



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

DESEMPEÑO SOLAR DE VIVIENDAS

TESIS

Que para obtener el grado de

Doctor en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación Ecología)

Presenta

Victor Manuel Gómez Muñoz

La Paz, Baja California Sur, junio de 2003

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 10 horas del día 19 del mes de mayo de 2003 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por la Dirección de Estudios de Posgrado del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., para revisar la Tesis de Grado titulada:

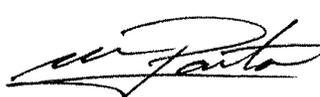
"Desempeño solar de viviendas"

Presentada por el alumno:

Victor Manuel Gómez Muñoz

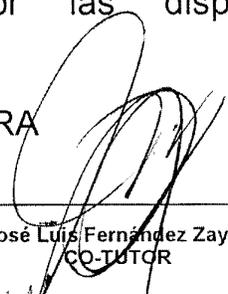
Aspirante al Grado de DOCTOR EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN ECOLOGÍA.

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

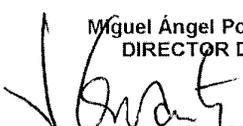


LA COMISIÓN REVISORA

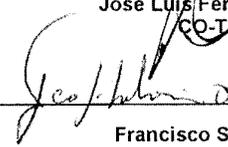
Miguel Ángel Porta Gándara
DIRECTOR DE TESIS



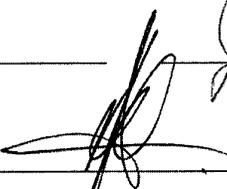
José Luis Fernández Zayas
CO-TUTOR



Jaime Cervantes de Gortari
CO-TUTOR



Francisco Solorio Ordaz
CO-TUTOR



Sergio Hernández Vázquez
CO-TUTOR



DRA. THELMA ROSA CASTELLANOS CERVANTES,
DIRECTORA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**Tesis de Doctorado en Ciencias en
Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación Ecología)**

Victor Manuel Gómez Muñoz

**Comité Tutorial
Comité Revisor de Tesis
Miembros del Jurado de Examen Doctoral**

Co-tutor principal: Dr. Miguel Ángel Porta Gándara
CIBNOR, S.C., La Paz, B.C.S.

Co-tutor: Dr. José Luis Fernández Zayas
Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D.F.

Co-tutor: Dr. Jaime Cervantes de Gortari
Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.

Co-tutor: Dr. Francisco Solorio Ordaz
Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.

Co-tutor: Dr. Sergio Hernández Vázquez
CIBNOR, S.C., La Paz, B.C.S.

Suplente: Dr. Federico Poujol Galván, UABCS, La Paz, B.C.S.

ÍNDICE GENERAL

DESEMPEÑO SOLAR DE VIVIENDAS

Resumen	i
Introducción	ii
Capítulo 1. Radiación Solar	1
Capítulo 2. Incidencia Solar sobre una Vivienda Convencional	19
Capítulo 3. Radiación Solar sobre una Vivienda	34
Capítulo 4. Radiación Solar sobre Diferentes Tipos de Techos	46
Capítulo 5. Radiación Solar sobre la Envolvente de una Vivienda	70
Capítulo 6. Índices de Desempeño Solar de una Construcción	103
Capítulo 7. Control Solar	116
Conclusiones	138
Bibliografía	140

Apéndices

1. Generación de Datos Sintéticos de Temperatura y Viento
2. Trayectorias Solares Aparentes
3. Energía Solar sobre un Techo Inclinado
4. Artículos Científicos

Gómez-Muñoz, V.M. & M.A. Porta-Gándara. 2003. **Simplified architectural method for solar control optimization of awnings and external walls in houses in dry and hot climates**. Renewable Energy, 28(1): 111-128.

Porta-Gándara, M.A, E. Rubio, J.L. Fernández & V. Gómez-Muñoz. 2002. **Effect of passive techniques on interior temperature in small houses in the dry, hot climate of northwestern Mexico**. Renewable Energy, 26(1): 121-135.

Gómez-Muñoz, V.M. & M.A. Porta-Gándara. 2002. **Local wind patterns for modeling renewable energy systems by means of cluster analysis techniques**. Renewable Energy, 25(2): 171-182.

Resumen

Desempeño Solar de Viviendas. En este trabajo se proponen métodos y criterios para evaluar las condiciones de una vivienda y poderla mejorar desde el punto de vista del confort y el ahorro energético, en función de la radiación solar incidente y de sus características constructivas, especialmente para climas cálidos secos, como ocurre en gran parte del Noroeste de México. Se toman en cuenta algunos de los conceptos básicos de la arquitectura bioclimática, como son la orientación, el sombreado y la geometría de su envolvente. Se presenta un análisis detallado del desempeño solar de la envolvente de una vivienda con diferentes tipos de techos y un índice que permite evaluar una vivienda desde esta perspectiva. El sistema de evaluación se basa en una simplificación derivada del estudio de la incidencia de radiación solar directa sobre la fachada y el techo, a lo largo de todos los días del año. Se describe además el desarrollo matemático y la aplicación de un modelo general de un enfoque original para la optimización de la interacción entre los tejados y las bardas como elementos de sombreado y su representación gráfica.

Abstract

Dwelling Solar Performance. In this dissertation, some methods and criteria are proposed to evaluate and improve dwelling conditions from the point of view of comfort and energy savings, based on the incident solar radiation and the construction characteristics, especially for dry and hot climates, as it happens in a large extent of the northwest region of Mexico. Some basic concepts of the bioclimatic architecture are taken into account, as orientation, shading and geometry. A detailed analysis is presented of the solar performance of the dwelling with different types of roofs and an index is proposed that allows the evaluation of a shelter from this perspective. The evaluation system is based on a simple model for the daily incidence of direct solar radiation on the facade and the roof, throughout every day of the year. Additionally, a general mathematical model is developed to optimize the shading interaction between awnings and external walls, and its applications are fully evaluated.

Introducción

En este trabajo se presentan resultados que contribuyen a mejorar las condiciones de la vivienda en función de la radiación solar incidente, con énfasis en climas cálidos secos, por medio de la elaboración de un índice de desempeño solar de viviendas, así como de algoritmos y aportaciones teóricas y metodológicas dirigidas a la evaluación de un proyecto de construcción en función de su geometría, orientación, tipo de techo y parámetros de construcción.

Se ha puesto especial cuidado en que los resultados y las metodologías desarrollados aquí tengan una utilidad práctica, no sólo para los fines de este trabajo, sino también para su aplicación directa por parte de los profesionales que trabajan en estos temas. Además de las recomendaciones específicas para determinadas disciplinas de la investigación solar, se señalan los aspectos básicos que tienen implicaciones ecológicas, tanto en el ámbito del ahorro de energía, como de la contaminación que se genera a través de la generación de la misma y de los equipos de enfriamiento mecánico de las viviendas. Este punto tiene importancia a nivel global desde la perspectiva de la construcción masiva de viviendas, sobre todo de interés social, que pudieran tener un desempeño energético inadecuado.

La mayoría de los conceptos y de los ángulos solares necesarios para desarrollar este trabajo están disponibles en la literatura especializada. Las definiciones y la notación de los que se van a usar se presentan en el Capítulo 1, incluyendo un apartado relativo a la medición directa de tales ángulos. En ese mismo capítulo se incluye la formulación para el cálculo de la radiación solar sobre un plano inclinado, con resultados originales acerca de la verificación de la incidencia solar sobre un plano inclinado.

El número de horas de incidencia solar sobre un techo horizontal o sobre las fachadas o paredes verticales exteriores de la vivienda se presenta en el capítulo 2, con los que se demuestra la enorme contribución de este tipo de techo en el soleamiento de la vivienda a lo largo del año, en diferentes latitudes. También se calcula en el capítulo 3, en los mismos términos, la radiación solar directa sobre las fachadas y el techo horizontal, donde se demuestra que amerita analizar una alternativa diferente para el tipo de techo que permita reducir la energía incidente sobre la vivienda, junto con otras opciones que ofrece la arquitectura bioclimática.

En el capítulo 4 se analiza la radiación solar directa sobre diferentes tipos de techos de manera independiente a las paredes exteriores de la vivienda, como fundamento del cálculo de la energía solar diaria sobre la envolvente de una vivienda con diferentes geometrías, dimensiones, orientación y tipo de techo (capítulo 5). Se sometieron a prueba viviendas de planta rectangular y de planta cuadrada con varios tipos de techo: horizontal (*flat roof*, en inglés), inclinado (*tilted roof*), de dos aguas (*gabled roof*), de cuatro aguas (*hipped roof*), bóveda de cañón (*barrel vault*), cónico (*conic roof*) y domo o cúpula (*dome* o *hemispheric vault*).

Con fundamento en la simetría respecto a los solsticios que se observa en todos los cálculos relacionados con la radiación a lo largo del año, se encontró que los valores promedios entre las estimaciones correspondientes al equinoccio de primavera (día 80 del año, equivalente al de otoño: 264) y al solsticio de verano (día 172), representan el promedio diario a lo largo de la primavera y el verano, estaciones clave para evaluar y proponer diseños arquitectónicos que mejoren el desempeño solar de las viviendas. Esto dio lugar a la elaboración de un índice simple de desempeño solar que permite evaluar

múltiples opciones diseños de viviendas en función de su geometría, orientación, tipo de techo y dimensiones arquitectónicas. En el capítulo 6 se muestran algunas aplicaciones de estos criterios.

