 10.3oC-).

Por otro lado, se ha querido evaluar el comportamiento del sistema en ciudades con condiciones climáticas parecidas a las de Maracaibo. Para ello se han seleccionado las ciudades costeras de Fortaleza (lat. 3.78oS) y Natal (lat. 5.8oS). Estas ciudades presentan también temperaturas máximas relativamente altas a lo largo de todo el año (Fortaleza = 30.5oC y Natal = 30.6oC), pero con amplitudes de temperatura medias algo menores (Fortaleza = 6.2oC y Natal = 6.6oC). La depresión diaria promedio anual de T_{bh} es inferior a las observadas en Teresina y Petrolina (Fortaleza = 3.0oC –max de 4.8oC- y Natal = 3.8oC –max de 6.2oC-).

Figura 5: Datos de temperatura y humedad horarios sobre diagrama psicrométrico y estrategias de diseño bioclimático.



En las figuras 5 (A, B, C y D) se presentan los datos horarios de temperatura y humedad de cada una de las ciudades seleccionadas sobre el diagrama psicrométrico, la zona de confort y las estrategias de climatización. Puede observarse a simple vista que la mayor parte del año, en las cuatro ciudades, las condiciones se encuentran fuera de la zona de confort. Esto se hace más evidente en el caso de Fortaleza, Natal y Teresina con 94.3%, 87.3% y 82% respectivamente fuera de confort, un poco menos en Petrolina, donde sin embargo, este valor alcanza el 55.4%, esto de acuerdo al programa de análisis climático ABC V- 1.3 (Roriz, 2006). El mismo programa de análisis climático indica que el enfriamiento evaporativo podría ser aplicado como estrategia de climatización el 16.1% del tiempo en Teresina, el 19.2% en Petrolina, el 4.4% en Fortaleza y el 6.6% en Natal. Así mismo, en referencia al uso de la inercia térmica, indica los siguientes valores: 10.1% en Teresina, el 17.4% en Petrolina, el 4.4% en Fortaleza y el 6.6% en Natal. Es evidente que con estos valores sería ilógico proponer estrategias semejantes, para el diseño de una vivienda en estas ciudades. Sin embargo el “sistema” que constituye el SPEEI y la zona de dormitorios de la VBP-1 tiene entre sus características la utilización del enfriamiento evaporativo, de manera indirecta y la inercia térmica.

4. Análisis del comportamiento térmico

En esta sección se presenta el análisis y discusión de los resultados de la aplicación de las fórmulas predictivas del SPEEI a la data climática de las cuatro ciudades brasileñas: Teresina, Petrolina, Fortaleza y Natal. Los archivos climáticos han sido obtenidos de la base de datos disponible en el sitio WEB del LabEEEE: <http://www.labeeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-epw>. Los datos horarios de temperatura y humedad relativa han sido utilizados para generar los datos horarios de la temperatura de bulbo húmedo y con ellos la base de datos de temperaturas máximas, medias y mínimas diarias para cada día del año y de cada localidad. Las

fórmulas predictivas han sido aplicadas a las cuatro bases de datos y determinadas para, cada día del año, la temperatura media del agua en el techo-estanco (pond) y las temperaturas máximas, medias y mínimas, de los dormitorios norte y sur (NB y SB). En este trabajo se analizan los resultados obtenidos para el dormitorio norte (NB). En las figuras 6 (A, B) y 7 (A, B) se presentan, para los meses de abril y octubre, las Temperaturas max, med y min en DN y ambiente exterior con límites de confort de referencia de cada ciudad. A continuación se presentan los análisis de eficiencia de enfriamiento y de condiciones de confort térmico.

4.1. Análisis de eficiencia de enfriamiento

Nos referimos como eficiencia de enfriamiento en este trabajo, a la capacidad del SPEEI para reducir la temperatura media interior del dormitorio norte respecto a la temperatura media exterior. Se entiende como enfriamiento a la capacidad del sistema para llevar la temperatura interior a valores inferiores a la temperatura media exterior (Tavg). Cuanto mayor sea la diferencia entre la temperatura media exterior y la media interior (DBTavg- DNavg) mayor su eficiencia de enfriamiento.

