



Herrera Sosa, Luis Carlos (2019).

ORCID: [0000-0002-7663-200X](https://orcid.org/0000-0002-7663-200X)

Arena Granados, Alejandro Pablo (2019).

Gómez-Azpeitia, Gabriel (2019).

ORCID: [0000-0001-5316-6483](https://orcid.org/0000-0001-5316-6483)

Costo y rentabilidad de diversas estrategias bioclimáticas en viviendas con enfriamiento evaporativo directo en función del ciclo de vida.

p. 215-229

En:

Hábitat sustentable III / Sergio Padilla Galicia y Víctor Fuentes Freixanet, compiladores. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, 2019. (Colección Arquitectura y urbanismo internacional)

Fuente: ISBN 978-607-28-1753-1 (versión electrónica)

Universidad Autónoma Metropolitana
Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

<https://www.azc.uam.mx/>

CYAD
Ciencias y Artes para el Diseño

<https://www.cyad.online/uam/>

ÁREA
Arquitectura Urbana Internacional
au

<http://aui.azc.uam.mx/aui/>

Repositorio Institucional

Zaloamati

"Preservar con amor y cariño el saber"

<http://zaloamati.azc.uam.mx>



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como

Atribución-NoComercial-SinDerivadas

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

D.R. © 2019. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Se autoriza copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato, siempre y cuando se den los créditos de manera adecuada, no puede hacer uso del material con propósitos comerciales, si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado. Para cualquier otro uso, se requiere autorización expresa de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.

Costo y rentabilidad de diversas estrategias bioclimáticas en viviendas con enfriamiento evaporativo directo en función del ciclo de vida

Luis Carlos Herrera Sosa

Coautores

Alejandro Pablo Arena Granados

Gabriel Gómez-Azpeitia

PALABRAS CLAVE:

enfriamiento evaporativo, estrategias de bioclimatización, costo de ciclo de vida

KEYWORDS:

evaporative cooling, bioclimatic strategies, life cycle cost

RESUMEN

En las regiones de clima cálido seco en México se ha extendido el uso de equipos de enfriamiento evaporativo directo que consumen altas cantidades de energía y agua, de ahí la necesidad de desarrollar un proyecto experimental con estrategias conservativas y bioclimáticas puestas en práctica en viviendas mínimas provistas de ese tipo de equipos en la ciudad de Chihuahua, México, a fin de reducir en lo posible su tiempo de operación. Las estrategias aplicadas fueron: instalación de termostato para control de encendido del equipo de enfriamiento evaporativo directo; aislamiento térmico adicional en cubierta; protección solar en ventanas; aislamiento térmico y protección solar del equipo de enfriamiento evaporativo directo; incremento de masa térmica en muros; y ventilación nocturna superpuesta a las anteriores. Se presentan los resultados en términos de ahorro de agua y energía y los beneficios asociados al ahorro de energía y de agua, con una perspectiva de ciclo de vida.

ABSTRACT

The use of direct evaporative cooling in dry hot regions in Mexico is extensive with the consequent high consume of power and water. Therefor an experimental project was conducted in which six conservative and bioclimatic strategies were incorporated to low-cost housings conditioned with direct evaporative cooling, to reduce as possible its operation periods. The applied strategies in housing units in the city of Chihuahua, were: installation of a thermostatic control; additional thermal insulation on the roof; solar protection for windows; thermal insulation and solar protection of the direct evaporative cooling equipment; increase of thermal mass of walls; and night ventilation which were overlapped with all the previous options. In this paper, the results about power and water savings are presented, in addition, the economic consequences associated with these conservative and bioclimatic measures are analyzed, considering the additional costs required for their installation and operation, and the benefits associated with the savings of energy and water, using the life cycle cost method.

Universidad Autónoma
de Ciudad Juárez
carlos.herrera@uacj.mx

Introducción

El costo creciente de la energía, el agotamiento de los recursos naturales y el problema del cambio climático a nivel mundial, demandan cada vez más que los edificios sean concebidos y planeados con criterios bioclimáticos a fin de que se alcancen niveles de confort térmico adecuados para los habitantes con el menor consumo de recursos posible. Desafortunadamente esta exigencia aún no ha sido atendida por los profesionales de la arquitectura en México, ya sea por cuestiones económicas, sociales, o por desconocimiento de las técnicas y estrategias aplicables. En la mayoría de los casos se siguen atendiendo las necesidades de confort en los edificios por medio de dispositivos que consumen energías convencionales.

En este contexto, el clima árido seco de la ciudad de Chihuahua, al norte de México, obliga a enfriar las edificaciones durante casi seis meses al año; para lograrlo es usual que se utilicen equipos de enfriamiento evaporativo directo (EED), debido a su bajo consumo de energía, a la simplicidad de su instalación, en comparación con otros sistemas de enfriamiento, y a su eficiencia de refrigeración, pero a expensas de un alto consumo de agua. El EED alcanza su mayor potencial refrigerante cuando las condiciones atmosféricas presentan altas temperaturas y escasa humedad. Paradójicamente en los climas donde predominan estas características el agua resulta ser un recurso limitado y cada vez más amenazado, este justamente es el caso del estado de Chihuahua. De mantenerse esta situación,

cada vez se estará más cerca de enfrentar estallidos sociales por la creciente escasez de los recursos energético e hídrico, y los consiguientes aumentos de costos, que afectarían principalmente a sectores de la población de escaso poder adquisitivo.

Estos antecedentes dieron origen a la presente investigación, cuyos resultados se muestran en este documento. Su propósito principal fue la incorporación de diversas estrategias conservativas y de bioclimatización en prototipos de vivienda de bajo costo para reducir, tanto el consumo de energía convencional como el de agua para fines de climatización. Para demostrar su viabilidad se evaluó la rentabilidad de cada una de las estrategias propuestas con una óptica de ciclo de vida.

Caso de estudio: ciudad de Chihuahua. El clima y el problema hídrico

La ciudad de Chihuahua se localiza a $28^{\circ} 38'$ latitud norte, $106^{\circ} 06'$ longitud oeste y a 1,423 msnm (Figura 1). Su clima se considera árido seco extremo. La temporada de verano tiene una duración de cinco meses en promedio (mayo a septiembre).

Las temperaturas promedio durante esa temporada son: máxima 32.00°C , media 24.70°C y mínima 17.50°C . La humedad relativa promedio es de 52.80%, con mínima promedio de 16.30%. La mayor precipitación pluvial se presenta en los meses de agosto y septiembre, pero la lluvia total del año apenas alcanza 313.10 mm en promedio (CONAGUA, 2004).

Debido a las condiciones extremas del clima durante esta temporada, los EED son operados en forma prácticamente continua, por lo que el consumo de energía eléctrica y de agua se incrementa de manera significativa, con obvias consecuencias para la economía familiar y el equilibrio ambiental regional y global.

