

Índice para Evaluar el Desempeño Solar de Edificaciones en Clima Cálido

Victor M. Gómez-Muñoz¹ y Miguel A. Porta-Gándara²

¹Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del IPN, AP 592, La Paz, BCS, México 23000 (vgomez@ipn.mx);

²Grupo Ingeniería, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, AP 128, La Paz, BCS, México 2300

Resumen

Se desarrolla un índice para evaluar el desempeño solar de una edificación mediante la comparación de la energía solar diaria promedio que recibe la envolvente durante la primavera y el verano con la que recibe una construcción de referencia. La energía solar diaria promedio durante esas dos estaciones del año se calcula como el valor medio de la energía recibida por la envolvente durante el solsticio de verano y el equinoccio de primavera, dado que la energía entre los dos equinoccios es simétrica alrededor del solsticio de verano. Durante ese periodo ocurre el máximo calentamiento provocado por la radiación solar, especialmente en los lugares con clima cálido. El índice toma valores entre cero y uno cuando se mejora el desempeño de la construcción de referencia y es negativo en caso contrario. A través del índice se analiza el comportamiento de las construcciones alargadas como las de las escuelas y granjas, de las torres y de las construcciones con grandes techos como los almacenes y tiendas de autoservicio. En todos los casos se evalúa con el índice el uso de diferentes techos: horizontales, inclinados, de dos aguas y de bóveda de cañón, demostrándose el beneficio del uso de este último. Se demostró que la orientación es el principal factor que afecta el desempeño de los edificios alargados, mejorando ostensiblemente con el uso de la bóveda de cañón alineada de este a oeste. Las construcciones con grandes techos mejoran ligeramente su desempeño al orientarlas adecuadamente y notoriamente cuando se cambia el techo horizontal por la bóveda de cañón. El desempeño solar de las torres es prácticamente invariante cuando se cambian los techos. En las construcciones con planta cuadrada, el mejor desempeño con cada tipo de techo se obtuvo cuando se orientan hacia el Norte.

Abstract

Index to assess the solar performance of buildings in hot climates. In order to assess the solar performance of a building an index is developed by comparing the mean solar energy over the envelope during spring and summer with the corresponding energy of a dwelling reference. The mean daily solar energy during those two seasons was calculated averaging the solar energy corresponding to the summer solstice and the equinox, due to symmetry of the solar energy between equinoxes around the summer solstice. During that period occurs the maximum heating, mainly in places with hot climate. The index takes values between zero and one when the assessed building has a better performance than the reference; the index is negative when its solar performance retrogresses. The performances of several kinds of buildings were evaluated by means of the index: long buildings, like those used for primary schools and farms in Mexico, towers and big stores. For each case several kind of roofs were tested: flat, tilted, gabled and barrel vault. The azimuth of long building is the main factor affecting its solar performance, which is significantly improved by using a barrel roof aligned east to west. The buildings with huge roofs like those found in big stores get a light improvement when they are properly oriented and markedly when the flat roof is changed by the barrel roof. The solar performance of towers is almost invariant when the roofs were changed. The better azimuth for buildings with square plant is toward the North for any kind of roof used.

Palabras clave:

Desempeño solar, envolvente de construcciones, techos, ahorro de energía, bóveda de cañón.

Key words:

Solar performance, building envelope, roofs, energy saving, barrel vault.

Introducción

Con el objeto de mejorar las condiciones de una edificación en función de la radiación solar incidente, con énfasis en climas cálidos, se propone un índice de desempeño solar para la evaluación de un proyecto en función de su geometría, orientación, tipo de techo y parámetros de construcción. La simplicidad del índice permite que los resultados y las metodologías desarrollados en este trabajo tengan una utilidad práctica para los profesionales que trabajan en estos temas, dado que los arquitectos en general han prestado poca atención a la interacción entre la forma y la energía, así como al enfoque bioclimático en la arquitectura contemporánea (Coch, 1998).

Se han desarrollado programas dirigidos a los constructores para medir el impacto en el confort y las necesidades térmicas de sus diseños arquitectónicos, en función de la orientación, tipo y tamaño de las ventanas, nivel de aislamiento, presencia de dispositivos de sombreado, estrategias de ventilación e inercia térmica (Gratia y De Herde, 2001).

La modelación numérica se ha usado para evaluar el efecto de la arquitectura de una construcción sobre el balance térmico y el confort del interior a partir de la radiación incidente sobre la envolvente y de su transmisión hacia el interior (Chwieduk, 2008).

Mediante el uso de la modelación y simulación numérica, se han propuesto diversas soluciones a los problemas de calentamiento de las construcciones debido a la radiación solar incidente sobre ella.

Knowles (2003) creó el concepto de la envolvente solar a partir del movimiento relativo del sol y el manejo de las sombras durante los períodos críticos, para ser usado como un instrumento de zonificación y diseño urbano basado en la arquitectura pasiva de bajo consumo de energía.