En el caso de Teresina (figura 6A). El potencial de enfriamiento del ambiente para un SPEEI esta marcado por la depresión de la temperatura de bulbo húmedo (WBT) esto es la diferencia entre la temperatura de bulbo seco (DBT) y la WBT (Givoni, 1994). En la data climática de esta ciudad el valor medio de depresión de WBT es de 4.8oC. La temperatura media interior es en promedio diario anual 1.8oC inferior a la DBTavg. (DBTavg = 27.7oC, DNavg = 25.9oC). Esta diferencia llega a ser hasta de 4.4oC como valor máximo. La temperatura máxima en el NB es 6.6oC en promedio inferior a DBTmax, llegando a ser en oportunidades de hasta 11oC la diferencia. La DNmax no solo es inferior a la DBTmax sino que es incluso inferior en promedio a la DBTavg en 0.3oC. Esta diferencia llega a ser hasta 2.2oC inferior. Es

Figura 6: Temperatura max, med y min en DN y ambiente exterior en abril y octubre con limites de confort de referencia.

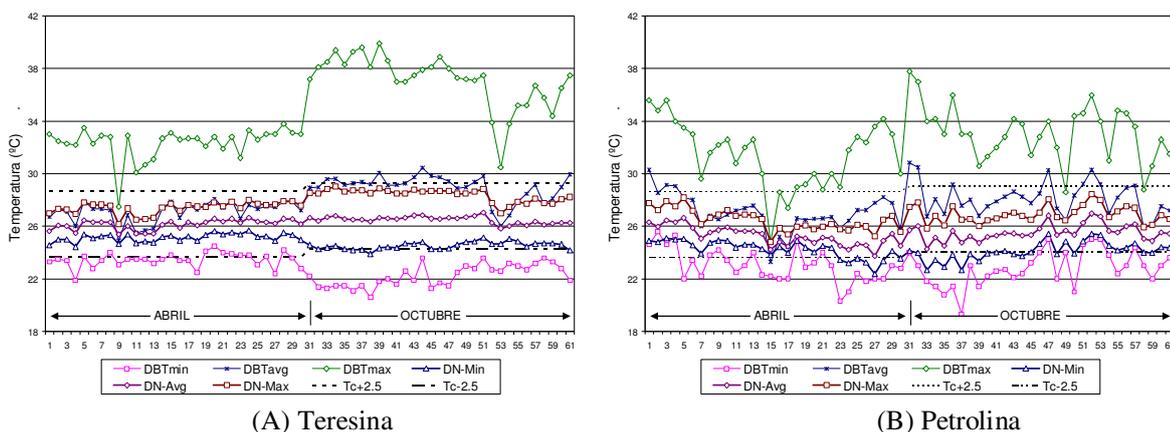
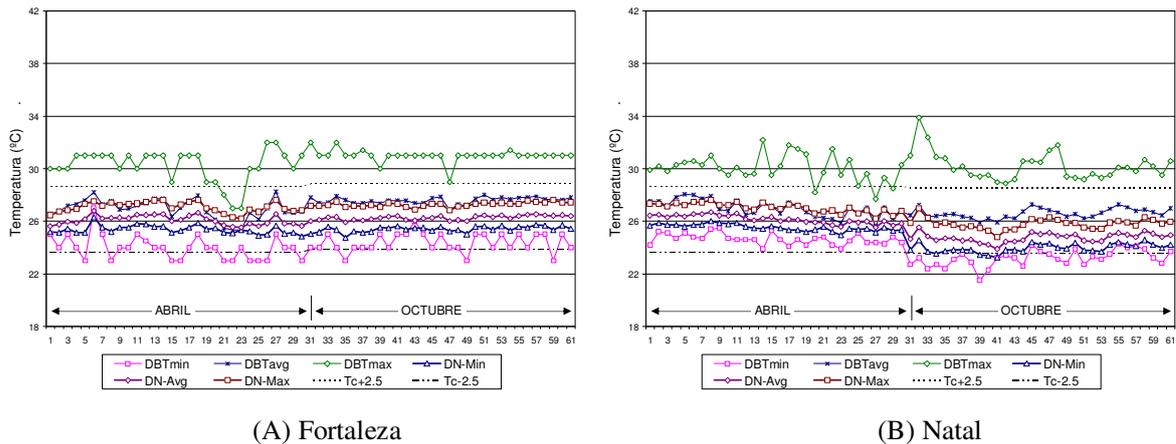


Figura 7: Temperatura max, med y min en DN y ambiente exterior en abril y octubre con limites de confort de referencia.