El capítulo 7 se refiere al control solar, en el que específicamente se muestra la interacción entre una barda y un tejado para sombrear una fachada, con particular énfasis en las ventanas, con una nueva metodología que permite manejar tales dispositivos de sombreado de múltiple formas, dependiendo de las estrategias del constructor o del propietario para aplicar el sombreado, principalmente en las fachadas de orientación preponderante hacia el Este o el Oeste, en las que un solo dispositivo no cumple la función esperada.

Se ofrecen en tres apéndices resultados útiles sobre la generación de datos sintéticos de temperatura y patrones de viento (Apéndice 1), trayectorias solares aparentes para diferentes días del año y latitudes (Apéndice 2) y radiación sobre un plano inclinado para diferentes inclinaciones y latitudes (Apéndice 3).

Además de las contribuciones científicas originales que se lograron (Apéndice 4), 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 esta concebido con un enfoque bioclimático a través del uso de técnicas pasivas, los resultados encontrados en este contexto en cuanto al desempeño y control solar de viviendas, 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.

Presentación del Problema

Es posible calcular el desempeño solar de una construcción de una manera que permita evaluar alternativas de construcción masiva de viviendas que promuevan el confort de sus habitantes, el ahorro de energía y la reducción de la contaminación, por medio de diseños arquitectónicos que consideren los principios de la arquitectura bioclimática.

Antecedentes

A continuación se presenta una revisión bibliográfica de algunos aspectos relacionados con la arquitectura bioclimática y vernácula, las técnicas pasivas para mejorar el desempeño energético de las viviendas, así como una revisión de las contribuciones en las que se han usado o propuesto modelos para tal fin. También se considera la literatura científica referente al entorno físico que se debe considerar en el diseño arquitectónico bioclimático que además contemple los problemas de contaminación y el ahorro de energía derivados del uso de dispositivos mecánicos para el enfriamiento de las construcciones que no aplican estos aspectos.

Arquitectura bioclimática y vernácula

El concepto de arquitectura bioclimática se puede definir como la respuesta de la arquitectura para ofrecer espacios vitales en consideración del medio ambiente: clima, aprovechamiento y ahorro de agua y energía y disminución de la contaminación.

En Rodríguez Viqueira et al. (2001) se presentan los principales conceptos relacionados con esta disciplina, desde los elementos del clima relacionados con la arquitectura como temperatura, humedad, precipitación, viento, nubosidad, radiación, etc., que a su vez están asociados a factores geográficos como latitud, altitud, relieve, cuerpos de agua y corrientes marinas, hasta los conceptos arquitectónicos como orientación y emplazamiento, control solar, ventilación, iluminación, calentamiento solar de agua, eficiencia energética y confort acústico.

Cualquier análisis del papel jugado por la energía en la arquitectura se enfrenta con serias limitaciones debido a la falta de estudios en la bibliografía de esta disciplina, sobre todo en arquitectura popular. Estas limitaciones permiten entender por qué los arquitectos han prestado poca atención a la interacción entre la forma y la energía, así como al enfoque bioclimático en la arquitectura contemporánea en general (Coch, 1998).

En Rudofsky (1987) aparece un compendio de ejemplos de arquitectura con los que intenta romper los conceptos del arte de la construcción o arquitectura formal que se ha desviado del fin social que la disciplina debería tener. Agrupa bajo el concepto de arquitectura vernácula a la que es anónima, espontánea, indígena o rural.

La arquitectura vernácula ha resurgido en la autoconstrucción de asentamientos urbanos, en los que se analiza la respuesta de la construcción al clima, gracias a las ventajas científicas y técnicas de los diseños bioclimáticos en climas tropicales (Labaki & Kowaltowski, 1998).

Las casas de diseño tradicional en las que durante siglos han vivido las personas de escasos recursos, les ha permitido sobrevivir en climas adversos e incluso ocasionalmente vivir confortablemente (Fathy, 1986).

En el caso particular de las viviendas en climas cálidos y áridos, Fathy (1986) analiza las propiedades de las construcciones árabes que se han usado por mucho tiempo que ofrecen un microclima confortable usando adecuadamente la energía natural. En un libro que le dio notoriedad en el ámbito de la arquitectura popular o de interés social como se denomina en México, Fathy (1973) asienta a detalle el experimento que hizo para fundar la ciudad de Nueva Gurna, Egipto, sustentado en los conceptos bioclimáticos de la arquitectura vernácula de aquella región junto con la incorporación de algunos conceptos y avances científicos disponibles en ese entonces.

La posibilidad de autoconstrucción y cooperación comunitaria fue otro concepto manejado en aquel proyecto, en el que se usaron técnicas constructivas simples, que aún en

tiempos más recientes son mencionadas en los manuales populares, como es el caso de la construcción de techos abovedados de cañón y hemisféricos (Van Legen, 1981: 383-387), que en México usualmente se manejan como opciones decorativas en construcciones costosas que nada tienen que ver con la arquitectura para las grandes masas como una opción para brindar confort.

Técnicas pasivas

Se estima que durante los próximos 40 años se construirán alrededor de 1000 ciudades con tres millones de habitantes cada una y que a partir del 2005 más de la mitad de la población mundial vivirá en ciudades, por lo que dentro de los patrones de sostenibles de convivencia urbana se debe considerar el uso racional del agua y la energía, primordialmente por sus efectos ambientales (Bindé, 1998), o que impliquen un ahorro de energía y que consideren un aumento del confort (Rousseau y Mathews, 1996).

En la selección de los proyectos de diseño arquitectónico producidos desde 1983 de Hawkes (1995), cada uno éstos incorpora aspectos de la investigación en el diseño de baja energía que siguió al aumento del costo de la energía que ocurrieron a principios de los años setenta. Hawkes demuestra cómo tales proyectos individuales se pueden considerar colectivamente como elementos de una ciudad de baja energía, o como pasos hacia la idea de una ciudad sostenible.

Las tecnologías de bajo consumo de energía basadas en los sistemas solares para el enfriamiento de construcciones, reducen el impacto y el alto consumo de los sistemas de enfriamiento mecánicos (Florides et al., 2002).

Se han publicado resultados sobre el uso de diversos dispositivos para mejorar el desempeño térmico de una construcción, mediante el sombreado, mejoras en las ventanas y la transferencia de calor.

El uso de índices para evaluar la eficiencia del sombreado todavía es incipiente y controvertido. Es este aspecto destacan los trabajos de McCluney (1986, 1990 y 1991), con referencia particular a los toldos.

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, tomando en cuenta la posición del sol y la geometría de las superficies (Hiller et al. 2000), eficiencia de las rejillas para sombreado mediante programas de simulación (Datta, 2001).

Se ha simulado el comportamiento térmico de habitaciones y edificios, considerando la radiación solar y el sombreado mediante programas de cómputo que usan modelos para el cálculo de las temperaturas y las cargas debidas al calentamiento y al enfriamiento de las construcciones (Källblad, 1998 y 1999). Uso de cortinas exteriores para modular las ganancias térmicas (Talmatamar et al., 1995; Pfrommer et al., 1996).

Existen métodos que incluyen el sombreado de los alrededores para calcular la radiación solar sobre superficies inclinadas que permiten planear y administrar el sombreado (Quaschnig & Hanitsch, 1998).

Se ha puesto un énfasis particular en el diseño de las ventanas, como uno de los elementos más importantes en los criterios y estrategias de la arquitectura bioclimática tropical (McCluney & Houston, 1983).

Los modelos de computadora se han usado para simular la penetración de la luz natural cuando se emplean rejillas de sombreado paralelas ajustables en construcciones árabes donde la exclusión de la radiación solar directa es de la mayor importancia (Al-Shareefa et al., 2001).

Por medio del programa de simulación de transferencia de calor HTB2, se evaluó la carga anual y máxima para el enfriamiento de dos viviendas horizontales en Hong Kong, debidas diferentes tipos ventanas y orientaciones, tipos de vidrio: transparente, entintado, reflejante y entintado reflejante (Bojic et al., 2002).

La efectividad de los dispositivos de sombreado en combinación con los tipos de vidrios en las ventanas se puede evaluar a través de la transmitancia de la energía solar, validados con mediciones calorimétricas, que a su vez permiten evaluar las diferentes estrategias de control solar (Kuhn et al., 2000). Reilly et al. (1995) estudiaron el aislamiento óptimo de las ventanas.

Se han desarrollado sistemas de clasificación de viviendas para la generación de datos que permiten modelar el consumo de energía doméstico en una ciudad y cuantificar los ahorros y las reducciones potenciales de la energía en emisiones del bióxido de carbono en función de la planeación de la energía solar basada en el diseño solar pasivo mediante el uso de calentadores solares de agua y celdas fotovoltaicas (Gadsden et al., 2003).

Se ha intentado simular y evaluar el ciclo de vida de una construcción ligado a una simulación térmica sustentada en la base de datos europea REGENER. Con esa técnica se compararon tres tipos de casas en Francia (estándar, de madera y solar) sin que se haya podido concluir la selección de materiales y componentes más adecuados desde el punto de vista de protección ambiental y energético. Sin embargo la técnica es útil para evaluar la mejora de soluciones técnicas como el aislamiento del techo en la casa solar (Peuportier, 2001).

La simulación de los flujos de energía para varios tipos de casas permite calcular su temperatura interior. Una casa bien aislada, por ejemplo, disminuye su temperatura interior entre 5 y 11°C según la época del año, respecto a una casa sin aislamiento con techo horizontal (Florides et al., 2001). Con el aislamiento de las paredes y el techo es posible reducir las cargas de calor hasta en 50% (Jaber, 2002).