Algunos problemas de sombreado se pueden resolver por medio de programas de simulación de sistemas con elevadas ganancias solares, que consideren la predicción de la radiación sobre las superficies sobre cuyas fachadas haya obstrucciones, construcciones vecinas y el paisaje circundante, a partir de la posición del sol y la geometría de las superficies (Hiller et al. 2000) y la eficiencia de las rejillas para sombreado mediante programas de simulación (Datta, 2001).

Karlsson et al. (2003) evaluaron los balances de temperatura en diferentes tipos de edificios mediante un programa de simulación dinámica y encontraron grandes desviaciones al considerar y no considerar la energía solar.

Por medio de un modelo anisotrópico, Gopinathan et al. (2007) calcularon la radiación solar incidente sobre superficies inclinadas y encontraron las inclinaciones y los azimuts óptimos para diversas estaciones del año.

En el caso particular de las viviendas en climas cálidos y áridos, Fathy (1986) analizó las propiedades de las construcciones árabes que se han usado por mucho tiempo que ofrecen un microclima confortable usando adecuadamente la energía natural.

La intensidad de la radiación solar sobre techos curvos y domos hemisféricos ha sido modelada a partir de diversos enfoques, particularmente a través de la solución de ecuaciones diferenciales por diferencias finitas (Sabzevari y Golneshan, 1990).

Los techos curvos, como las bóvedas de cañón y los domos, se han analizado y comparado con los techos horizontales. Gómez-Muñoz et al. (2003) comparan los techos hemisféricos con los techos planos y muestran que gracias su efecto de autosombreado, los primeros tienen un mejor desempeño solar debido a que reciben 35% menos energía durante los meses cálidos. Runsheng et al. (2003) también compararon los techos abovedados con los horizontales, encontrando que los primeros reducen la ganancia de calor solar durante los meses de verano. Hadavand et al. (2008) muestran que los techos abovedados bien orientados reducen el flujo de calor respecto a los techos horizontales.

Hadavand y Yaghoub (2008) compararon este tipo de techos con uno horizontal con las mismas dimensiones y orientación, tomando en cuenta los flujos de calor, la velocidad del viento y la temperatura de los techos y encontraron una diferencia significativa en los coeficientes de transferencia de calor convectivo entre ambos techos. A partir de simulaciones demostraron las

ventajas de la orientación de los techos abovedados.

Sin embargo, no se ha encontrado una herramienta de simulación que permita evaluar de manera rápida y directa el desempeño solar de una edificación, ni un índice como el que se desarrolla en este trabajo que incorpore la geometría, la orientación y el tipo de techo.

Metodología

Radiación Solar

Con el objeto de comparar el desempeño solar de diferentes tipos de construcciones, incluso aquellas que tengan la misma geometría pero diferentes dimensiones, se calcula la radiación $r(t)$ recibida por la envolvente (superficies externas expuestas a la radiación solar) como sigue:

$$r(t) = \frac{\sum r_i(t) \cdot A_i}{\sum A_i} \quad (1)$$

donde es la radiación instantánea $r_i(t)$ incidente sobre cada superficie de área A_i , cada una calculada conforme a Duffie y Beckman (1991), en función de la hora del día t , el día del año, la latitud, la inclinación de la superficie y de la radiación máxima recibida en el lugar.

Para una construcción v determinada, mediante el proceso de integración a lo largo de un día solar n , desde la hora del amanecer ama hasta la del atardecer ata , los valores anteriores de la radiación instantánea obtenidos (W/m^2) se convierten en energía solar $SE_v(n)$ por unidad de superficie (MJ/m^2):

$$SE_v(n) = \frac{3600}{1e6} \int_{ama}^{ata} r(t) dt \quad (2)$$

Índice de Desempeño Solar

El índice de desempeño solar de una construcción se define usando como referencia una vivienda con planta de $8 \times 8 \text{ m}^2$ y de 3 m de altura de las paredes, con techo horizontal y orientada hacia el Sur, que equivale a decir, con fachadas hacia los cuatro puntos cardinales, ubicada en la misma latitud de la edificación que se quiere evaluar.

Con el objeto de que el índice refleje el desempeño solar se usan las simetrías alrededor de los solsticios de la radiación solar diaria a lo largo del año. En la figura 1 se muestra un ejemplo particular de esta situación, sin embargo tales simetrías se presentan para cualquier latitud y orientación.