(A) Fortaleza

(B) Natal

importante resaltar que frente a una amplitud exterior media anual de 11.5oC (que puede llegar hasta 18oC), el dormitorio presenta una amplitud diaria media anual de 3.0oC (factor decremental = 0.26), lo que significa unas condiciones internas muy estables debido al empleo de masa térmica. Como se ve en la figura 6A, en esos dos meses de condiciones extremas, las temperaturas del dormitorio están prácticamente siempre dentro de los limites de confort. Así pues, se constata la capacidad de enfriamiento neto importante donde hay un notable descenso de las temperaturas interiores respecto al exterior.

En el caso de Petrolina (figura 6B). En este caso el valor medio de depresión de WBT es de 5.8oC, es decir 1oC superior a Teresina. Como consecuencia de lo anterior la temperatura media interior es 2.1oC inferior a la exterior. (DBTavg = 26.8oC, DNavg = 24.6oC). En relación con la temperatura media máxima, en el dormitorio es 5.6oC inferior a DBTmax. En este caso la temperatura media máxima del dormitorio es también inferior a la media exterior en 0.8oC de promedio. La amplitud exterior media anual de 9.7oC (alcanza valores hasta 19oC), mientras el dormitorio presenta una amplitud media diaria de 2.5oC. Esto representa un factor decremental = 0.26, al igual que en Teresina. Resulta interesante comparar este valor con el factor decremental del dormitorio calculado a partir de los datos medidos durante el monitoreo, que fue igual a 0.29, valor muy cercano al arrojado al aplicar las formulas predictivas. Como vemos una característica del sistema que se estudia es su FD. Aun cuando el tema del confort térmico será analizado en forma detallada más adelante, conviene observar desde ya en la figura 6B como las temperaturas del dormitorio se encuentra dentro de los limites de confort salvo por ciertos valores que son menores al límite inferior de la zona de confort. Como en Teresina, también aquí se constata una capacidad de enfriamiento neto muy importante que permite pensar en alternativas pasivas de climatización basada en estos sistemas.

En el caso de Fortaleza (figura 7A). Se observa un valor de depresión de WBT menor que en los casos anteriores (3.0oC). Como consecuencia de esto la temperatura media interior es 1.1oC inferior a la exterior. (DBTavg = 27.2oC, DNavg = 26.2oC). Sin embargo, como puede verse en la figura 7A, el sistema logra reducir las temperaturas máximas y medias de tal forma que todo el tiempo permanecen dentro del rango de confort. La temperatura media máxima del dormitorio es en promedio 3.4oC inferior a la exterior. Así como en los casos anteriores el FD es 0.26 debido a presentar un amplitud media diaria de 1.7oC frente a los 6.6oC del ambiente exterior. El clima de esta ciudad, si bien no tiene el potencial de enfriamiento evaporativo que caracterizan a Teresina y Petrolina, permite que el SPEEI sea más eficiente que en los dos casos anteriores en cuanto a mantener las temperaturas dentro del rango de confort.

En el caso de Natal (figura 7B). El valor de la depresión de WBT en este caso es algo mayor que en Fortaleza (3.8oC contra 3.0oC), lo que va acompañado de un aumento de la capacidad de enfriamiento que se expresa por la reducción de la temperatura media diaria del dormitorio en 1.4oC por debajo de la media exterior (DBTavg = 26.9oC, DNavg = 25.5oC). Este valor de reducción de temperatura llega a ser hasta de 2.5oC como valor máximo. El sistema es capaz de reducir la temperatura máxima diaria en un valor promedio de 4oC, reducción que alcanza valores hasta de 7.4oC. También en este caso la temperatura media máxima en el dormitorio es en promedio inferior a la DBTavg (0.4oC). Se observa en la Figura 7B que las temperaturas máximas, medias y mínimas permanecen dentro del rango de confort prácticamente todo en tiempo de los dos meses mostrados. Se hace evidente la menor capacidad de enfriamiento del sistema en el mes de abril cuando las amplitudes externas son menores que en el mes de octubre. En octubre la amplitud interna aumenta y se logra una reducción mayor de las temperaturas. La amplitud media exterior es de 6.6oC (con valores hasta 12,2oC), mientras en el dormitorio es de 1.8oC. Como

en los tres casos anteriores el FD = 0.26. Una vez más se confirma con estos resultados la capacidad de enfriamiento del SPEEI en condiciones climáticas donde ni el enfriamiento evaporativo ni la masa térmica son estrategias recomendadas.