Consumo hídrico y energético de los EED

Según datos de IMPCO (1999) se estima que más de un millón y medio de hogares en México cuentan con enfriamiento evaporativo directo (EED), principalmente en estratos sociales de clase económica media y baja. De acuerdo al último censo de población (INEGI, 2010), el municipio de Chihuahua tiene casi 223 mil viviendas



Figura 1. Localización geográfica del estado de Chihuahua.

Tabla 1. Consumo horario de agua por EED según capacidad de flujo de aire, reportado por diversas fuentes.

Fuente	Capacidad		Consumo
	m ³ /min	CFM	Lts/h
IMPCO (1999)	85	3,000	6.0
PATH (1998)	113	4,000	13.2
CEPAE (2000)	136	4,800	40.0
PATH (1998)	184	6,500	39.7
Lenomex (2004)	184	6,500	Entre 25.0 y 32.0
IMPCO (1999)	1,189	42,000	452.0

conectadas al servicio de agua potable, las cuales cuentan en promedio con un equipo de EED de 127 m³/min (4,500 CFM) según un estudio realizado por Herrera (2012). A su vez, la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2005) estima que en Chihuahua los EED se usan 20 horas diarias en promedio, por lo menos 130 días al año (durante el verano).

Los EED más comúnmente usados en las viviendas de la región tienen una capacidad de flujo de aire entre 85 a 113 m³/mi (3,000 a 4,000 CFM). El consumo energético diario de estos dispositivos oscila entre 400 a 600 Wh. En comparación, un equipo de aire acondicionado con una capacidad de flujo similar consume entre 1,160 a 3,200 Wh diarios (CFE, 2008). Por ello es frecuente encontrar reportes técnicos donde se promueve el uso de EED como una opción sostenible para el ahorro energético. No obstante, suele dejarse de lado el alto consumo de agua que implica el funcionamiento de los EED.

El consumo de agua asociado al funcionamiento de los EED ha sido analizado en distintos estudios (Tabla 1).

La empresa IMPCO (1999) estima que los equipos convencionales de EEDs consumen entre 6 a 452 litros por hora, dependiendo de su capacidad de flujo, que varía entre 85 y 1,189 m³/min (3,000 a 42,000 CFM). Un estudio realizado por el Partnership for Advancing Technology in Housing (PATH, 1998) en el sur de los Estados Unidos demostró que los EED con capacidades de uso común en vivienda consumen de 13.2 a 39.7 litros de agua por hora de operación. Lenomex (2004) en México, ha reportado que un EED de 184 m³/min (6,500 CFM) presenta un consumo de agua que oscila entre 25 a 32 litros por hora de funcionamiento.

La Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas del Estado de Chihuahua, a través de la Comisión Estatal para el Ahorro y Uso Eficiente de Energía del Gobierno del Estado de Chihuahua (CEPAE, 2000), realizó un estudio en un equipo de EED de 136 m³/min (4,800 CFM) donde encontró que en condiciones normales de funcionamiento consume 40 litros por hora, en promedio.

Como puede observarse, los datos disponibles indican que debe consumirse un elevado volumen de agua destinado para la climatización en las zonas de clima cálido seco mediante el funcionamiento de los EED. La Junta Central de Aguas y Saneamiento de Chihuahua (JMAS, 2008) estima una dotación de agua sólo para el rubro de enfriamiento evaporativo de más de 4 millones de metros cúbicos al año. Sin embargo, esta estimación parece muy conservadora, pues los datos obtenidos en esta investigación indican que el volumen anual de agua destinada a EED, podría ser 1.5 veces mayor.

Este enorme consumo de agua en una región caracterizada por poca lluvia trae consecuencias negativas. Del total del agua que se precipita, el 3.36% es captada en presas, el 8% se infiltra y el 47.9% sale de la cuenca. La recarga de los acuíferos es de 331 m³/año, mientras que la extracción es de 342 m³/año (IMPLAN, 2007). Esta situación se agrava por los frecuentes periodos de sequía lo que trae como consecuencia la acelerada disminución en las reservas de agua tanto en cuerpos superficiales como subterráneos.

En el estado de Chihuahua existen 15 acuíferos con sobreexplotación que corresponden principalmente a las zonas en las que se asientan las mayores ciudades y zonas de riego. El balance hidrológico muestra que 11 de ellos presentan algún nivel de sobreexplotación, de los cuales cinco presentan una condición muy severa. Entre estos últimos se encuentra el que alimenta a la ciudad de Chihuahua, que es abastecida exclusivamente por este medio (CONAGUA, 2004).

Esta situación exige que cada año se deban llevar a cabo programas de racionamiento en la ciudad, durante los que se suministra agua sólo de 4 a 6 horas al día. Esto, a su vez, hace que el uso de la instalación de tanques de reserva en cada vivienda se haga indispensable. Si bien se han lanzado campañas de concientización que invitan a la población a ahorrar agua y a evitar fugas, no se ha promovido el uso racional de los EED.

Materiales y métodos

El proyecto desarrollado consistió en cuatro estrategias bioclimáticas de distinta complejidad, costo y eficacia, en viviendas de bajo costo para evaluar su efecto en el ahorro de agua y energía usadas en los EED. Para ello se emplearon prototipos de vivienda de 23.76m² de superficie, con idénticas características de orientación y sistema constructivo (Figuras 2a y 2b). Las viviendas fueron construidas con muros de block de concreto hueco de 12x20x40cms, con acabado de estuco color blanco al exterior e interior, losa de concreto aligerado con casetón de poliestireno de 12 cms, ventanas de vidrio sencillo de 4 mm con manguetería de aluminio y puerta exterior de multypanel. Todas las viviendas contaban con un equipo de EED de 85 m³/min (3,000 CFM) marca Lenomex.

Para evaluar las estrategias conservativas y de bioclimatización seleccionadas, se realizó una investigación de tipo experimental descriptiva, que incluyó un monitoreo de distintas variables durante los veranos de 2006 y 2007. Dos unidades de referencia fueron consideradas: una vivienda sin ninguna estrategia conservativa ni bioclimática (T₁) y otra vivienda a la que se le instaló un EED, así como un termostato de control de encendido y apagado automático marca Dial, como estrategia

conservativa (T₂). Un termostato similar se instaló en el resto de viviendas donde se pusieron en práctica las estrategias bioclimáticas a fin de monitorearlas en las mismas condiciones.

Para determinar la temperatura de encendido y apagado de los EED se utilizó la ecuación propuesta por la norma ASHRAE 55-2010 para edificios libremente ventilados (ASHRAE, 2010):

$$T_n = 17.8 + 0.31(T_o)_1$$

Donde:

T_n = Temperatura neutra

T_o = Temperatura exterior promedio

La temperatura exterior promedio (T_o) empleada para despejar la ecuación (1) correspondió a la temporada de verano, 24.70°C. Así el termostato fue programado para encender o apagar los EED, cuando la temperatura cruzara los 25.53°C.