Para evaluar el comportamiento promedio durante la primavera y el verano, se propone un índice de desempeño solar a partir de la simetría de la radiación solar diaria sobre la construcción alrededor del solsticio de verano. El índice se calcula con la media de los valores correspondientes al solsticio de verano y a un equinoccio, pues el área bajo la curva de radiación en esas dos estaciones equivale al área del rectángulo definido por el promedio en ese lapso:

$$IDS_v = 1 - \frac{med(SE_v(172), SE_v(264))}{med(SE_o(172), SE_o(264))} \quad (3)$$

donde los valores de $SE_v(n)$ y $SE_o(n)$, con $n=172$ o 264 , son los correspondientes a la construcción a evaluar y la de referencia, respectivamente, que se calculan a partir de la expresión 2. En cada una se usan los parámetros de construcción que les correspondan, ambas a la misma latitud. En otras palabras, la energía solar sobre la envolvente de la construcción que se quiera evaluar depende de sus dimensiones, el tipo de techo y su orientación evaluado en la peor condición posible de radiación solar directa. No se incluyen otras variables meteorológicas como la nubosidad debido a que estas son propias de cada lugar y están implícitas en el valor de la radiación directa máxima.

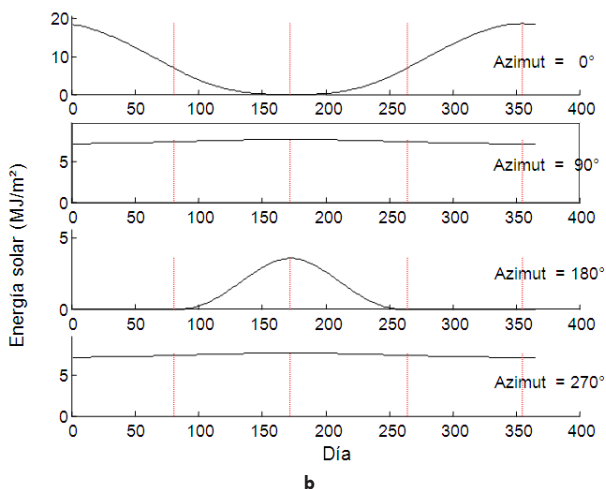
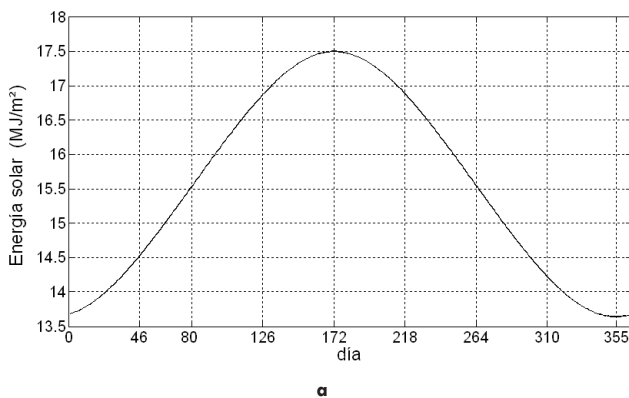


Figura 1. (a) Energía solar diaria incidente sobre una superficie horizontal. (b) Energía solar diaria incidente sobre cuatro paredes verticales alineadas respecto a los puntos cardinales

En los ejemplos siguientes se tomaron como casos de estudio construcciones en la Cd. de La Paz, BCS, México, con un valor constante de la radiación directa máxima de 600 W/m^2 , para todos los meses del año, particularmente para los días $n=172$ y $n=264$ que se usan para calcular el índice. De esta manera se evitan las variaciones estacionales propias de la

radiación y el índice sólo refleja los efectos de la geometría de la construcción, tipo de techo, así como sus dimensiones y orientación.

El índice se relaciona inversamente con la energía solar promedio diaria sobre la envolvente de la edificación (Figura 2). Para los casos en los que la construcción a evaluar mejore el desempeño de la referencia, el índice toma valores entre cero y uno, y si la construcción recibe más energía que la referencia el índice toma valores negativos. El índice es uno cuando la edificación a evaluar no recibe radiación solar y cero cuando coincide con la energía recibida por la referencia.

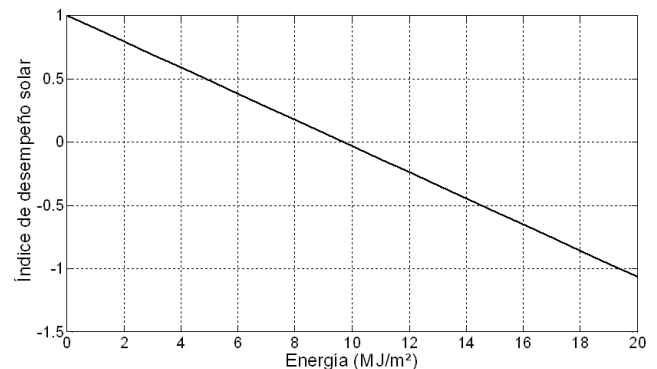


Figura 2. Relación entre la energía solar promedio diaria sobre la envolvente y el índice para la Cd. de La Paz (latitud de 24°N).

Aplicaciones

La elección de la construcción de referencia no tiene una justificación intrínseca, salvo que sus dimensiones son muy similares a las de una vivienda de interés social, que en ciertos ambientes muy cálidos puede ser casi inhabitable por las mínimas condiciones de confort que ofrece a sus moradores.