Por medio de simulaciones y trabajo experimental, se demostró que utilizando técnicas pasivas en una construcción en Colombo, Sri Lanka, es posible reducir la temperatura interior 3 y 0.4°C en diciembre, cuando las temperaturas exteriores máxima y mínima fueron 31 y 27°C respectivamente. La mayoría de los edificios modernos para oficinas en ese país se han diseñado para usar aire acondicionado para enfrentar las condiciones del clima cálido y húmedo (Ratnaweera & Hestnes, 1996).

Mediante evaluación económica a largo plazo, Porta-Gándara et al. (2002a) demostraron que el ahorro de energía en la construcción de viviendas en climas tropicales y secos usando técnicas de construcción pasivas, basadas en la construcción de paredes con bloques de adobe, es mejor por un amplio margen que las construidas en la actualidad con bloques de arena y cemento.

Modelos, métodos y programas de cómputo

Los problemas de calentamiento de las viviendas por causa de la radiación solar directa han sido abordados desde diferentes enfoques y metodologías.

Se dispone de buenas recopilaciones de los elementos fundamentales de algunos de los temas que intervienen en los problemas: transferencia de calor (Bejan, 1984; Thomas, 1992; Cervantes de Gortari, 1999), radiación solar y sistemas solares (Fernández Zayas, 1987), ingeniería de la energía solar (Almanza y Muñoz, 1994), energía solar y procesos térmicos (Duffie y Beckman, 1991) y fenómenos de transporte (Bird et al., 1982).

Más específicamente se han propuesto algoritmos globales para el cálculo de la transferencia de calor total en los recintos (Lorente et al., 1996) y métodos de cómputo para el cálculo de las cargas térmicas de los sistemas de aire acondicionado (Balaras, 1996).

En el reporte final de 1998 del *Building Group* del *CANMET Technology Center* de la agencia gubernamental canadiense *Natural Resources of Canada* se presenta un análisis de 31 programas para el análisis energético de edificios residenciales, entre los que se encuentran su propio programa *HOT2000*, *Energy Plus* (fusión del *DOE-2* y *Blast*), *TRNSYS*, *QUICK*, *ENERPASS*, etc., con el fin de desarrollar la nueva versión denominada *HOT3000*. Refieren en ese informe los autores y sus direcciones, así como los artículos donde fueron dados a conocer sus programas.

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.

Se puede reducir el costo de la energía mecánica para el enfriamiento de las viviendas en los climas áridos y secos, maximizando la ventilación natural y minimizando la fracción energía solar absorbida por una construcción utilizando el techo como colector solar. Se han estudiado experimentalmente los efectos de las aberturas en los colectores solares de las viviendas sobre el flujo de aire y el confort térmico (Khedari et al., 2000).

Por medio de una cartografía de las temperaturas superficiales simulada con el programa *TRNSYS* (Transient System Simulation Program) se han localizado lugares donde se recibe un sobrecalentamiento solar que permite definir zonas en los que se puede calcular la distribución dinámica de los flujos solares (Trombe et al., 1999).

El tema del confort en las viviendas tiene muchos aspectos subjetivos que se han tratado de subsanar mediante encuestas entre los habitantes de las mismas. El programa *EPIQR* (Energy Performance Indoor Environmental Quality Retrofit) es una metodología desarrollada para auxiliar a los propietarios que están considerando remodelar o modernizar sus construcciones. Está basada en un programa de cómputo que identifica las acciones más apropiadas en este sentido, con una estimación del costo inicial, tomando en cuenta el gasto energético y la calidad del ambiente interior. El método inicia con una aplicación de encuestas entre los residentes para evaluar 50 elementos de construcción. Esta metodología se desarrolló como resultado de un proyecto europeo de investigación de dos años (Jaggs & Palmer, 2000).

También se ha aplicado la técnica de redes neuronales para obtener predicciones a largo plazo basadas en series cortas de datos de la demanda energética en viviendas unifamiliares (Olofsson & Andersson, 2001).

Por medio de sistemas de ecuaciones diferenciales que representan el balance de energía en una vivienda construida con materiales típicos de la región Noroeste de México, donde predominan condiciones cálidas con grandes variaciones climáticas, se evaluaron técnicas pasivas como el sombreado de las ventanas, la orientación y la inercia térmica de la construcción (Porta et al., 2002b).

Boland (2002) presenta una simplificación del método formal para resolver las ecuaciones diferenciales que describen la transferencia de calor en viviendas. Boland (1997) encontró que los componentes estocásticos de la temperatura ambiente y la radiación solar son críticos cuando se calculan las cargas por calentamiento o enfriamiento de una vivienda, al contrario de lo que ocurre al determinar la energía, pues en tal caso el componente no determinístico de la temperatura puede ser eliminado.

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 & De Herde, 2001).

También se han desarrollado modelos matemáticos para cálculos de sombreado sobre superficies orientadas arbitrariamente (Budin & Budin, 1982; Niewianda & Heidt, 1996).

Entorno físico

La necesidad de proyectos de construcción sostenibles se está reconociendo más extensamente, en parte debido a la disminución de los recursos energéticos del mundo y en parte por el problema del calentamiento global y el incremento de los precios del petróleo. Este tipo de problemas requiere del concurso de arquitectos, ingenieros e investigadores que colaboren para la construcción de edificaciones que mejoren el confort, con un bajo consumo de energía y que produzcan poca contaminación. La extensión del conocimiento científico a las profesiones más prácticas ha tenido impacto en el diseño de edificios de zonas tropicales, conforme a la revisión de Garde-Bentaleb et al. (2002).

En muchos países la energía doméstica para electricidad, enfriamiento o calefacción del espacio residencial, y particularmente el calentamiento del agua, depende primordialmente de la combustión de combustibles fósiles, los cuales contribuyen de manera significativa a la contaminación del aire y a la acumulación de bióxido de carbono en la atmósfera.

El uso eficiente de la electricidad es clave para la conservación de recursos energéticos y para la reducción de la emisión de gases que contribuyen al calentamiento global de la tierra. En muchos países el consumo de electricidad de los edificios comerciales está destinado principalmente a la operación de aires acondicionados.

El consumo de energía doméstica tiene una aportación significativa a las emisiones de CO₂ (directa e indirectamente) y otros contaminantes (Colombo, 1995) por lo que se requiere reducir drásticamente las ganancias solares en verano que contribuyan a reducir tales emisiones, principalmente por el uso de los equipos de enfriamiento. Por ejemplo, en Hong Kong representa el 48% de la electricidad que se consume en tales edificios y aproximadamente el 30% de la energía eléctrica que se consume en esa ciudad (Lee et al., 2003).

Con el objeto de proponer diseños arquitectónicos adecuados, es de particular interés el conocimiento del comportamiento de las variables ambientales que más influyen en el clima del lugar donde se encuentra una construcción y por ende en el confort de sus habitantes.

En los programas de cómputo para la simulación térmica de edificios, se requieren datos meteorológicos para los estudios de evaluación energética y confort térmico. Para generar este tipo de datos, que genéricamente podríamos llamar "datos sintéticos", existen pocas metodologías, como la que presentan Adelard et al. (2000) para generar datos del estado del tiempo para toda clase de climas que permiten la evaluación de una construcción desde el punto de vista físico.

En el Apéndice 1 se muestra un modelo para la generación de datos sintéticos de la temperatura ambiente y el uso de una metodología estadística para encontrar patrones de la intensidad del viento que pueden ser considerados por los constructores y los propietarios para el diseño general de la vivienda. Con excepción de la radiación solar directa, ningún otro elemento ambiental está incluido explícitamente en la modelación que se presenta en este trabajo, pero no se justifica el desconocimiento de algunas variables ambientales como la temperatura y el viento.

La información sobre la energía solar sobre un plano inclinado del Apéndice 2, también puede ser usada para fines opuestos a los presentados en este trabajo para la captación más eficiente de la radiación, localizando los ángulos de inclinación y las orientaciones más efectivas de los colectores de las casas solares, que por lo regular se encuentran instalados en los techos de las viviendas (Imbabi & Musset, 1996; Fuentes & Roaf, 1996).

Capítulo 1
RADIACIÓN SOLAR

§ 1.1. Ángulos Solares

Definiciones y Notación

Se anotan en esta sección las definiciones necesarias para el desarrollo de la teoría y de los algoritmos para el control solar de una vivienda, la mayoría tomadas de Duffie & Beckman (1991). Cuando amerita alguna aclaración particular en el contexto de este trabajo o se complementa el concepto con algún comentario, éstos se incorporan como parte de la definición.