Las estrategias bioclimáticas realizadas en las viviendas en un primer momento fueron las siguientes:

- c1: Aislamiento térmico adicional en cubierta.
- c2: Protección solar en ventanas.
- c3: Aislamiento térmico y sombreado del equipo de EED y aislamiento térmico del tanque de almacenamiento de agua.
- c4: Incremento de masa térmica en muros.



Figuras 2a y 2b. Viviendas utilizadas para el estudio. Izquierda: Planta; Derecha: Vista exterior (Luis Carlos Herrera Sosa).

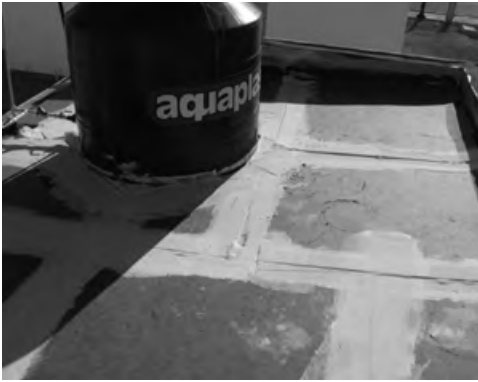
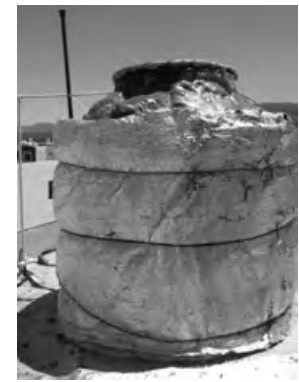


Figura 3. Aislamiento adicional en cubierta (Luis Carlos Herrera Sosa).



Figuras 4a y 4b. Aislamiento en equipo de enfriamiento. Izquierda: Equipo de EED; derecha: Tanque de almacenamiento de agua (Luis Carlos Herrera Sosa).



La estrategia de aislamiento adicional en cubierta consistió en aplicar una placa de polisocianurato de 1" de espesor en la cubierta, sin pintar. Se considera que es un aislamiento adicional porque la cubierta original incluye aislamiento térmico en los casetones de poliestireno que sirven como aligerante del sistema constructivo (Figura 3).

La estrategia de aislamiento térmico en el equipo de los EED consistió en aplicar una placa flexible de fibra de vidrio de ½" de espesor, y papel de aluminio con acabado en color blanco. Además se le agregó una cubierta de madera de pino de ½" de espesor sin pintar para bloquear los rayos solares. Con las mismas características se realizó la aislación del tanque de almacenamiento de agua (Figuras 4a y 4b).

La estrategia de protección solar en ventanas consistió en instalar partesoles verticales y horizontales para disminuir la ganancia de radiación solar directa incidente a través de las ventanas. Los dispositivos de

sombreado se elaboraron con una estructura de perfil metálico y una placa de polisocianurato de ½" de espesor sin pintar (Figura 5).

La estrategia de incrementar la masa térmica en muros consistió en rellenar los huecos del bloque de concreto de los muros hasta el nivel de cerramiento (2.10 m), con tierra producto de la excavación del terreno natural (Figuras 6a y 6b).

En la última etapa de la investigación se aplicó a todas las viviendas la estrategia de ventilación nocturna (VN), la cual consiste en una ventilación natural cruzada mediante la apertura de las ventanas durante la noche, cuando la temperatura exterior es inferior a la del interior.

El acopio de datos se realizó mediante monitoreo con instrumentos, registros de datos cada 15 minutos para las variables de clima y cada hora para el consumo de agua. Para el registro del consumo de agua, se instaló en cada vivienda un medidor de agua



Figura 5. Protección solar en ventanas (Luis Carlos Herrera Sosa).



Figuras 6a y 6b. Masa térmica en muros. Izquierda: Sección; Centro: Detalle; Derecha: Vista exterior (Luis Carlos Herrera Sosa).

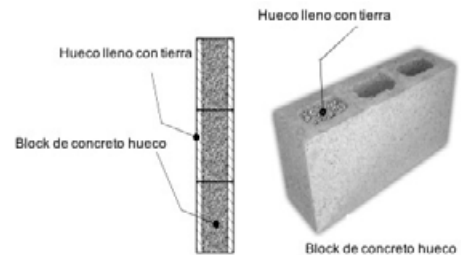


Figura 7. Dispositivo de medición del flujo de agua marca Altair clase CI (Luis Carlos Herrera Sosa).



Figura 8. Equipo de medición y termostato de control de encendido (Luis Carlos Herrera Sosa).

marca Altair clase C1 del que se tomaron los registros mediante lectura directa (Figura 7).

El equipo de monitoreo al interior de las viviendas consistió en data loggers tipo HOBO de Onset Computer Co., modelos HO8-004, HO8-032-08 y UI2-013 provistos de sensores de temperatura de bulbo seco, temperatura de globo negro y humedad relativa. Al interior de los EED se colocó un data logger modelo HO8-004 para medir temperatura de bulbo seco y humedad relativa. En el exterior de la vivienda se colocó un HOBO H32, marca Onset con sensores de temperatura de bulbo seco y humedad relativa (Figura 8).

Las mediciones obtenidas con estos instrumentos pueden considerarse como de clase I, de acuerdo a la norma ISO 7726, con base en la precisión y rangos de operación con que trabajan.

Resultados de consumo de agua y energía

Para el prototipo T1, sin ninguna estrategia conservativa o bioclimática, se registró un consumo de 11.25 lts/h, valor ubicado dentro de los volúmenes esperados según los datos publicados en estudios anteriores (Tabla 1). A partir de los datos registrados durante el monitoreo realizado en los distintos casos, se calcularon los valores de consumo anual de agua y energía, considerando un periodo de funcionamiento de 130 días al año (Tabla 2).

Dado que T1 no tiene termostato automático, el consumo de agua y electricidad fue calculado considerando 24 horas de uso al día. Si se considera un periodo de uso de 20 horas por día, como lo estima la CFE para la región de Chihuahua, el consumo sería de 27.08 m³ de agua y 864.74 Kwh de electricidad.

Tabla 2. Consumo anual de agua y energía por prototipo analizado.

Prototipo	Consumo anual de agua (m ³)*	Consumo anual de energía (Kwh)*
T1	32.50**	1,037.69**
T2	19.13	610.75
C1	15.82	505.18
C2	15.12	482.58
C3	15.78	503.84
C4	16.21	517.60

* Considerando 130 días de funcionamiento al año.