Para un estudio específico, dicha referencia puede ser cambiada por el analista. Lo importante es mantenerla fija a lo largo de la evaluación. De esa manera se pueden comparar diversas edificaciones, o bien, tomando como referencia la que se va a evaluar, el índice permite evaluar las modificaciones que se le quieran hacer para mejorar su desempeño.

Las superficies de insolación mencionadas en la expresión (1) pueden ser consideradas de diversas formas según el asoleamiento que se reciba en cada una de ellas. Por ejemplo, si una de ellas se sombrea por completo, se le asigna el valor $A_i=0$ dado que dicha superficie no actuará como colector solar.

Análogamente, para una construcción a la que se le instalen mallasombas en todas las fachadas y el techo, con filtro de radiación solar de 0.8 por ejemplo, el valor de radiación sobre cada superficie será de $0.2 r_i(t)$ (que es la radiación que penetra a la envolvente) y el índice vale en tal caso 0.8 justamente.

Incrementos Unidireccionales

A partir de la construcción con techo horizontal utilizada como referencia para el cálculo del índice, se ensayan las modificaciones logradas en su desempeño al incrementar, una a una,

las dimensiones de la construcción: largo de la fachada frontal (azimut 0°), largo de la fachada lateral (azimut 90°) y altura del techo (Figura 3). Esta última opción es la única que proporciona mejoras en el desempeño solar de la construcción, pues el índice aumentó aproximadamente de manera proporcional a los incrementos en la altura del techo. Por ejemplo: para techos de 4 m y 5 m, la construcción recibe respectivamente alrededor de 8% y 13% menos energía solar sobre la envolvente durante la primavera y el verano que la referencia (Figura 3; línea continua).

La disminución del índice que resulta con el alargamiento de las fachadas también es proporcional al incremento y se distingue claramente el efecto de la orientación, pues al alargar las fachadas con azimuts 90° y 270° , en la dirección norte-sur, exponen mayor superficie de soleamiento, una antes del mediodía solar y la otra después.

En cambio, el alargamiento de la construcción en la dirección este-oeste, correspondiente a las fachadas con azimuts 0° y 80° , tiene una pendiente negativa muy pequeña. Este resultado da pie al estudio de construcciones alargadas que se muestra a continuación.

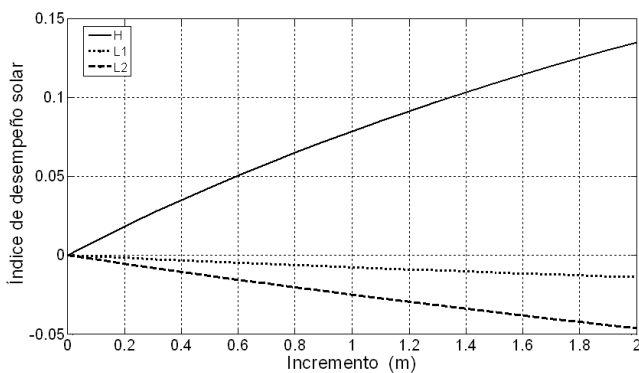


Figura 3. Índice de desempeño solar de una construcción al incrementar una de sus dimensiones, ya sea la longitud de las fachadas norte y sur (L1), la longitud de las fachadas este y oeste (L2) o la altura del techo (H), a una latitud de 24°N .

Construcciones alargadas

Para el caso de una construcción de planta alargada, ya sea por el diseño arquitectónico o por el uso al que se va a destinar, como por ejemplo escuelas, granjas o invernaderos, el tipo de techo y la orientación son decisivos para el desempeño solar de la construcción.

Se analizan los cambios de un techo horizontal por un techo inclinado, uno de dos aguas y uno de bóveda de cañón, cuyas parametrizaciones para calcular la energía sobre la envolvente se muestran en la figura 4. Los cálculos de radiación se hacen de manera convencional a partir de la radiación directa sobre el plano inclinado. La radiación sobre la bóveda de cañón se calcula de la misma forma, aproximando la superficie con tiras planas a lo largo de la bóveda (Figura 4c).