Latitud (lat). Localización angular de un sitio sobre la esfera terrestre, medida a partir del Ecuador de norte a sur, positiva en el primer caso y negativa en el segundo. Rango:

$$-90^\circ \leq lat \leq 90^\circ$$

Declinación (δ). Posición angular del sol al mediodía solar (cuando el sol pasa por el meridiano local) con respecto al plano del Ecuador, positivo hacia el Norte. Rango:

$$-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$$

Para un día del año n , Cooper (1969) propuso la siguiente expresión para el cálculo de la declinación:

$$\delta = 23.45^\circ \text{ sen } (360^\circ (284 + n) / 365) \quad (1.1)$$

Elevación (β). Es la posición angular de un astro desde un punto de la superficie terrestre con respecto al plano horizontal. Rango:

$$0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$$

Ángulo Cenital (θ_z). Es la medida angular de los rayos solares respecto a la vertical del lugar. El rango de este ángulo se considera desde el amanecer hasta el atardecer en el intervalo:

$$-90^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$$

Azimuts. Son todos los ángulos medidos en el plano horizontal del lugar y se miden en este trabajo respecto al Sur, levógiros positivos, y dextrógiros negativos. Los azimuts equivalen a los rumbos en otras disciplinas. Entonces el rango de cualquier azimut será entre -180° y 180° . Se deberá prestar especial cuidado en el caso de verificaciones con desigualdades, que los azimuts no se salgan de ese intervalo, ya que entonces las desigualdades podrían cumplirse o no en falso ante giros enteros de 360° , o por medio de adiciones que los hagan salir del rango mencionado. En previsión de estos problemas se aplicará el siguiente algoritmo computacional (es decir la igualdad no es numérica, sino una sustitución de variable) para cualquier azimut (**az**) que podría no estar dentro del intervalo previsto:

$$\mathbf{az = mod (az + 180, 360) - 180} \quad (1.2)$$

Efectivamente:

$$\mathbf{mod (az - 180, 360) \in [0, 360]}$$

así que:

$$\mathbf{mod (az - 180, 360) - 180 \in [- 180, 180]}$$

Azimut Solar (ϕ). Es el azimut obtenido al proyectar el ángulo de incidencia del sol sobre el plano horizontal del lugar.

Ángulo Horario (ω). Es el desplazamiento angular del sol desde el amanecer hasta el atardecer respecto al meridiano local. Vale cero al mediodía solar, positivo hacia el amanecer y negativo hacia el atardecer.

Hora Solar (t). Es la hora del día conforme a los desplazamientos angulares del sol respecto al meridiano local. A las 12 h es el mediodía solar, y se mide a razón de una hora solar por cada 15° de desplazamiento angular del sol. Es la hora verdadera en cualquier punto de la esfera terrestre. La hora civil o estándar no se usa en este trabajo.

Bóveda Celeste. Uno de los principales elementos de análisis y comprensión en este trabajo es la gráfica de la trayectoria aparente del sol en la bóveda celeste en un determinado sitio de la esfera terrestre. La posición del sol en la bóveda celeste se determina con la elevación y el azimut solar, en función de la latitud, el día del año y la hora solar. Se usan como referencia de la elevación círculos concéntricos representando la elevación nula en el radio mayor, hasta el centro de todos ellos, que representaría la elevación de 90 grados, La referencia del azimut solar son radios con un ángulo igual al valor del azimut solar, medido con respecto al Sur, como ya se dijo.

Ángulos de Incidencia del Sol sobre un Colector Plano

En el tema del control solar sobre las viviendas, las paredes exteriores (que en lo sucesivo llamaremos genéricamente fachadas) y el techo pueden funcionar como colectores de la radiación del sol. La radiación solar directa depende de la proyección del ángulo de incidencia del sol sobre el colector, medido respecto a la normal al plano que lo contiene. Entonces, es de particular interés conocer los ángulos relativos al colector, como su inclinación, y los ángulos de las sombras proyectadas sobre él por el sol.

Inclinación (κ). Los ángulos de incidencia del sol o de las sombras proyectadas por éste sobre un plano inclinado dependen de la inclinación de dicho plano respecto a la horizontal del lugar. Comúnmente las paredes de las viviendas son verticales, así que la inclinación en tales casos será de 90 grados. Pero en el caso de los techos la inclinación es decisiva para ejercer un control solar efectivo sobre la vivienda, ya que por ejemplo los techos horizontales reciben toda la radiación solar disponible en el día; cuando están inclinados, se puede disminuir el tiempo de incidencia del sol sobre ellos, dependiendo de la inclinación misma y de su orientación. Para los techos de dos y de cuatro aguas, la reducción de la radiación puede ser significativa, como siempre dependiendo de la inclinación de los planos y de su orientación. En este trabajo se modelará esta situación y se valorará la reducción la radiación solar a lo largo de cada día, los 365 días del año, con índices en los que se integre toda la información en un solo valor, no sólo en un instante dado. De esa manera se podrán obtener soluciones óptimas de inclinación y orientación para cada caso. Rango:

$$0^\circ \leq \kappa \leq 90^\circ$$

Azimut del Colector (ψ). Es el azimut obtenido al proyectar la normal al plano de la superficie del colector sobre el plano horizontal. A este ángulo también se le denomina orientación del colector. En el caso de que el colector sea horizontal, como algunos techos, no se considera ningún azimut. La diferencia entre los azimuts solar y del muro se designa por: $\gamma = \phi - \psi$.

Ángulo de Incidencia Solar sobre un Colector (θ). Es el ángulo que forman los rayos solares con la normal del colector. Cuando el colector es horizontal, coincide con el ángulo cenital θ_z . En Fernández Zayas (1987) se encuentra la siguiente expresión para el cálculo de este ángulo:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \text{sen}(\delta) \text{sen}(\text{lat}) \cos(\kappa) - \text{sen}(\delta) \cos(\text{lat}) \text{sen}(\kappa) \cos(\psi) + \\ & \cos(\delta) \cos(\text{lat}) \cos(\kappa) \cos(\omega) + \\ & \cos(\delta) \text{sen}(\text{lat}) \text{sen}(\kappa) \cos(\psi) \cos(\omega) + \\ & \cos(\delta) \text{sen}(\kappa) \text{sen}(\psi) \text{sen}(\omega) \end{aligned} \quad (1.3)$$

En el caso de que $\kappa = 0^\circ$, $\theta = \theta_z$, entonces:

$$\cos (\theta_z) = \text{sen} (\text{lat}) \text{sen} (\delta) + \cos (\delta) \cos (\text{lat}) \cos (\omega) \quad (1.4)$$

Proyecciones sobre una Fachada

Dada una fachada con orientación ψ , partir de los ángulos solares (azimut ϕ y declinación δ) correspondientes a determinada latitud **lat**, día del año **n** y hora solar, se deducen los ángulos de perfil ξ (medido sobre el plano vertical perpendicular a la fachada, respecto a la normal a la fachada) y frontal λ (medido sobre el plano mismo de la fachada respecto a la vertical) de los rayos solares sobre el muro, proyectados por una línea de longitud **T** situada sobre el plano vertical perpendicular a la fachada formando un ángulo α con la misma (Fig. 1.1):

Ángulo Frontal (λ):

$$\tan(\lambda) = T \text{sen} (\alpha) / (\tan (\eta) (T \text{sen} (\alpha) \tan (\xi) + T \cos (\alpha)) \quad (1.5)$$

Ángulo de Perfil (ξ):

$$\tan (\xi) = \tan (\beta) / \cos (\phi - \psi) \quad (1.6)$$

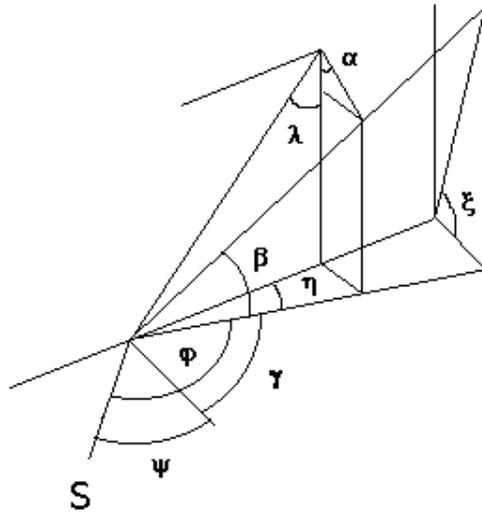


Figura 1.1. Relación de ángulos para la deducción trigonométrica del perfil y el frontal proyectados sobre una pared por una línea de longitud T en el plano vertical perpendicular a la fachada formando un ángulo α con ella. S representa la dirección del Sur y η el complemento de γ . El resto de ángulos en la figura se definen en el texto.

Medición de Ángulos

En el tema del control solar, es posible medir con brújula la elevación de los astros y la orientación de los muros, siendo esto último crucial para la correcta aplicación de los modelos aplicados en este trabajo.

La medición de la elevación del sol o de la estrella polar en el hemisferio norte son por definición, la altitud o elevación solar y la latitud del lugar respectivamente.

Aunque el azimut solar está bien determinado en la teoría de los ángulos solares, como ya se explicó arriba, y la latitud por lo general es conocida, abajo se describe, de cualquier manera, el uso de la brújula profesional de geólogo Brunton para la medición de rumbos en general, elevaciones y para determinar el azimut de las fachadas o muros exteriores de las viviendas, que es en realidad el tema que nos ocupa.

Esta brújula posee dos niveles, uno graduado con el que se mide la inclinación de las estructuras geológicas (clinómetro) y el usual que permite colocarla horizontalmente, que es en principio como se debe usar en los casos que se describen a continuación:

Rumbo (azrumbo). Se toma la brújula con el espejo hacia el cuerpo y la mirilla apuntando hacia el rumbo. Se toma la lectura del ángulo **B** con la punta roja de la aguja. Entonces el rumbo tiene un ángulo **azrumbo**:

$$\text{azrumbo} = - B$$

Azimut Solar (ϕ). Inclinando apropiadamente la mirilla, se proyecta la sombra del orificio de la misma en el centro de la brújula. Excepto en los equinoccios al mediodía solar,

esta operación siempre es aplicable. La lectura **B** de la aguja roja se complementa a 360° grados para obtener el azimut solar ϕ :

$$\phi = 360 - B$$

Azimut de un Muro (ψ). Se recarga la brújula en el muro, siempre horizontal, con el espejo a la izquierda del muro, visto de frente. El complemento del inverso aditivo de la lectura **B** es el azimut del muro ψ :

$$\psi = - B - 90$$

Declinación Magnética. Siempre que se midan ángulos con brújula, se requiere corregir la misma con la medida de la declinación magnética del lugar. Para efectos de este trabajo, al momento de hacer las comprobaciones experimentales, se usó la corrección de $10^{\circ}6'$ que aparece en la página de Internet de la National Oceanic and Atmospheric Administration de los Estados Unidos: www.ngdc.noaa.gov . También se corroboró con las cartas correspondientes (Figs. 1.2 y 1.3).