** Considerando 24 horas de funcionamiento por día.

La instauración de la estrategia de ventilación nocturna (VN), que no requiere de costo de inversión ni de operación, produjo ahorros importantes en el consumo de agua y de energía de los EED. Los resultados analizados se muestran en la Tabla 3.

De la comparación de los datos registrados en las tablas 2 y 3 se observa que la ventilación nocturna produce menores consumos, tanto de energía como de agua. Esto se puede explicar por el efecto refrigerador que ocurre cuando se da un intercambio de calor entre la atmósfera terrestre con el sumidero térmico constituido por el cielo nocturno. La eficacia de esta estrategia es favorecida por la presencia de masa térmica que actúe como acumulador térmico. Por ello resulta que la estrategia de incremento de masa térmica (prototipo C4) registra un mejor desempeño en la Tabla 3.

Análisis de costo de ciclo de vida (CCV)

El costo de ciclo de vida de un proyecto es la suma de todos los costes producidos en el periodo de estudio, ajustados al valor actual, y su cálculo resulta muy útil para la selección de alternativas en proyectos donde se invierte en mayores costes iniciales para lograr menores costes futuros. Estos proyectos deben satisfacer un determinado nivel de desempeño técnico, aunque sus costos de inversión inicial, de operación, de mantenimiento, reparación y vida útil puedan diferir.

La aplicación del análisis de ccv para el diseño de medidas de conservación de energía en edificios es cada vez más requerida, sobre todo cuando se aplican estrategias bioclimáticas. Ejemplos de ello son la selección de componentes, equipos y materiales que impactan el consumo energético, tales como los aislantes térmicos,

las aberturas, los sistemas de acondicionamiento, de iluminación, de producción de agua caliente y las estrategias de diseño bioclimático. En general todas estas posibilidades influyen sobre los costos energéticos directos del edificio. Sin embargo, también se puede aplicar la metodología para identificar alternativas que modifican costos indirectos o incluso externalidades, tales como la productividad de los ocupantes, el impacto ambiental, los costos de la infraestructura de transmisión de energía eléctrica, etc.

Una de las dificultades para realizar un análisis de ccv es la necesidad de contar con datos de costos de varios elementos, algunos de los cuales serán adquiridos en el futuro, y otros en el presente. Esto se debe a que el mayor provecho que se puede obtener de esta metodología es cuando se aplica en forma integrada durante el proceso de diseño, es decir, cuando aún hay muchos detalles por definir. Por ello se sigue un enfoque que va desde lo general, en la fase conceptual del diseño, hacia lo particular, en la fase de especificaciones técnicas.

Aplicación a los casos de estudio seleccionados

Si bien lo usual es determinar la mejor alternativa de diseño en función de los indicadores económicos asociados al ahorro de energía en todo el ciclo de vida, en el estudio que se presenta aquí se examina, además, y con énfasis, el ahorro del agua que alimenta los EED utilizados para la climatización.

El caso establecido como referencia (T1), la vivienda sin estrategias bioclimáticas, presenta, por obvias razones, el menor costo de inversión, y es el utilizado como caso base o de referencia para la determinación de las medidas de rentabilidad de todas las estrategias desarrolladas. Para la determinación del costo de ciclo de vida de las estrategias estudiadas, se consideraron únicamente los costos directos, es decir, una perspectiva del propietario de la vivienda. Por lo tanto, no se tuvieron en consideración externalidades, costos indirectos ni intangibles.

La estrategia de ventilación nocturna no requirió de un análisis económico particular, ya que su utilización no implica costos adicionales. Sin embargo, existen distintos factores que podrían obstaculizar su empleo desde el punto de vista del comportamiento del usuario, quien

Tabla 3. Consumo anual de agua y energía por prototipo analizado, incluyendo el efecto de ventilación nocturna (vn).

Prototipo	Consumo de agua anual (m ³)*	Consumo de energía anual (Kwh)*
T1	32.50**	1,037.69**
T2+VN	10.03	320.30
C1+VN	8.15	260.39
C2+VN	7.90	252.37
C3+VN	8.56	273.26
C4+VN	7.96	254.03

* Considerando 120 días de funcionamiento al año.

** Considerando 24 horas de funcionamiento por día.

debe ser educado para ejecutar la apertura y cierre de las ventanas en los horarios adecuados para lograr el efecto buscado. Otros factores, como los de la seguridad, los ruidos externos, el posible ingreso de insectos y/o pequeños animales, el ingreso de polvo atmosférico y el ingreso de luz en horas tempranas, pueden hacer que esta estrategia no se utilice, no obstante sus beneficios energéticos, hídricos, ambientales y económicos. Por lo tanto, se analizó cada estrategia con y sin ventilación nocturna, en escenarios separados.

El periodo de estudio considerado fue de 50 años. Los cálculos fueron realizados en moneda constante, por lo que todas las tasas consideradas fueron establecidas en términos reales. Los cálculos se hicieron utilizando el *software* BLCC versión 4.01-00, del National Institute of Standards and Technology (NIST, 2000) del gobierno federal de los Estados Unidos de América.

Datos económicos utilizados

1. Costos de adquisición y sustitución. Se consideraron los valores locales de mercado para determinar los costos de materiales, mano de obra y adquisición de los equipos.
2. Valores residuales. No fueron relevantes para el caso de estudio, dado que la vida útil estimada para los distintos materiales y componentes utilizados, resulta similar al periodo de estudio considerado.
3. Costos recurrentes uniformes. Se consideraron costos asociados al mantenimiento, de acuerdo a los valores de mercado locales.
4. Costos de energía. Para determinar el costo energético anual se consideró:

- La cantidad de energía consumida por funcionamiento del EED, estimada por cálculo, considerando la potencia de los equipos y el tiempo de funcionamiento requerido, que fue variable según las estrategias bioclimáticas utilizadas.
 - El precio actual de cada unidad de energía eléctrica consumida de USD 0.059 por kWh, la cual se estableció considerando la estructura tarifaria local vigente.
 - Variaciones futuras del precio de la energía, para lo cual se establecieron distintos escenarios que permitieran explorar la solidez de las distintas alternativas estudiadas. Las proyecciones sobre el precio futuro de la energía fueron estimadas inicialmente siguiendo las proyecciones de incremento registradas durante los últimos 10 años (3.45 en términos reales). Se planteó luego un escenario alternativo en donde no se produjera incremento de la tarifa energética (en términos reales) durante los próximos 50 años. Este es un escenario que disminuye los beneficios de las estrategias conservativas como las exploradas en este proyecto; por lo tanto, los costos energéticos fueron considerados en un escenario como costos anuales recurrentes no uniformes con tasa constante de aumento, y en otro, como costos anuales uniformes.
5. Costos por consumo de agua. Para determinar el costo energético anual se consideró:
- La cantidad de agua consumida, la cual fue monitoreada mediante la lectura directa de los medidores cada hora.
 - El precio actual de cada unidad de agua consumida, de USD 0.54 por m³ de agua, establecida según la estructura tarifaria local vigente.
 - Las variaciones futuras del precio del agua, que fueron exploradas con dos escenarios diferentes, definidos con idénticas consideraciones que en el caso de las variaciones futuras del precio de la energía: 2.3% para el primer escenario y nulo incremento del costo (en términos reales) para el segundo escenario.