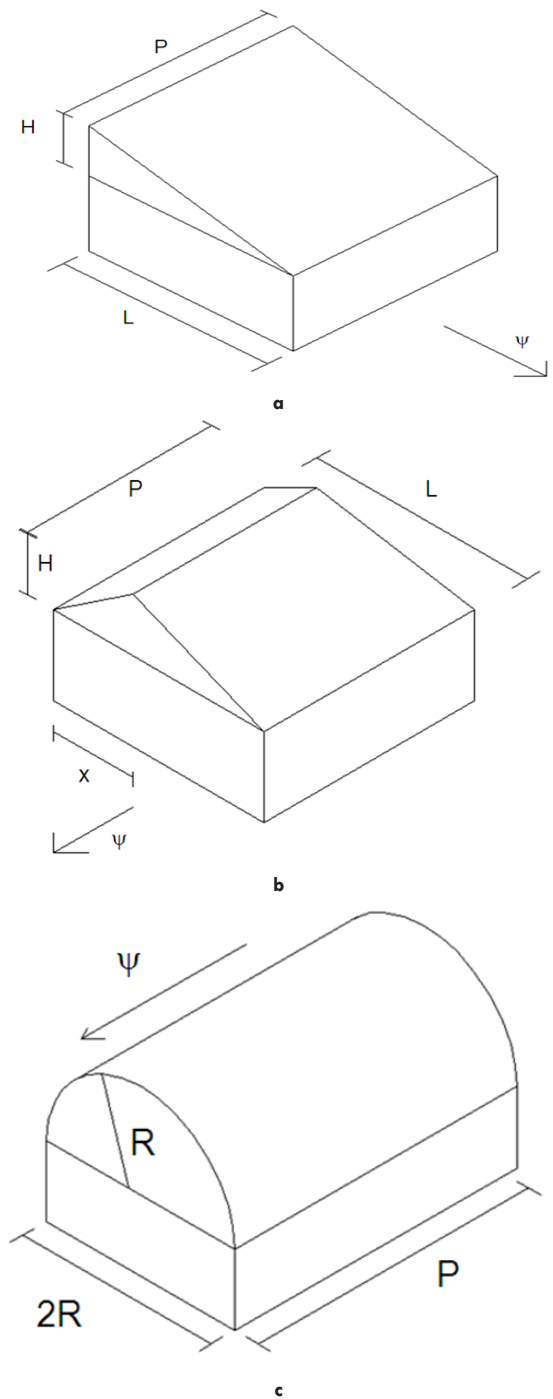


Figura 4. Parámetros de construcción de edificaciones con diferentes tipos de techos, usados para los cálculos de la energía solar incidente sobre la envolvente.

En la figura 5 se muestra el efecto de alargar desde 8 a 20 m las fachadas laterales de la construcción de referencia. El desempeño de la construcción disminuye de manera casi imperceptible cuando está orientada de este a oeste (azimut 90°) y muy acentuada cuando está orientada de norte a sur (azimut 0°), como ya se vio en la sección anterior.

Todos los techos tienen un comportamiento muy similar al modificar la orientación, con evidentes cambios en la escala del índice, donde se observa el mejor desempeño de la bóveda de cañón respecto a los demás techos, seguido del techo in-