4.2. Análisis de confort térmico

Para realizar el análisis de confort térmico de los casos de estudio se ha tomado como referencia los límites establecidos en el rango de confort adaptativo calculado en base a la norma ASHRAE Standard 55 para edificaciones ventiladas naturalmente (De Dear R, Brager GS, 2002), lo que constituye un nuevo estándar de confort adaptativo que considera la aceptación de temperaturas más cálidas en interiores de edificios con ventilación natural en verano y en zonas climáticas más cálidas. De acuerdo con este estándar la temperatura de confort (Tconf) se calcula a partir de la temperatura media mensual del ambiente con la siguiente fórmula:

$$T_{conf} = 17.8 + 0.31 \times T_{med-ext} \quad (8)$$

Donde $T_{med-ext}$ es la temperatura media del mes

Se han calculado las temperaturas medias mensuales y a partir de ellas, se ha determinado el rango de confort con $\pm 2.5^{\circ}C$ para una aceptabilidad del 90%. Estos rangos de confort varían entre: $23.5^{\circ}C$ y $29.4^{\circ}C$ en Teresina, $22.8^{\circ}C$ y $29.2^{\circ}C$ en Petrolina, $23.5^{\circ}C$ y $28.9^{\circ}C$ en Fortaleza y $23.4^{\circ}C$ y $28.9^{\circ}C$ en Natal.

Las temperaturas máximas, medias y mínimas diarias, calculadas con las fórmulas predictivas han sido comparadas con los límites superior e inferior de confort adaptativo para cada ciudad. Los resultados se presentan en la tabla 3 y las figuras 8(A, B) y 9(A, B). Se puede observar que las temperaturas del ambiente externo superan el límite superior de confort en las cuatro ciudades casi todos los días del año (99%, 91%, 91% y 94%). La DBTmax supera el límite superior de confort diariamente como promedio en: $5.2^{\circ}C$ Teresina (hasta en $10.6^{\circ}C$), $3.0^{\circ}C$ Petrolina (hasta $12.8^{\circ}C$), $1.8^{\circ}C$ Fortaleza (hasta $7.2^{\circ}C$) y $1.9^{\circ}C$ Natal (hasta $5.7^{\circ}C$). Los resultados indican que el dormitorio de la VBP-1, frente a las condiciones indicadas alcanza el 100% de confort térmico en Teresina, Fortaleza y Natal, y 94% en Petrolina. Cuando se analizan del mismo modo los valores mínimos calculados, en relación con el límite inferior de confort, vemos que las dos ciudades con mayor potencial de enfriamiento evaporativo, como son Teresina y Petrolina, presentan 19% y 54% de disconfort; esto representa las horas tempranas de la mañana cuando la temperatura del dormitorio es más baja, en los días cuando esto sucede es de: $0.6^{\circ}C$ Teresina (hasta $1.8^{\circ}C$), $0.9^{\circ}C$ Petrolina (hasta $3.8^{\circ}C$). Mientras en Fortaleza las temperaturas mínimas siempre están dentro de la zona de confort, en Natal un 5.5% del tiempo son inferiores y cuando esto sucede el promedio de la temperatura es de tan solo $0.2^{\circ}C$ inferior al límite de confort, pudiendo llegar como valor máximo de $0.6^{\circ}C$.

Los resultados presentados nos permiten concluir

Tabla 3: Porcentajes de confort/disconfort en el SPEEI (DN-con enfriamiento) y ambiente exterior.

		Dormitorio Norte			Ambiente externo		
		DN-Max	DN-Med	DN-Min	TBS-Max	TBS-Med	TB-Min
Teresina	Disconfort	0	1	19	99	16	84
	Confort	100	99	81	1	84	16
Petrolina	Disconfort	4	18	54	91	18	86
	Confort	96	82	46	9	82	14
Fortaleza	Disconfort	0	0	0	94	1	21
	Confort	100	100	100	6	99	79
Natal	Disconfort	0	0	5	94	0	38
	Confort	100	100	95	6	100	62

Figura 8: Porcentajes de confort/disconfort en el SPEEI (DN-con enfriamiento) y ambiente exterior.