Actualización de costos y beneficios

Para realizar la actualización se utilizó como tasa de retorno mínima aceptable para el inversor el 3.8% anual

en términos reales, tasa típica a la que accede un ciudadano común como inversor privado de bajo perfil de riesgo, de acuerdo a datos del Banco de México (2012).¹

Resultados del análisis de ccv

El análisis de Costo de Ciclo de Vida (ccv) se realizó según cuatro escenarios diferentes:

- Escenario 1: sin ventilación nocturna, con aumentos históricos de costos de energía y agua.
- Escenario 2: sin ventilación nocturna, sin aumentos de costos de energía y agua.
- Escenario 3: con ventilación nocturna, con aumentos históricos de costos de energía y agua.
- Escenario 4: con ventilación nocturna, sin aumentos de costos de energía y agua.

Los resultados obtenidos en cada uno de los escenarios se presentan a continuación.

Escenario 1

En este escenario se consideró un incremento de costos energéticos y de provisión de agua con tasas de aumento reales del 3.4% y del 2.3%, respectivamente, de acuerdo a las tendencias de los últimos años. El desempeño de las estrategias bioclimáticas se registró sin aplicar ventilación nocturna. En la Tabla 4 se presentan los resultados finales, en los que se observa que la alternativa de menor costo de ciclo de vida recae en la estrategia de instalación de protecciones solares en las ventanas, correspondiente al prototipo c2.

En la Tabla 5 se comparan los resultados de esta estrategia con los del prototipo de referencia T1, mostrando el ahorro logrado tanto en términos del consumo de energía como de agua.

En la Tabla 6 se muestran los indicadores de rentabilidad determinados por los ahorros alcanzados con la estrategia de protección solar de ventanas (c2) en comparación con el prototipo de referencia (T1). Se observa que la inversión requerida para esta estrategia arrojaría un beneficio neto económico a lo largo del periodo de estudio, en valor presente, de USD 1,712.15. Esta es la ganancia extra que se obtendría por encima

1. La tasa de retorno promedio reportada por el Banco de México para el periodo 2008-2015 fue de 3.3% (Banco de México, 2015).

Tabla 4. Costo de Ciclo de Vida según escenario 1.

Estrategia bioclimática (prototipo)	Costo Inicial (USD)	CCV (valor presente en USD)
T1	0	3,416.67
T2	40.74	2,067.70
C1	97.04	1,772.74
C2	80.37	1,704.52
C3	59.26	1,750.74
C4	70.37	1,790.81

Tabla 5. Comparación de ahorros alcanzados por el prototipo de referencia (T1) y el de mejor desempeño (C2), según escenario 1.

Recurso	Consumo en T1	Consumo en C2	Ahorro anual (USD)	Ahorro en CV (USD)
Electricidad (KWh)	1,037.7	482.6	555.1	27,755.5
Agua (m ³)	32.5	15.12	17.38	869.16

de la ganancia alternativa que produciría si se hubiera invertido el costo inicial adicional (USD 80.37) a la tasa de descuento. Por cada USD invertido, esta estrategia produce USD 1.65 de ahorro. La protección solar de ventana representa entonces una tasa anual (real, por encima de la inflación) de 10.45%, muy superior a la tasa de descuento considerada (3.8%). El tiempo necesario para recuperar la inversión es inferior a los dos años, tanto si se calcula con ahorros descontados, como calculado en forma simple sin descontar.

Tabla 6. Comparativa económica entre el prototipo de referencia (T1) y el de mejor desempeño (C2), según escenario 1.

	T1 (USD)	C2 (USD)	Ahorro (USD)
Inversión inicial	0	80.37	-80.37
Costos futuros			
Costos recurrentes anuales y no anuales	0	19.04	-19.04
Costos energéticos	2,787.19	1,296.22	1,490.96
Costos de agua	629.48	292.82	336.59
Sustituciones de capital	0	16.00	-16.00
Subtotal	3,416.67	1,624.15	1,792.52
CCV	3,416.67	1,704.52	1,712.15
Indicadores de rentabilidad			
Ahorro Neto (USD)	1,712.15		
Relación ahorro/inversión	22.30		
Tasa interna de retorno ajustada	10.45%		
Período de retorno (años)	2		
Período de retorno ajustado (años)	2		

Tabla 7. Costo de Ciclo de Vida según escenario 2.

Estrategia bioclimática (prototipo)	Costo Inicial (USD)	CCV (valor presente en USD)
T1	0	1,759.33
T2	40.74	1,092.30
C1	97.04	967.78
C2	80.37	933.70
C3	59.26	946.00
C4	70.37	964.07

Escenario 2

En este escenario no se consideró incremento real en las tarifas de energía eléctrica ni de suministro de agua. El desempeño de las estrategias bioclimáticas se registró sin aplicar ventilación nocturna. En la Tabla 7 se puede ver que también bajo estas consideraciones, la estrategia de menor costo de ciclo de vida es la instalación de protecciones solares en ventanas (c2).

Los indicadores de rentabilidad alcanzados por esta estrategia se muestran en la Tabla 8. Ahí podemos observar que incluso con un escenario desfavorable para las inversiones, donde las tarifas de energía y agua no se incrementaran durante 50 años (cosa muy improbable según la experiencia actual), la rentabilidad se mantendría superior a la tasa de descuento considerada (8.95% contra 3.8%).

Tabla 8. Indicadores de rentabilidad según escenario 2.

Ahorro Neto (USD)	825.63
Relación ahorro/inversión	11.27
Tasa interna de retorno ajustada	8.95%
Periodo de retorno (años)	2
Periodo de retorno ajustado (años)	3

Escenario 3

Para la construcción de este escenario se tomó en cuenta el desempeño de los prototipos experimentales cuando se les aplicó la estrategia de ventilación nocturna (VN). Dado que abrir y cerrar ventanas no implica inversión alguna, los costos de inversión inicial para este escenario se mantuvieron sin modificación respecto de los escenarios 1 y 2. El prototipo de referencia es la vivienda sin estrategias conservativas, ni bioclimáticas y sin ventilación nocturna (T1). Para la determinación de los factores económicos se consideró un incremento en los costos energéticos y de provisión de agua según las tendencias de los últimos años, con tasas de aumento reales del 3.4% y del 2.3%, respectivamente.