US/UK World Magnetic Chart -- Epoch 2000 Declination - Main Field (D)

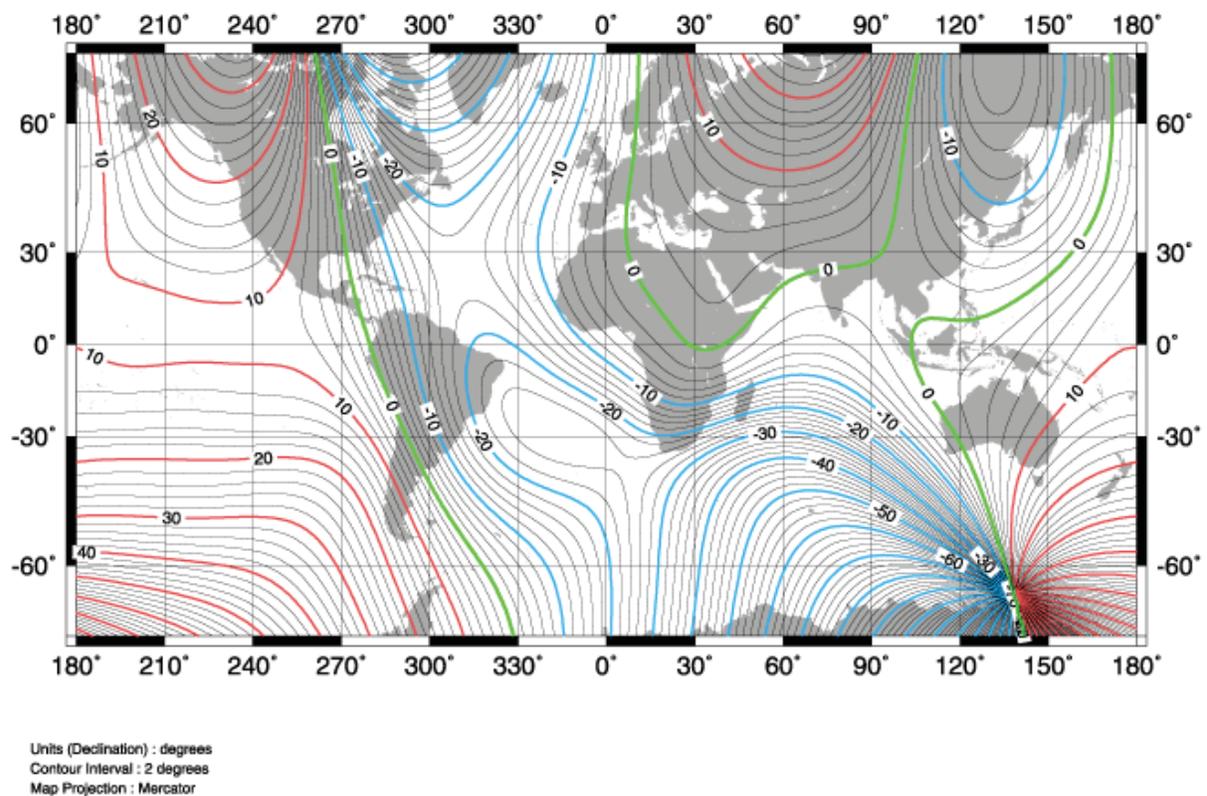
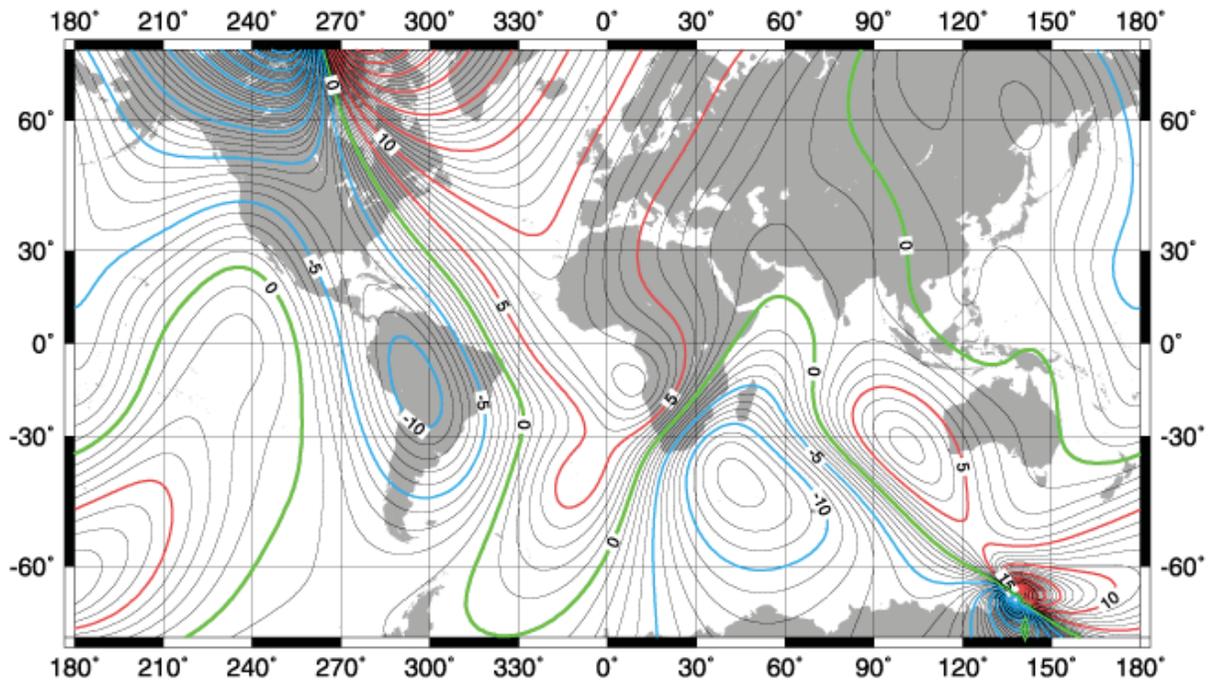


Figura 1.2. Isolíneas de la declinación magnética terrestre correspondientes al año 2000.

US/UK World Magnetic Chart -- Epoch 2000 Declination - Annual Change (D)



Units: minutes/yr
Contour Interval : 1 minute/yr
Map Projection : Mercator

Figura 1.3. Isolíneas del cambio anual de la declinación magnética, a partir del año 2000.

§ 1.2. Radiación Solar

Radiación Total, Directa y Difusa

La cantidad de radiación solar que incide sobre la superficie terrestre varía a causa de los cambios en las condiciones atmosféricas y de la posición del sol (ángulos de elevación y azimut), tanto durante el día como a lo largo del año.

La radiación solar total instantánea $G_T(t)$ sobre una superficie horizontal se descompone en radiación directa $G_B(t)$ y radiación difusa $G_D(t)$:

$$G_T(t) = G_B(t) + G_D(t) \quad (1.7)$$

donde:

$$G_T(t) = G_{TM} \cos\left(\frac{t-12}{SDL}\right)^{1.5} \quad (1.8)$$

$$G_B(t) = G_{BM} \cos\left(\frac{t-12}{SDL}\right)^{1.2} \quad (1.9)$$

donde a su vez:

G_{TM} = Radiación máxima total (W/m^2)

G_{BM} = Radiación directa máxima (W/m^2)

SDL = Longitud del día solar (h)

Entonces $G_D(t)$ se calcula a partir de la expresión (1.7) por diferencia:

$$G_D(t) = G_T(t) - G_B(t) \quad (1.10)$$

Para el cálculo de la radiación solar total sobre un plano $G_{ST}(t)$ inclinado es necesario considerar el factor de proyección sobre la normal a la superficie del plano como sigue:

$$G_{ST}(t) = G_{SB}(t) + G_D(t) \quad (1.11)$$

donde la radiación solar directa incidente sobre el plano $G_{SB}(t)$ depende de la hora

solar t del día, el factor de proyección y de la incidencia del sol, según se representa en la expresión siguiente:

$$G_{SB}(t) = I(t) R_B(t) G_{BM} \cos\left(\pi \frac{12-t}{SDL}\right)^{1.5} \quad (1.12)$$

donde:

$I(t)$ = Factor de incidencia solar, igual a uno cuando el sol incide sobre la superficie y cero en otro caso.