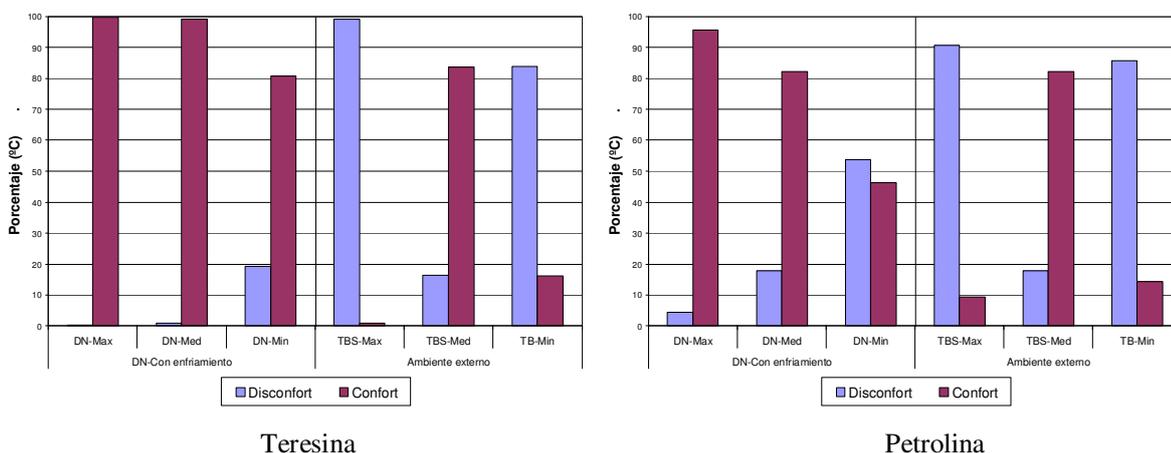
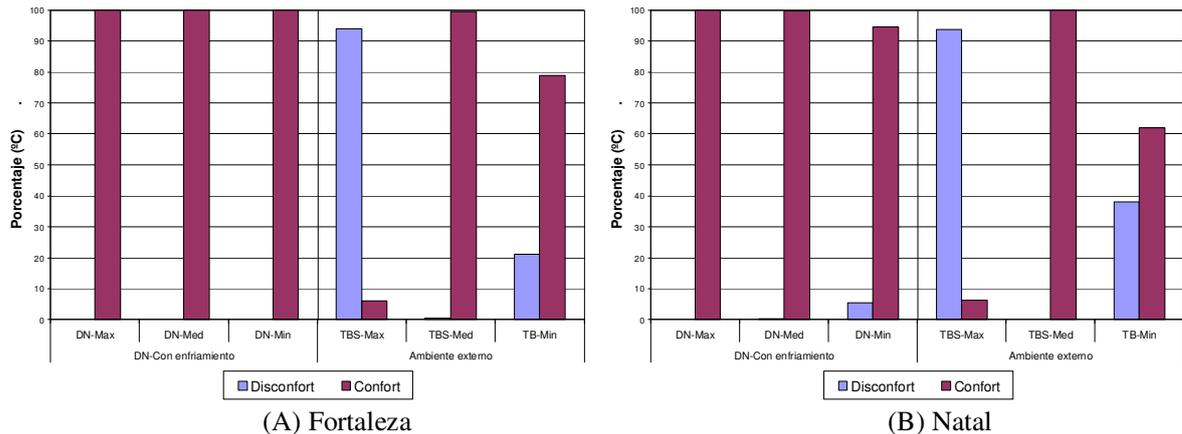


Figura 9: Porcentajes de confort/discomfort en el SPEEI (DN-con enfriamiento) y ambiente exterior.