En la Tabla 9 se presentan los costos asociados a las condiciones impuestas en este escenario, mostrando cómo la estrategia de incrementar la masa térmica en los muros, instalada en el prototipo c4, resulta ser la que derivó en el Costo de Ciclo de Vida más bajo.

Tabla 9. Costo de Ciclo de Vida según escenario 3.

Estrategia bioclimática (prototipo)	Costo Inicial (USD)	CCV (valor presente en USD)
T1	0	3,416.67
T2+VN	40.74	1,111.33
C1+VN	70.37	970.30
C2+VN	59.26	946.30
C3+VN	97.04	991.56
C4+VN	80.37	922.89

Tabla 10. Comparación de ahorros alcanzados por el prototipo de referencia (T1) y el de mejor desempeño (C4+VN), según escenario 3.

Recurso	Consumo en T1	Consumo en C4+VN	Ahorro anual (USD)	Ahorro en CV (USD)
Electricidad (KWh)	1,037.7	254.0	783.70	39,183.00
Agua (m ³)	32.5	15.12	24.54	1,227.23

En la Tabla 10 se muestran los ahorros alcanzados por el efecto combinado de las estrategias de incremento de masa térmica en muros y ventilación nocturna (C4+VN), en comparación con el desempeño del prototipo de referencia (T1).

En la Tabla 11 se observa que los indicadores de rentabilidad asociados a la combinación de estrategias de incremento de masa térmica en muros y ventilación nocturna (C4+VN) son mejores que los estimados para la estrategia de protección solar en ventanas sin ventilación nocturna analizados en el escenario 1. Esto es así porque incrementar la masa térmica en los muros tiene un costo de inversión inicial inferior al requerido para instalar la protección solar de ventanas. Además, la masa térmica agregada a los muros no implica costos futuros de mantenimiento. Así, la tasa de retorno podría alcanzar 11.54%, poco más de tres veces la tasa de descuento considerada (3.8%).

Escenario 4

Las condiciones impuestas para la construcción de este escenario son las mismas que las del escenario 3, excepto que se supuso nula variación de las tarifas de energía y suministro de agua. Como en el escenario 3, la alternativa que alcanzó el Costo de Ciclo de Vida más bajo fue la combinación de incremento de masa térmica en muros y ventilación nocturna (C4+VN) (Tabla 12).

A pesar de la situación adversa para el inversionista de no incremento tarifario durante el periodo de análisis, los indicadores de rentabilidad estimados para esta combinación de estrategias siguen siendo favorables. La tasa de retorno en estas condiciones podría alcanzar 10.06%, muy superior a la tasa de retorno, y apenas 0.39% más baja que la estimada para la estrategia óptima del escenario 1 (Tabla 13).

Discusión de resultados

Costo de Ciclo de Vida

En la Figura 9 se presentan los Costos de Ciclo de Vida de todos los casos estudiados, considerando un escenario en el que se experimenta un aumento en los costos de energía y agua, de acuerdo al registro histórico. Ahí

Tabla 11. Comparativa económica entre el prototipo de referencia (T1) y el de mejor desempeño (C4+VN), según escenario 3.

	T1 (USD)	C4+VN (USD)	Ahorro (USD)
Inversión inicial	0	70.37	-70.37
Costos futuros			
Costos recurrentes anuales y no anuales	0	0	0
Costos energéticos	2,787.19	682.30	2,104.89
Costos de agua	629.48	154.15	475.26
Sustituciones de capital	0	16.00	-16.00
Subtotal	3,416.67	852.52	2,564.15
CCV	3,416.67	922.89	2,493.78
Indicadores de rentabilidad			
Ahorro Neto (USD)	2,493.78		
Relación ahorro/inversión	36.44		
Tasa interna de retorno ajustada	11.54%		
Periodo de retorno (años)	2		
Periodo de retorno ajustado (años)	2		

Tabla 12. Costo de Ciclo de Vida según escenario 4.

Alternativa	Costo Inicial (USD)	CCV (valor presente en USD)
T1+VN	0	1,759.33
T2+VN	40.74	599.78
C1+VN	70.37	554.44
C2+VN	59.26	543.26
C3+VN	97.04	555.11
C4+VN	80.37	517.11

Tabla 13. Indicadores de rentabilidad según escenario 4.

Ahorro Neto (USD)	1,242.00
Relación ahorro/inversión	18.65
Tasa interna de retorno ajustada	10.06%
Periodo de retorno (años)	2
Periodo de retorno ajustado (años)	2

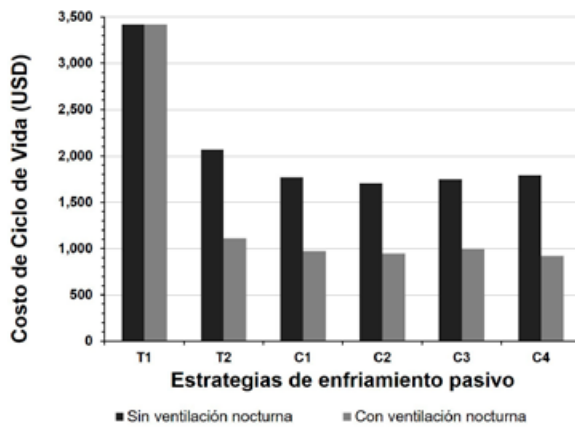


Figura 9. Costo de Ciclo de Vida para las distintas estrategias en un escenario histórico de aumento de costos de energía y agua.

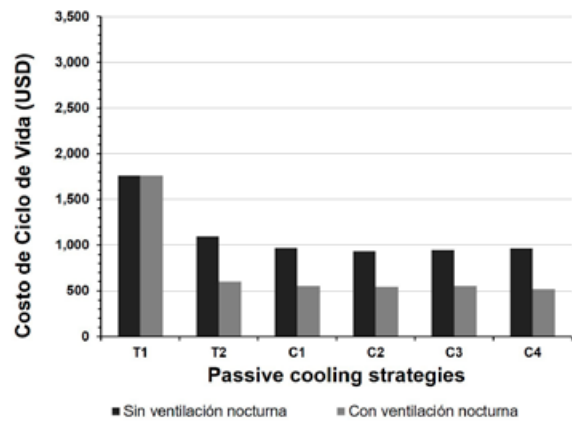


Figura 10. Costo de Ciclo de Vida para las distintas estrategias en un escenario sin aumento real de costos de energía y agua.

se pueden comparar los costos alcanzados por cada caso respecto de si se ejecutó o no la ventilación nocturna. Salta a la vista que invariablemente se logran menores costos cuando se ejecuta esa estrategia pasiva de enfriamiento. Es muy interesante observar que sin la aplicación de ventilación nocturna, la protección solar de ventanas (C2) resulta la opción más conveniente económica y ambientalmente, mientras que la estrategia de incremento de masa térmica en muros (C4) presenta uno de los desempeños menos atractivos del experimento. Pero si se aplica la ventilación nocturna, el incremento de la masa térmica en muros (C4+VN) destaca como la opción con menor costo del ciclo de vida. Este es un claro ejemplo de cómo la instauración concurrente de estrategias interdependientes puede afectar significativamente el desempeño que puede alcanzar cada una de ellas de manera aislada. Por ello, el análisis para la determinación de la estrategia óptima en estos casos se debe realizar en forma simultánea, a fin de

evidenciar la interacción entre las alternativas evaluadas (por ejemplo, ventilación nocturna y masa térmica, o ventilación nocturna y protección solar).