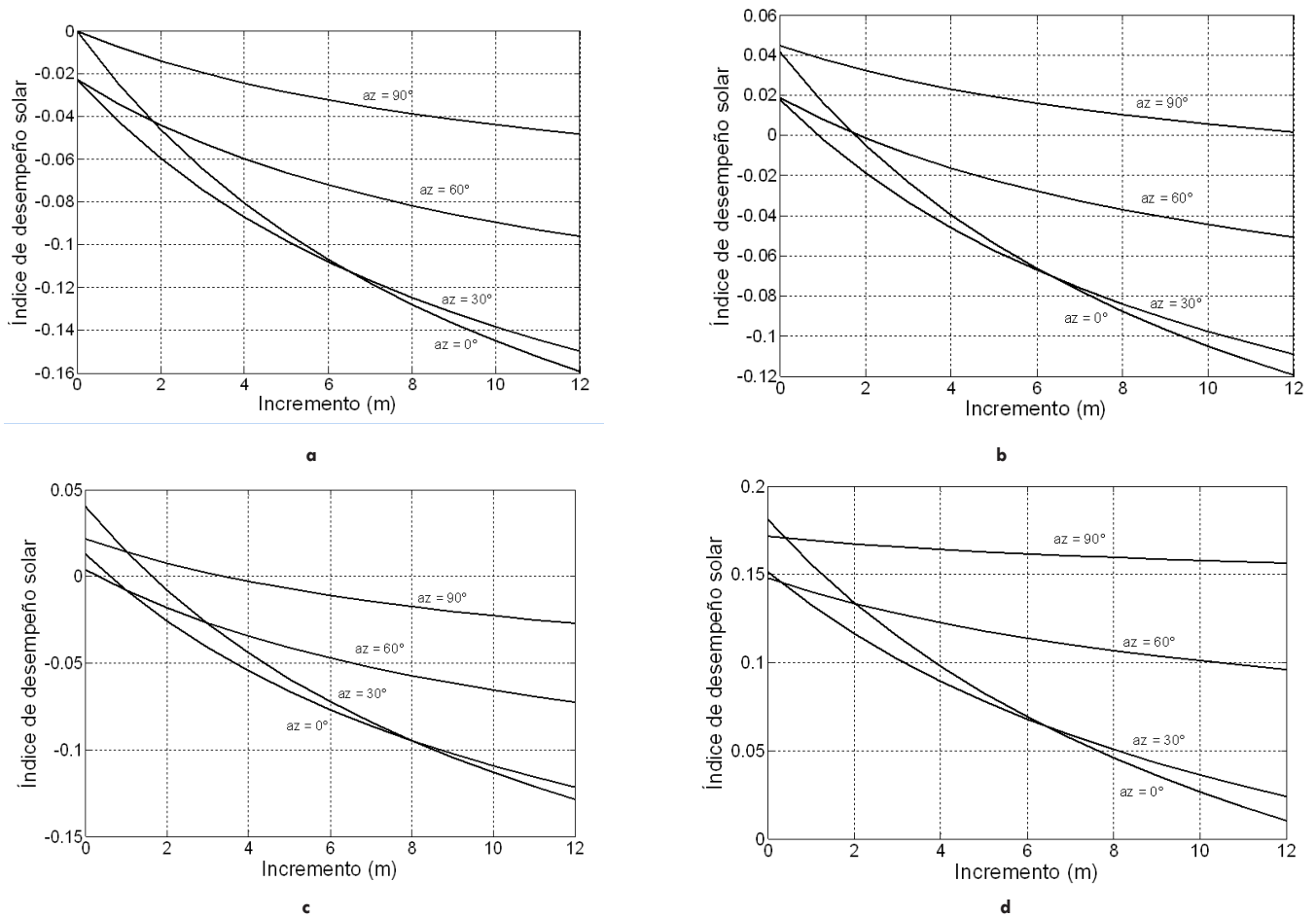


Figura 5. Comportamiento del índice al incrementar la longitud de la construcción, para diferentes tipos de techos y azimuts: (a) techo horizontal; (b) techo inclinado; (c) techo de dos aguas; (d) bóveda de cañón

clinado, el de dos aguas y el horizontal. En cualquiera de las orientaciones, la construcción con bóveda de cañón tiene mejor desempeño que los otros techos al incrementar la longitud, mayor para la orientada de este a oeste y disminuyendo hacia la peor, que es la orientada de norte a sur (Figura 5 d).

Para mayor claridad de la comparación se grafican los índices de desempeño para todos los techos con la orientación óptima de este a oeste, es decir azimut 90° , en donde se hace más evidente la conveniencia de las bóvedas de cañón para este tipo de construcción (Figura 6).

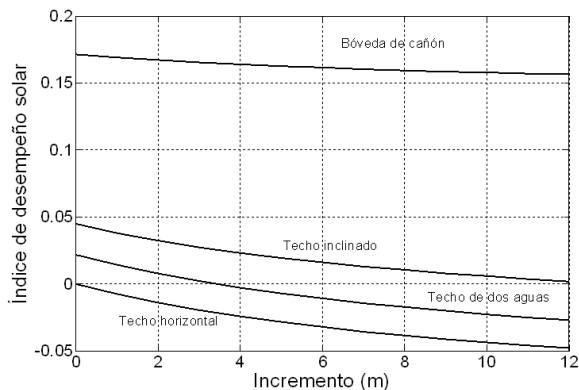


Figura 6. Efecto del alargamiento de la construcción con la orientación óptima, de este a oeste, para los cuatro tipos de techos.

Orientación de la construcción

La mejor orientación de una construcción de planta cuadrada con cualquier tipo de techo es hacia el Norte (azimut 180°), con las simetrías obvias en cada tipo de techo. Las peores orientaciones son para cuando el azimut es múltiplo de 45° que producen las mejoras más bajas, siendo incluso negativas para el caso del techo horizontal, seguidas por las orientaciones hacia el Este o hacia el Oeste (Figura 7).

La bóveda de cañón tiene un mejor desempeño que el resto de los techos considerados en este trabajo. En este análisis el tipo de techo es decisivo, lográndose índices alrededor de 0.16 que representan mejoras entre el 14% y 18% al cambiar el techo horizontal por una bóveda de cañón (Figura 7).

El segundo mejor techo en cuanto al desempeño solar es el inclinado, con su mejor orientación hacia el Norte (ver azimut en la Figura 4a), seguido por el de dos aguas. Estos dos techos sólo presentan simetrías para los azimuts 90° y 270° , es decir el plano inclinado hacia el Este o el Oeste, y la costilla o arista de unión del techo de dos aguas alineada en la dirección este-oeste. La construcción con techo horizontal sólo empeora al girarla y su mejor orientación es al alinear las fachadas con los puntos cardinales.

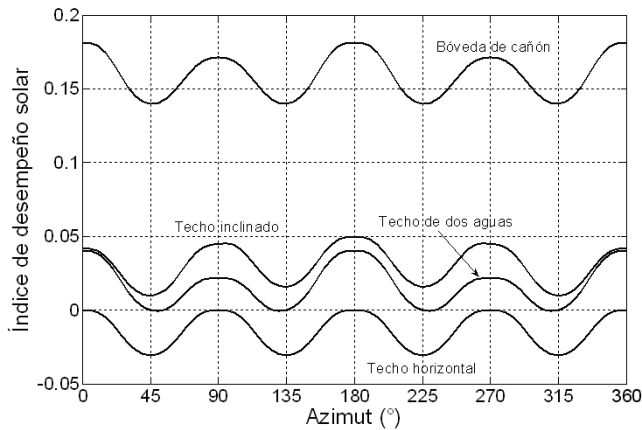


Figura 7. Índice de desempeño solar de una construcción en función del azimut, de $8 \times 8 \text{ m}^2$ y fachadas de 3 m de altura, para diferentes tipos de techos. Techo inclinado y de dos aguas de 1 m de altura, a una latitud de 24°N .