que la aplicación de un SPEEI, como este utilizado en la VBP-1, es altamente eficiente para alcanzar condiciones de confort en las ciudades de Fortaleza y Natal. Resulta igualmente eficiente para las ciudades de Teresina y Petrolina en relación al control de las temperaturas máximas, pero con relación a las mínimas un ajuste en el sistema, como podría ser aumento de la cantidad de agua en el estanque, debería estudiarse para lograr condiciones de confort todo el año.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha demostrado la aplicabilidad de un SPEEI como el implementado en la VBP-1 en condiciones climáticas como las existentes en las ciudades de Teresina, Petrolina, Fortaleza y Natal, localizadas en el noreste brasileño entre las latitudes 30N y 90N. Se han aplicado a estas ciudades las formulas que predicen el comportamiento térmico (temperatura máxima, media y mínima) de la zona de dormitorios de la VBP-1, que dispone de un SPEEI. Los resultados de la aplicación de dichas formulas corroboran las hipótesis iniciales en cuanto a la eficiencia de enfriamiento del SPEEI en estas localidades. Se ha determinado la capacidad del sistema para reducir la temperatura media interior respecto a la media exterior (enfriamiento), que es de: 1.80C en Teresina, 2.10C en Petrolina, 1.10C en Fortaleza y 1.40C en Natal. Los resultados muestran, así mismo, una capacidad para reducir la temperatura máxima interior respecto al exterior en promedio de: 6.60C en Teresina, 5.70C en Petrolina, 3.40C en Fortaleza y 4.00C en Natal. Es oportuno recordar la capacidad de reducción de la temperatura media y máxima interior del sistema en las condiciones climáticas de Maracaibo, donde fueron generadas las formulas predictivas, estas son en promedio: 1.40C y 4.90C inferiores a la media y a la máxima exterior respectivamente, en base a la data climática de un año (data climática: FAV-2000).

El análisis de los resultados en relación al rango de

confort adaptativo permite concluir que el sistema aplicado en estas regiones es muy eficiente, pues se alcanzan condiciones de confort durante todo el año en Fortaleza y Natal, mientras en los casos de Teresina y Petrolina el tiempo en que resultan “inconfortables” es porque se alcanzan temperaturas interiores ligeramente inferiores al limite bajo de la zona de confort. Consideramos que esto, en vez de ser un inconveniente puede ser utilizado como una ventaja. En estas ciudades podría ser necesaria una revisión del sistema, en cuanto a la cantidad de masa de agua necesaria para alcanzar 100% de confort térmico.

6. Referências Bibliográficas

- ASHRAE, 2004, Standard 55 - **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, ASHRAE Inc.
- De Dear R, Brager GS. **Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE standard 55**. Energy and Buildings 2002;34:549–63.
- Givoni B, González E. **Thermal Performance of Indirect Evaporative Cooling in a Tropical Climate**. *Proceedings*, ASES 2009, Buffalo, USA, 2009.
- Givoni B. **Climate considerations in building and urban design**. New York: ITP; 1997.
- Givoni B. **Passive and Low-Energy Cooling of Buildings**. New York: Van Nostrand Reinhold; 1994.
- González E, Machado MV, Rodríguez L, León G, Soto MP, Almaso N. **VBP-1: A Sustainable Urban House for Low-Income Family in a Tropical Climate**. PLEA 2000. Cambridge, UK, 2000.
- González E. **Étude de matériaux et de techniques du bâtiment pour la conception architecturale bioclimatique en climat chaud et humide**. Thèse de Doctorat en Energétique de l'École des Mines des Paris, France, 1997.

González, E., Rojas A., Bravo G., Gallardo M., González R., Pérez L., Tsói E, Falcón R. **Desempeño térmico de la VBP-1: temperaturas características, factor decremental y retraso térmico**. Memorias de la 30 Semana Nacional de Energía Solar, ANES 2006, Veracruz, México.

Koenigsberger O, Ingersoll T, Mayhew A, Szokolay S. **Manual of tropical housing and building**. London: Longman; 1974.

Kruger, E., González, E., Givoni, B. **Effectiveness of indirect evaporative cooling and thermal mass in a hot arid climate**. Building and Environment 45 (2010) 1422–1433

Roriz M. **ABC (Architectural Bioclimatic Classification) software. Brazil: Universidade Federal de São Carlos UFSCar**, 2006. Szokolay SV. Thermal design of buildings. Canberra: RAI Education Division; 1987.

LabEEE, **Archivos climáticos**. Disponible en: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-epw>

7. Agradecimientos

Se agradece a CAPES por la beca otorgada al Prof. Eduardo Manuel González Cruz, dentro del “Programa CAPES/Professor visitante do exterior – PVE”, para participar durante el año 2013 en el Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo del Departamento de Arquitetura e Urbanismo de la Universidade Federal de Santa Catarina, lo que ha hecho posible la presentación de este trabajo en ENCAC 2013.