$R_B(t)$ = Factor de proyección sobre el plano inclinado:

$$R_B(t) = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \quad (1.13)$$

El grosor de la capa de la atmósfera depende de la latitud, del día del año y de la hora del día. El valor es máximo cuando el sol tiene menos elevación, ya que al estar más cerca del horizonte, la radiación debe atravesar una capa más gruesa de atmósfera que cuando está cercano al cenit. La función coseno en las expresiones (1.8, 1.9 y 1.12) representa la atenuación de la radiación por dispersión al cruzar la atmósfera. En el caso de un plano horizontal dicha atenuación ocurre desde el máximo que se alcanza al mediodía hacia el amanecer o el atardecer (expresiones 1.8 y 1.9). En un plano inclinado la atenuación es desde el máximo, no necesariamente al mediodía, hacia el amanecer, el atardecer o hacia las horas en las que el sol deja de incidir sobre el plano (expresión 1.12).

Los valores medidos sobre determinada localidad están disponibles en diversas fuentes y medios. Para el caso de México y para la ciudad de La Paz en particular, existen mapas de isóneas de los valores promedio de G_{TM} y G_{BM} para cada mes del año para la República Mexicana realizadas por investigadores del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Fernández Zayas, 1987). Los valores puntuales correspondientes a La Paz que aparecen dichos mapas, se muestran en la figura 1.4.

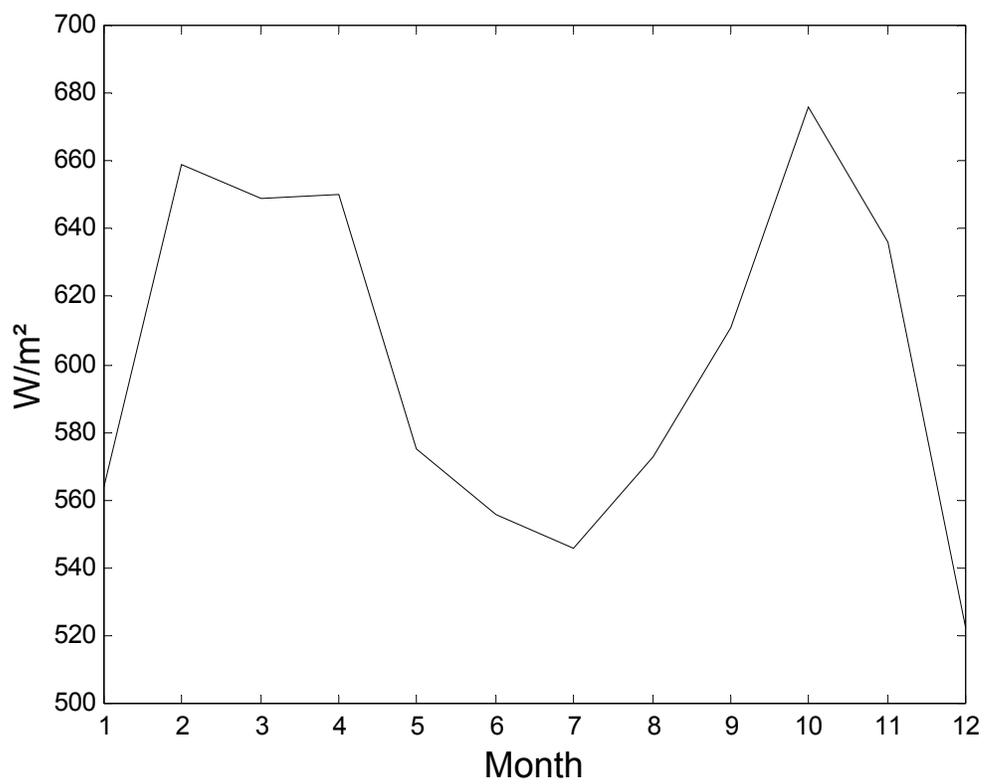


Figura 1.4. Radiación máxima directa promedio mensual en La Paz, México (datos en Fernández Zayas, 1987).

Modelo de Escalonamiento Sinusoidal

Cuando se requieren valores de radiación diarios resulta extraño que en el paso de un mes a otro haya un cambio abrupto y discontinuo en los valores de G_{TM} y G_{BM} . Para eso se usan los valores observados para construir una función que dé una variación gradual entre el valor correspondiente a un mes con el que le sigue, a partir de un modelo potencial de un senoide que permita hacer que tal graduación diaria proporcione valores continuos de G_{TM} y G_{BM} que se asemejen al valor de referencia más cercano.

A continuación se ejemplifica el desarrollo del modelo para el caso de la radiación directa. Por lo dicho, el modelo permite un escalonamiento sinusoidal suave (derivable) entre un valor de G_{BM} correspondiente a determinado mes y el que le sigue. La función se define como sigue:

Dado el día n , al cual le corresponde el mes m , con duración dm en días, sean r_m el dato de radiación directa máxima promedio correspondiente al mes m , r_{m+1} el correspondiente al mes $m+1$ y $\Delta = r_{m+1} - r_m$. Entonces si i_m es el número de día de inicio del mes m :

$$G_{BM}(n) = r_m + \Delta * ((\text{sen}(x) + 1) / 2)^b \quad (1.14)$$

Donde:

$$b = 2.1 - 2 * (n - i_m) / dm1, \quad x = (n - i_m) * \pi / dm1 - \pi / 2 \quad \text{y} \quad dm1 = dm - 1.$$

Explicación del Modelo de Escalonamiento Sinusoidal

La expresión de x representa el cambio de escala para lograr que esta variable recorra el intervalo de $-\pi / 2$ a $\pi / 2$, en la medida que el día recorre el mes, de modo que la expresión entre paréntesis que contiene el término sinusoidal recorra el intervalo de 0 a 1. El exponente b simultáneamente varía de 2.1 a 0.1 para conseguir que el término con la función sinusoidal sea muy cercano a cero durante los primeros días y muy similar a uno hacia fin de mes. De esa manera la función se asemeja al valor de la radiación directa máxima promedio del mes al principio y muy cercano al valor de radiación del mes siguiente durante los últimos días. En otras palabras, con el exponente b se logra que el modelo se allane en las cercanías de los valores de referencia. En la figura 1.5 se ejemplifica el resultado con los mismos datos de La Paz.

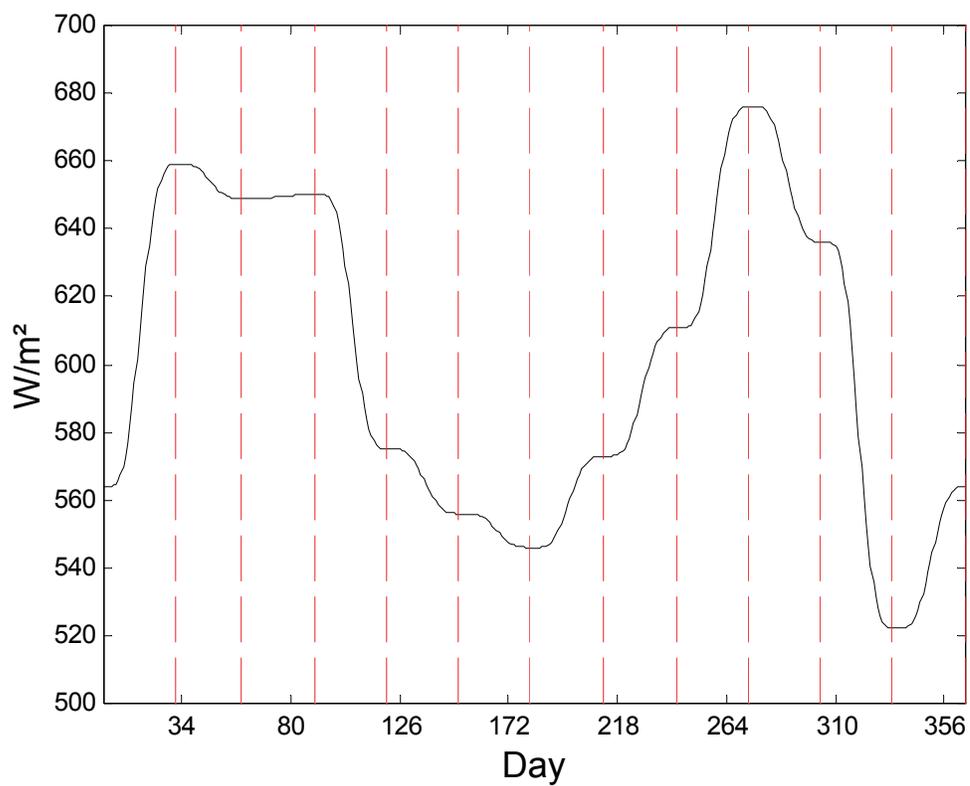


Figura 1.5. Radiación directa máxima diaria disponible en La Paz, estimada a partir de los datos de la Fig. 1.4 y el modelo de escalonamiento sinusoidal.

Horas Críticas y Factor de Incidencia Solar sobre un Plano Inclinado

Horas críticas. Se denominarán en este trabajo a las horas solares en las que los rayos solares empiezan o terminan de incidir sobre un colector inclinado, es decir, son aquellas en las que ocurre el inicio o el fin del soleamiento sobre el plano. Por ejemplo, en el caso trivial de una fachada hacia el Este (plano con azimut e inclinación de 90°), las horas críticas del soleamiento son justamente el amanecer (inicio) y el mediodía solar (fin).

Más generalmente, mediante los ángulos solares se puede verificar si en un instante dado del día solar, el sol incide sobre el colector o no. Cuando el sol se encuentra frente al plano vertical con la misma orientación del colector, el sol incide sobre ambos. Cuando el sol se encuentra del otro lado de dicho plano vertical, la incidencia sobre el colector depende de que la elevación solar sea mayor que el ángulo del colector.