En la Figura 10 se presentan también los costos de ciclo de vida de todos los casos estudiados, pero ahora considerando un escenario donde no se experimenta un aumento real en los costos de energía y agua, es decir, sin considerar la historia inflacionaria. Al no considerarse aumentos, los costos estimados se reducen, sin embargo, este escenario es muy poco probable. De este ejemplo, también, se pueden comparar los costos alcanzados por cada caso respecto de si se ejecutó o no la ventilación nocturna.

El patrón observado en el escenario histórico se repite: el incremento de masa térmica en muros es una de las opciones menos atractivas sin ventilación nocturna, pero si se ventila por la noche, la estrategia se convierte en la opción más favorable.

Análisis de sensibilidad

Los datos económicos utilizados para el presente análisis son aproximados, ya que existe variabilidad según el proveedor, la zona urbana, etc. Por este motivo se decidió realizar un análisis de las variables críticas, elevando en 10% los costos iniciales de inversión, así como los costos recurrentes de energía, de agua, de operación y mantenimiento, las tasas de incremento anual y los costos no recurrentes.

De este análisis resultó que las variables críticas que modifican el costo de ciclo de vida en mayor proporción, son el costo de la energía en primer término y el incremento en el costo de energía en segundo lugar. En la Figura 11 se muestran los resultados obtenidos para la estrategia aplicada al prototipo C2: protección solar en ventanas.

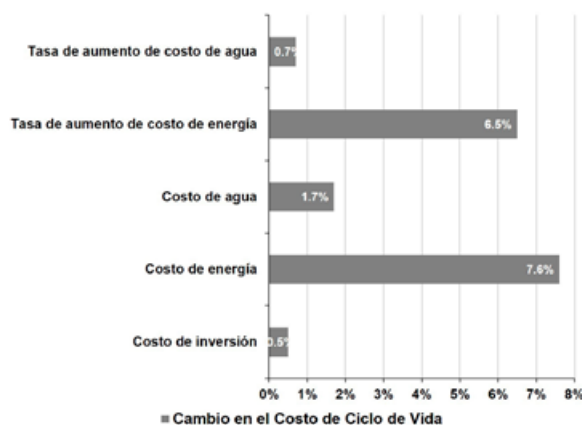


Figura 11. Sensibilidad del Costo de Ciclo de Vida a las distintas variables de costo respecto de la protección solar en ventanas (prototipo C2).

Análisis de rentabilidad

A partir de la identificación del costo de la energía como la variable crítica de los cálculos realizados, se llevó a cabo una correlación para calcular el valor de corte de la energía para cada caso analizado. El valor de corte es el costo de la energía en donde el ahorro neto sería nulo, situación donde sería indiferente desarrollar la estrategia bioclimática, o bien invertir ese dinero a la tasa de retorno del inversor. Para cualquier valor de la energía superior al valor de corte, el desarrollo de la estrategia conservativa sería más conveniente que el gasto del monto de inversión a la tasa de retorno. Para cualquier valor de la energía inferior al valor de corte, la instauración de la estrategia conservativa no sería rentable.

En la Figura 12 se muestran las correlaciones correspondientes a los casos analizados en los escenarios sin ventilación nocturna. De todos ellos, se observa que la estrategia de protección solar en ventanas (la más conveniente en este escenario), aplicada en el prototipo c2, presenta un valor de corte negativo. Eso significa que aún cuando la energía fuera gratuita se registraría un ahorro neto positivo, que resulta ser de USD 224.04, demostrando así que es más rentable que la tasa de descuento. Mientras todos los demás casos presentan un valor de corte positivo, aunque inferior al costo energético actual. Esto significa que si el costo energético disminuyera por debajo del valor de corte calculado, estas estrategias podrían no ser rentables, aunque claramente las probabilidades de que el costo de la energía disminuya en términos reales no son considerables.

A diferencia de lo anterior, todos los casos analizados registran un valor de corte negativo cuando se aplica ventilación nocturna. Incluso el prototipo de referencia (T2), que no incluye estrategias bioclimáticas y que sólo aplica ahorros por el control de encendido del termostato, registra un ahorro neto de USD 1,295.00 en el supuesto de que la energía no tuviera costo. En este escenario no es previsible ninguna condición donde estas inversiones resulten menos rentables que la tasa de descuento (Figura 13).

La estrategia de incrementar la masa térmica de muros combinada con ventilación nocturna, no sólo es la opción con menor Costo de Ciclo de Vida, sino además la más rentable. Los indicadores de rentabilidad

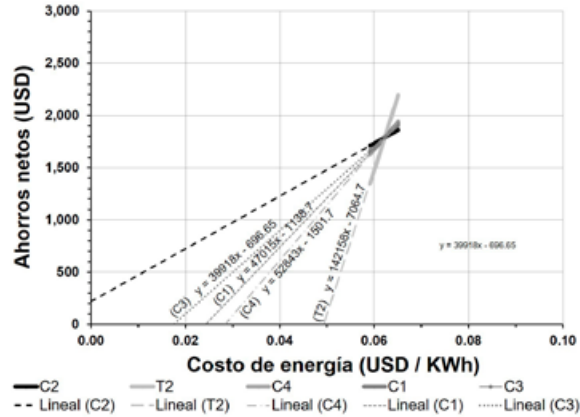


Figura 12. Variación del ahorro neto en función del costo de la energía para los escenarios sin ventilación nocturna.

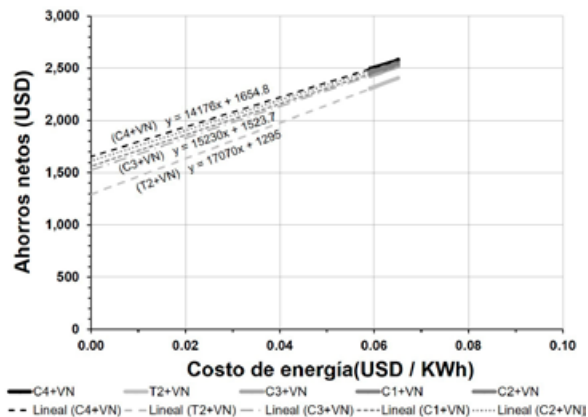


Figura 13. Variación del ahorro neto en función del costo de la energía para los escenarios con ventilación nocturna.