Construcciones con grandes techos

Es frecuente encontrar construcciones con techos grandes usadas como almacenes, centros deportivos y tiendas de autoservicio. Con el objeto de ofrecer un ejemplo con construcciones reales, en la tabla 1 se presentan los parámetros de construcción de este tipo de edificaciones con techo horizontal que serán evaluadas con el índice, todas ellas localizadas en la Cd. de La Paz. En este tipo de construcciones, el techo se convierte en un enorme colector solar.

Tabla 1. Parámetros de construcción de las edificaciones reales evaluadas de la ciudad de La Paz, BCS (latitud 24°N).

Construcción	Ancho (m)	Largo (m)	Altura (m)	Azimut ($^\circ$)
Cancha	30	40	15	45
Bodega	22	36	10	315
Alberca	30	90	15	45
Gimnasio	30	30	10	45
Almacén	70	80	15	5
Tienda 1	90	120	15	0
Tienda 2	90	150	15	355
Tienda 3	100	150	15	0

En la figura 8 se muestran en color negro los histogramas correspondientes a los valores reales de estas construcciones, tanto para el índice de desempeño solar, como para el valor de energía solar promedio que recibe la envolvente diariamente durante la primavera y el verano. La única construcción que tiene un valor positivo del índice real es la cancha, que es una construcción cerrada con techo horizontal de usos múltiples.

Al darle a cada construcción la mejor orientación, se obtienen los valores representados por los histogramas grises de la figura 8, lográndose mejoras sustanciales en las construcciones menores, principalmente en la cancha y en la alberca, lo cual indica que la orientación incorrecta afecta notoriamente su desempeño solar. En las tiendas y el almacén, la mejora es casi imperceptible.

Al cambiar el tipo de techo, sustituyendo el horizontal por la bóveda de cañón, la mejora en el desempeño es evidente en todas las construcciones (Figura 8a). En tal caso, todas ellas tienen índices positivos que representan mejoras de entre el 5%

para las tiendas hasta, hasta casi el 20% para la cancha y la bodega. La reducción de la energía solar sobre la envolvente (Figura 8b) seguramente se traduciría en grandes ahorros de energía empleada para el enfriamiento de las construcciones, particularmente en las tiendas de autoservicio.

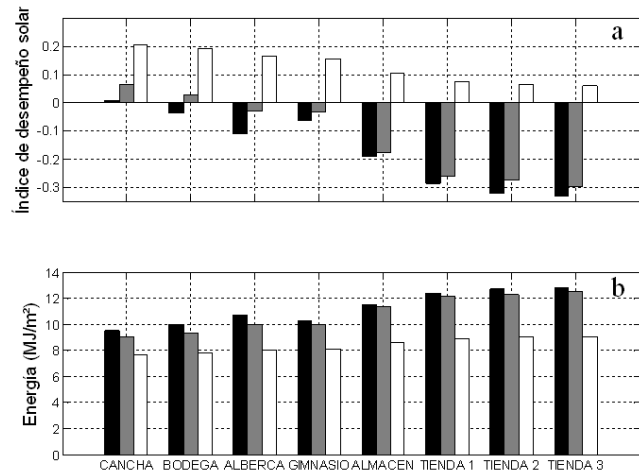


Figura 8. Comparación del índice de desempeño solar (a) y de la energía solar promedio sobre la envolvente (b), durante la primavera y el verano, para las diferentes edificaciones evaluadas. En cada caso la barra negra representa la situación real, la barra gris la mejora obtenida al optimizar su orientación y la barra blanca el resultado de cambiar en la anterior el techo horizontal por uno de bóveda de cañón.

Torres

Cuando la altura de las paredes es mucho mayor que las dimensiones de la base, se representa el comportamiento de una torre. De hecho, con cualquier tipo de techo que se emplee, el desempeño solar de la construcción es en promedio de 0.403 para una torre de 30 m, que se incrementa a 0.419 cuando la torre es de 40 m (Tabla 2).

A pesar de que los techos que no son planos son los que tienen el mejor desempeño, la diferencias entre todos ellos son mínimas. La radiación instantánea a lo largo del día sobre la envolvente de una torre, se asemeja a la radiación sobre la envolvente de las paredes exteriores. Con esto se demuestra que las diferencias entre las torres cuando se usan diferentes tipos de techo son pequeñas, y a su vez son menores cuando la torre incrementa su altura, esto es, cada vez importa menos el tipo de techo que se emplee.