El factor de incidencia solar incluido en la expresión 1.12, es por lo tanto igual a uno entre las horas críticas, e igual a cero más allá de ellas. Para evitar errores, imprecisiones y consideraciones subjetivas se ofrecen a continuación resultados prácticos para calcular las horas críticas de un plano inclinado y el factor de incidencia solar en cualquier instante.

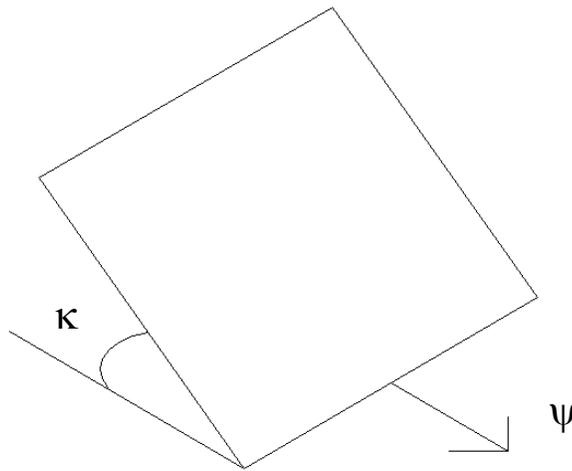


Figura 1.6. Colector plano inclinado de azimut ψ e inclinación κ .

Resultado 1.1

Dado un colector plano de azimut ψ e inclinación κ , el sol no incide sobre el colector en un instante t del día solar si y sólo si el perfil solar $\xi(t)$ es negativo y mayor que el inverso aditivo de la inclinación, esto es:

$$I(t) = 0 \Leftrightarrow -\kappa < \xi(t) \leq 0 \quad (1.15)$$

que equivale a:

$$I(t) = 1 \Leftrightarrow \xi(t) > 0 \text{ ó } \xi(t) < -\kappa \quad (1.16)$$

En efecto, para un colector plano arbitrario con azimut ψ e inclinación κ (Fig. 1.6), en la vista lateral se tienen tres posibles situaciones del ángulo de perfil $\xi(t)$ para cada instante t de un día solar cualquiera (Fig. 1.7):

$$(1) \xi(t) > 0$$

$$(2) \xi(t) \leq -\kappa \leq 0$$

$$(3) -\kappa < \xi(t) \leq 0$$

Sea $\phi(t)$ el azimut solar al tiempo t . En el caso (1), de la expresión (1.12) se deduce que $\gamma(t) = \phi(t) - \psi$ satisface que $\cos(\gamma(t)) > 0$, luego: $-90^\circ < \gamma(t) < 90^\circ$, lo cual significa que el sol está incidiendo sobre el plano vertical con el mismo azimut ψ del colector, luego también incide sobre el colector (Fig. 1.7a).

Cuando $\xi(t) \leq 0$ se tienen a su vez dos posibilidades, que sea menor o igual a $-\kappa$ y entonces los rayos solares inciden sobre el colector (caso 2, Fig. 1.7b), o bien mayor que $-\kappa$, que en tal caso no inciden (caso 3, Fig. 1.7c). En efecto, sea $\beta(t)$ la elevación del sol

Si $-\kappa < \xi(t)$, de la expresión 1.12 se obtiene que $-1 < \cos(\gamma(t)) \leq 0$, luego:

$-1 / \cos \gamma(t) \geq 1$, o bien, $1 / \cos \gamma(t) \leq -1$. Multiplicando esta desigualdad por $\tan \beta(t) > 0$ se obtiene: $\tan \beta(t) / \cos \gamma(t) \leq -\tan \beta(t)$

Bajo la suposición de que $-\kappa < \xi(t)$, de la expresión 1.12 y de la desigualdad anterior se sigue que:

$-\tan \kappa < \tan \xi(t) \leq -\tan \beta(t)$, que equivale a $\tan \kappa \geq \tan \beta(t)$, y de ahí $\kappa \geq \beta(t)$, por lo que en tal caso el sol no incide en sobre el colector.

Si fuera $\xi(t) \leq -\kappa$, análogamente se muestra que $\beta(t) > \kappa$ y entonces el sol incide sobre el colector.

Resultado 1.2

Los rayos del sol inciden sobre un colector vertical si y sólo si el perfil es positivo:

$$I (t) = 1 \Leftrightarrow \xi (t) > 0 \quad (1.17)$$

En efecto, este resultado es consecuencia directa del anterior, pues siendo $\kappa = 90^\circ$, la segunda condición de la expresión 1.16, nunca ocurre. Este resultado es de particular utilidad para verificar la incidencia solar sobre las fachadas, bardas y cualesquiera muros verticales.

Los resultados anteriores se traducen respectivamente en términos de las horas críticas como sigue:

Resultado 1.3

Las horas críticas para un colector plano de inclinación $\kappa < 90^\circ$ son los instantes t_c del día solar para los cuales $\xi (t_c) = - \kappa$

Resultado 1.4

Las horas críticas para un colector plano vertical son los instantes t_c del día solar para los cuales $\xi (t_c) = 0$

El resultado 1.4 no se puede ver como caso particular del anterior, debido a que para una inclinación de 90° se genera una indeterminación en la función tangente de la expresión 1.12.

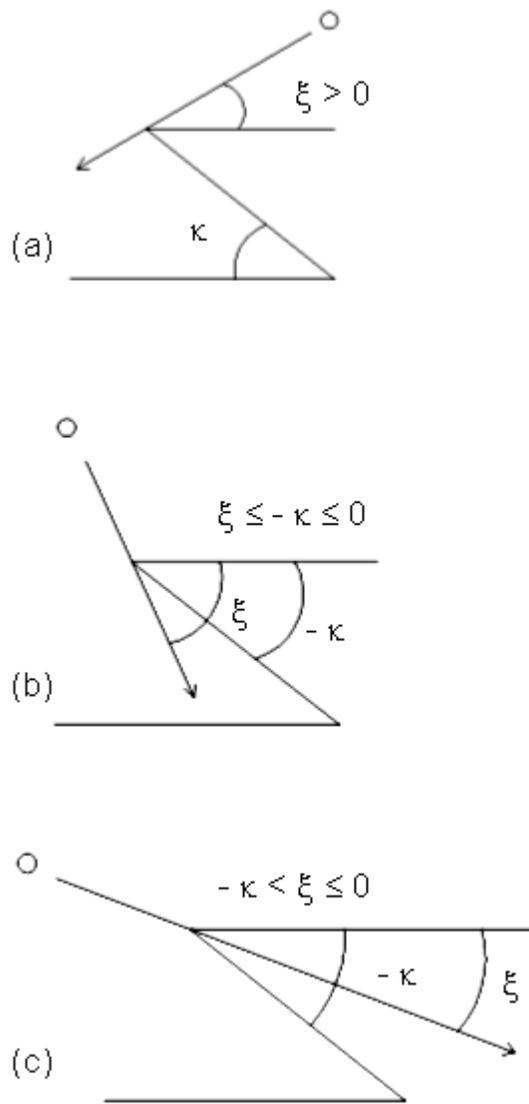


Figura 1.7. Vista lateral con las tres posibilidades del perfil solar ξ respecto a la inclinación κ del colector. En el caso (c) no hay incidencia de los rayos solares sobre el colector.

Capítulo 2

INCIDENCIA SOLAR SOBRE UNA VIVIENDA

§ 2.1. Incidencia Solar sobre un Techo Horizontal

El número de horas que incide el sol sobre un techo horizontal depende solamente de la duración del día solar, bajo la suposición de que no existan bloqueos de los rayos solares como, por ejemplo, edificios contiguos o montañas cercanas, que obviamente modifican las horas de incidencia sobre el techo, ya sea al amanecer o al atardecer. Asimismo, tanto la incidencia solar como la radiación solar sobre un techo horizontal no dependen de la orientación de la vivienda. Para diferentes latitudes y días del año se tendrán diferentes horas de incidencia solar sobre un techo horizontal, tal como se ejemplifica en la figura 2.1. La integración de las curvas proporciona el total de horas de incidencia solar por estación y para todo el año (Tabla 2.1). Este último es de 4380 horas sin importar la latitud, dato que equivale a multiplicar el promedio de la longitud del día solar, 12 horas, por 365 días.

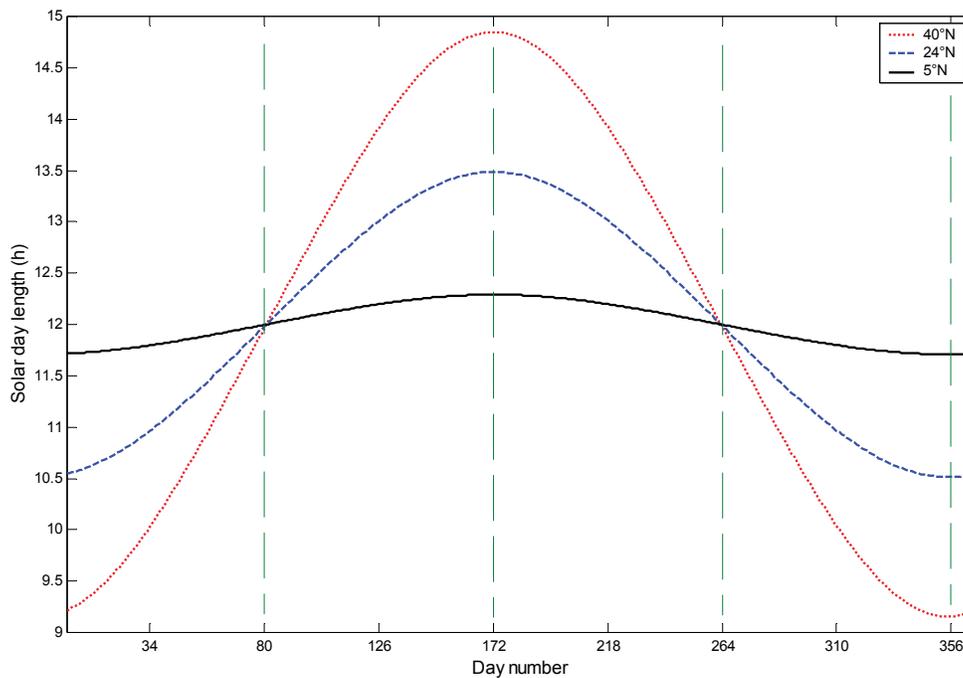


Figura 2.1. Duración del día solar para tres latitudes diferentes: 40°N, 24°N y 5°N. Las líneas verticales indican los solsticios y los equinoccios.