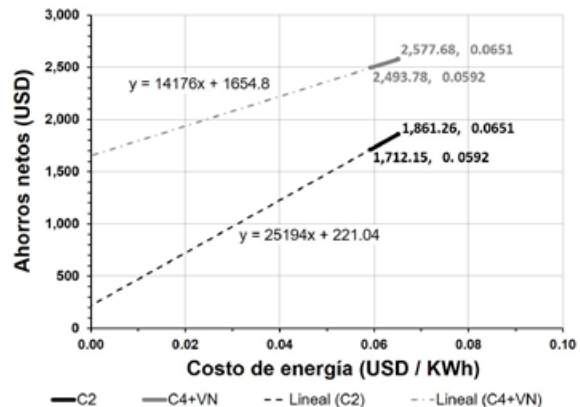


Figura 14. Variación del ahorro neto en función del costo de la energía para los rendimientos óptimos.

asociados a esta combinación de estrategias aplicadas en el prototipo C4+VN son superiores a los alcanzados en cualquiera de los demás casos. La Figura 14 muestra un acercamiento a las correlaciones de los dos casos óptimos: el de protección solar en ventanas sin ventilación nocturna (prototipo C2) y el de incremento de masa térmica en muros con ventilación nocturna (prototipo C4+VN).

En esta figura se observa que el caso C4+VN obtiene un ahorro neto a lo largo del periodo de estudio, en valor presente de USD 2,493.78, cifra muy por encima de lo que se obtendría invirtiendo el costo inicial adicional de USD 80.37, a la tasa de descuento vigente de 3.8%. En esta condición, cada dólar invertido reporta USD 2.48 de beneficio en valor presente y durante el periodo de estudio, lo que representa una tasa anual real, por encima de la inflación, de 11.54%. Con esta tasa, el tiempo necesario para recuperar la inversión es inferior a los dos años, tanto si se calcula con ahorros descontados, como calculado en forma simple sin descontar. En el escenario poco probable que no se incrementen las tarifas de energía en términos reales durante 50 años, la rentabilidad baja, pero sigue resultando atractiva: ahorro neto USD 1,242.00 y tasa de retorno 10.65%. Estos indicadores son similares incluso a los del escenario con incrementos del caso óptimo sin ventilación nocturna C2: ahorro neto USD 1,712.15 y tasa de retorno 10.45%.

Conclusiones

Actualmente el recurso hídrico de las regiones de clima árido se ve amenazado por factores naturales como la sequía recurrente en la región, pero también por factores antropogénicos como el agotamiento y contaminación de los afluentes de agua potable y el crecimiento de la población. A ellos debe sumarse el derroche de agua provocado por el uso indiscriminado de enfriamiento evaporativo directo (EED), que a su vez se origina en la nula adecuación bioclimática de los edificios.

De acuerdo a los datos obtenidos en la presente investigación, podría estimarse el volumen de agua

destinado al EED en la ciudad de Chihuahua a partir del consumo registrado por el prototipo T1, sin ninguna medida conservativa ni bioclimática, reportado en las Tablas 2 y 3 de este documento: 27 m³ al año (considerando 20 horas de funcionamiento al día, durante 130 días al año), multiplicada esta cifra por 223 mil equipos de EED (uno por vivienda) se obtendrían alrededor de seis millones de m³ al año, sólo para satisfacer la demanda de los EED.

El alto consumo de agua originado por el uso de EED debe constituir una llamada de atención urgente para las autoridades normativas, así como para los fabricantes de aparatos de EED. A su vez los profesionales del diseño y la construcción deben responsabilizarse de mejorar el desempeño térmico de los edificios a fin de reducir el consumo de agua y energía para enfriamiento. La aplicación de criterios bioclimáticos en el diseño arquitectónico es, sin lugar a dudas, la mejor opción.

En este trabajo quedó demostrado el gran potencial que poseen las estrategias bioclimáticas para reducir el consumo de agua y energía asociado a las necesidades de enfriamiento en viviendas de la ciudad de Chihuahua. Los resultados alcanzados muestran que estas estrategias constituyen, además, una excelente inversión, que brinda al propietario beneficios económicos muy superiores a los que obtiene a través de las inversiones bancarias que se encuentran a su alcance. El estudio de sensibilidad muestra que no sólo la inversión es altamente rentable, sino que es sumamente robusta, ya que ante cualquier escenario futuro de costos energéticos resultará más rentable que la opción de mercado representada por la tasa de descuento utilizada en el estudio.

En esta indagación se ha adoptado una perspectiva del propietario de la vivienda, considerando únicamente costos y beneficios directos. Una perspectiva más amplia, que considerara costos y beneficios sociales y ambientales, encontraría con toda seguridad mayores beneficios asociados a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, a la descongestión de redes de transmisión eléctrica y de agua, y la conservación de recursos agotables, por citar sólo algunos.

Bibliografía

ANSI/ASHRAE Standard 55-2010, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers, pp. 11-12.

CEPAE (2000), Comisión Estatal para el Ahorro y Uso Eficiente de Energía [carta] (comunicación personal, junio de 2000).

CONAGUA (2004), Comisión Nacional del Agua. Estación meteorológica de Chihuahua, Reporte impreso, México.

INEGI (2010), *Censo de Población y Vivienda 2010*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.

Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN) (2007), Plan de Desarrollo Urbano 2040, Chihuahua, México.

Herrera, L. (2012), *Evaluación de Estrategias*

de Enfriamiento Pasivo Encaminadas al Ahorro de Agua (Proyecto SPROME/10/02/160), Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Kleynera, A., Sandborn P. (2008), Minimizing life cycle cost by managing product reliability via validation plan and warranty return cost. *Int. J. Production Economics* 112 (2008) 796–807

Referencias electrónicas

Banco de México. (2012), Banco de México. <http://www.banxico.org.mx/portal-mercado-valores/index.html>

Banco de México. (2015). Banco de México. Obtenido de Estadísticas (Tasas de interés) (Tasas de Interés): <http://www.banxico.org.mx/portal-mercado-valores/index.html>

CFE (2008), Comisión Federal de Electricidad. <http://www.cfe.gob.mx/casa/informacionalcliente/Paginas>

IMPCO (1999), Cálculo de equipos de enfriamiento evaporativo. <http://www.impco.com>

JMAS (2008), Junta Municipal de Aguas y Saneamiento. Municipio de Chihuahua, México. <http://www.jmas.gob.mx>.

Lenomex (2004), Enfriadores de aire. <http://www.lenomex.com.mx/enfriadores.htm>

PATH (1998), Partnership for Advancing Technology in Housing Net. <http://www.pathnet.org>

NIST [en línea], Building Life-Cycle Cost (BLCC) Versión 4.01. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology. Estados Unidos, c2000.