Tabla 2. Energía solar (MJ/m^2) y valor del índice de desempeño solar a una latitud de 24°N y azimut 0° , sobre la envolvente de dos torres con fachadas de 30 y 40 m de altura para los diferentes tipos de techos: horizontal (TH) con una base $8 \times 8 \text{ m}^2$ y paredes de 3 m de altura; techos inclinado (T1) y de dos aguas (T2) de 2 m y bóveda de cañón (BC) de radio 4 m.

Techo	Altura de las paredes de la torre			
	30 m		40 m	
	Energía	Índice	Energía	Índice
TH	5.82	0.399	5.65	0.416
T1	5.80	0.400	5.64	0.417
T2	5.77	0.404	5.61	0.420
BC	5.73	0.408	5.59	0.422
Promedios	5.78	0.403	5.62	0.419

Conclusiones

El comportamiento del índice de desempeño solar fue muy similar entre las edificaciones de cada tipo de construcción, distinguiéndose claramente en aquellas en las que se cambió el tipo de techo, destacando la bóveda de cañón como el más adecuado en todos los casos. En otras palabras, las dimensiones y la orientación determinan la tendencia en los valores del índice, con cambios en su magnitud al modificar el tipo de techo.

Mediante el uso del índice se mostró que las construcciones alargadas empeoran su desempeño al aumentar su longitud y que en tal caso es indispensable orientarlas correctamente de este a oeste (azimut 90°). El uso de la bóveda de cañón en estas construcciones permite alargar la construcción manteniendo el índice por arriba de 0.15, esto podría ser de utilidad en la construcción de escuelas y lograr un mejor desempeño térmico.

También se demostró con el índice que la orientación óptima de una construcción de planta cuadrada es hacia el Norte (azimut 180°) con cualquier tipo de techo, que las construcciones con grandes techos mejoran sustancialmente con la bóveda de cañón y que las torres son prácticamente invariantes respecto al tipo de techo.

La importancia de este trabajo radica en la posibilidad de evaluar los efectos de los diseños de los arquitectos desde la perspectiva de su desempeño solar y la posibilidad de que se busquen opciones de viviendas más confortables. Aunque este trabajo está concebido con un enfoque bioclimático a través del uso de técnicas pasivas, los resultados encontrados en este contexto en cuanto al desempeño solar de las construcciones, indican que se puede tener un considerable ahorro de energía eléctrica que implica menor contaminación para operar los equipos de enfriamiento, que podrían incluso omitirse, dependiendo del diseño empleado.

Bibliografía

Chwieduk, D.A. 2008. "Some aspects of modelling the energy balance of a room in regard to the impact of solar energy". *Solar Energy* 82(19): 870-884.

Coch, H. 1998. "Bioclimatism in vernacular architecture". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2(1-2): 67-87.

Datta, G. 2001. "Effect of fixed horizontal louver shading devices on thermal performance of building by TRNSYS simulation". *Renewable Energy* 23(3-4): 497-507.

Duffie, J.A. and W.A. Beckman. 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, New York, 827 pp.

Fathy, H. 1986. *Natural Energy and Vernacular Architecture. Principles and Examples with Reference to Hot Arid Climates*. The University of Chicago Press, Chicago, 172 pp.

Hadavand, M. and M. Yaghoub. 2008. "Thermal behavior of curved roof buildings exposed to solar radiation and wind flow for various orientations". *Applied Energy* 85 (8): 663-679.

Hadavand, M., M. Yaghoubi and H. Emdad. 2008. "Thermal analysis of vaulted roofs". *Energy and Buildings* 40(3): 265-275.

Hiller, M.D.E., W.A. Beckman & J.W. Mitchell. 2000. "TRNSHD, a program for shading and isolation calculations". *Building and Environment* 35: 633-644.

Gómez-Muñoz, V.M., M.A. Porta-Gándara and C. Heard. 2003. "Solar performance of hemispherical vault roofs". *Building and Environment* 38(12): 1431-1438.

Gopinathan, K.K., N.B. Maliehe and M.I. Mpholo, 2007. "A study on the intercepted insolation as a function of slope and azimuth of the surface". *Energy* 32(3): 213-220.

Gratia, E. & A. De Herde. 2001. "A simple design tool for the thermal study of dwellings". *Energy and Buildings* 34: 411-420.

Karlsson, J., A. Roos & B. Karlsson. 2003. "Building and climate influence on the balance temperature of buildings". *Building and Environment* 38(1): 75-81.

Knowles, R.L. 2003. "The solar envelope: its meaning for energy and buildings". *Energy and Buildings* 35(1): 15-25

Runsheng, T., I. A. Meir and Y. Etzion. 2003. "An analysis of absorbed radiation by domed and vaulted roofs as compared with flat roofs". *Energy and Buildings* 35(6): 539-548.

Sabzevari, A. and A.A. Golneshan. 1990. "Solar radiation intensity on domed roofs". *Solar & Wind Technology* 7(6): 625-647.