Tabla 2.1. Distribución de las 4380 horas de incidencia solar al año sobre un techo horizontal, por estación del año y latitud.				
	Latitud			
Estación	40°N	24°N	19.5°N	5°N
Invierno	921	997	1014	1064
Primavera	1266	1189	1171	1121
Verano	1264	1188	1171	1120
Otoño	929	1006	1024	1075

La simetría que se observa en la figura 2.1 respecto al solsticio de verano, tanto entre la primavera y el verano, como entre el otoño y el invierno, aparece también en la tabla 2.1, por lo que tales pares de estaciones deben recibir tratamientos semejantes en cuanto a estrategias de control solar, es decir, son igual de importantes en cuanto a incidencia solar o soleamiento la primavera y el verano, así como el otoño y el invierno. Lo que cambia es la tendencia del soleamiento, ascendente o descendente según sea al caso, pero que en conjunto el comportamiento solar de tales pares de estaciones es el mismo.

En cuanto a los cambios latitudinales, las diferencias entre las altas y las bajas latitudes es evidente, y llegan a representar, por ejemplo en primavera y verano cambios de casi 60% del total de incidencia anual a los 40°N, contra el 50% que se recibe en el Ecuador, originado por diferencias diarias en la longitud del día solar que llegan a ser de casi tres horas (Fig. 2.1, día 172). Comportamientos complementarios ocurren durante el otoño y el invierno de tales latitudes que disminuyen el soleamiento de 50% en el Ecuador, a poco más de 40% en la latitud 40°N.

§ 2.2. Incidencia Solar sobre una Fachada

Verificación de la incidencia solar sobre un muro

Para la elaboración de índices que permitan evaluar integralmente una construcción en función de los dispositivos de sombreado que contenga, se deberán hacer cálculos de la incidencia solar, radiación directa y aporte energético del sol sobre el techo y cada fachada, que en principio consideren todas las horas del día y todos los días del año. Dada una fachada de azimut ψ , para cada instante de un día solar arbitrario se verifica si el sol está incidiendo sobre ella, mediante el uso del ángulo de perfil ξ establecido en el resultado 1.2.

Resolución de las Verificaciones

La verificación de la incidencia del sol sobre una superficie se realiza cada instante de un día solar, por lo que el tiempo de ejecución de los algoritmos de cómputo dependerá de la resolución empleada, es decir, de la amplitud de los intervalos de tiempo en los habrá de hacerse cada verificación.

Por ejemplo, si el día solar se divide en cien intervalos de tiempo, a una latitud de 24°N como la de La Paz, la verificación se haría alrededor de cada 7 minutos, pues durante solsticio de invierno se haría cada 6.31 minutos y durante el solsticio de verano cada 8.09 minutos. En cambio, si el día solar se divide en mil intervalos, la verificación se haría alrededor de cada 40 segundos (de 37.86 segundos el 21 de diciembre hasta 49 segundos el 21 de junio).

La incidencia solar sobre una fachada se calcula en número de horas diarias, la cual se podrá integrar a lo largo de todo el año o bien restringirse a una época determinada que se quiera usar como referencia para el cálculo.

Cuando el día solar se divide en mil intervalos de tiempo, el cálculo de la duración diaria de la incidencia solar sobre una fachada se compara con el mismo cálculo, realizado a una resolución menor: de 100 a 900 subdivisiones del día solar. Tomando como referencia una pared de azimut cero (orientada hacia el Sur), todos los cálculos tuvieron diferencias significativas con el cálculo realizado con mil divisiones ($P < 0.05$), a excepción del caso de 900 subdivisiones (Tabla 2.2).

En otras palabras, desde el punto de vista estadístico se recomienda usar por lo menos 900 subdivisiones del día solar para hacer estas estimaciones.

Tabla 2.2. Diferencias en minutos entre varios cálculos iterativos del tiempo total de incidencia solar diaria sobre un muro de azimut sur, a lo largo de todo el año. Cada renglón representa la diferencia entre el cálculo realizado con mil iteraciones con el indicado en la columna del número de divisiones (ndiv).

ndiv	Mínimo	Máximo	Media	S	Z
100	-21.79	7.25	-2.57	7.21	-6.81
200	-9.71	3.24	-1.18	3.43	-6.59
300	-6.65	2.96	-0.69	1.97	-6.69
400	-4.26	2.02	-0.45	1.35	-6.46
500	-2.43	0.81	-0.26	0.91	-5.49
600	-2.66	1.62	-0.21	0.77	-5.26
700	-2.20	1.73	-0.14	0.64	-4.22
800	-1.76	1.39	-0.08	0.51	-2.98
900	-1.65	1.49	-0.04	0.49	-1.51*

ndiv= Número de intervalos de tiempo usados para verificar la incidencia del sol sobre una fachada de azimut 0° (orientada hacia el Sur a una latitud de 24°N).

S= Desviación estándar.

Z=Valor estimado del estadístico de prueba con distribución normal unitaria. El valor crítico (tabulado) al 95% de confianza es: ± 1.64 .

(*)= Diferencia no significativa

Duración de la Incidencia Solar Anual sobre un Muro

Para un día y una latitud determinados, a partir del amanecer hasta el atardecer, se verifica a intervalos de un milésimo de día solar la incidencia del sol sobre un muro de azimut dado. La curva del número total de horas de incidencia de cada día se integra numéricamente con la misma resolución de tiempo, para generar un valor de incidencia total para dicho día. De esa manera se calcula la suma para los 365 días del año de la incidencia solar sobre el muro.

A continuación se presentan, a manera de ejemplo, las tablas y las gráficas correspondientes a las latitudes 40°N (Nueva York), 24°N (La Paz, México), 19.5°N (Ciudad de México) y 5°N (Bogotá), con las cuatro orientaciones de las fachadas de una vivienda orientada exactamente hacia los puntos cardinales (Figs. 2.3-2.6, Tablas 2.2-2.5). En las tablas se redondean las cantidades a enteros, por lo que las sumas podrían en algunos casos no coincidir con los totales, en busca de mayor claridad y facilidad de interpretación.

En las tablas se muestra la incidencia solar desglosada por: (1) estación del año y por azimut del muro (primer bloque en cantidad, segundo en porcentaje); (2) azimut del muro (tercer bloque, en porcentaje respecto al total de cada estación); (3) estación del año (cuarto bloque, en porcentaje respecto al total de cada azimut).

En las figuras se muestra la variabilidad diaria de la incidencia solar sobre cada muro, a lo largo de todo el año, donde también se puede observar el comportamiento estacional, por medio de las líneas rojas discontinuas verticales (el invierno representado al principio y al final del año).

Todas las tablas y gráficas en conjunto permiten analizar los cambios latitudinales. Por ejemplo, en las cuatro tablas el primer renglón del tercer bloque es coincidente, es decir, en invierno el 50% de la radiación incide sobre el muro sur y el resto se reparte por igual entre los muros este y oeste, que es una característica general en el hemisferio norte. En ese mismo bloque, en todas las tablas también coinciden la segunda y la cuarta columnas, lo cual indica que, los muros este y oeste reciben cada uno la cuarta parte de la radiación total de cada estación. El 50% restante se reparte entre los muros sur y norte, disminuyendo en el muro sur y aumentando en el muro norte en la medida que disminuye la latitud (la coincidencia entre estos muros en el caso de la latitud 24°N, es por efecto de redondeo, ya que el valor exacto ocurre en el Trópico de Cáncer, que se encuentra a 23.45°N).

La comparación de las gráficas de la duración de la radiación solar diaria muestra la coincidencia entre los muros este (90°) y oeste (270°), así como la variabilidad inversa o complementaria entre los muros sur (0°) y norte (180°). La comparación latitudinal indica, por ejemplo, que entre el Ecuador y el Trópico de Cáncer, dicha complementariedad es de 0 a 12 horas de duración respectivamente, alrededor del solsticio de verano, más larga mientras más cerca se encuentre el lugar del Ecuador.

El resultado más sorprendente del análisis gráfico es la coincidencia en el número total de horas de radiación incidente entre la primavera y el verano. En todas las gráficas, las curvas son simétricas respecto al solsticio de verano. Este resultado se corrobora en todas las tablas, contrariamente a lo que se podría suponer cuando se hacen estos análisis puntuales, en los que tales coincidencias ocurren por ejemplo entre los equinoccios. Ésta tal vez sea la contribución más novedosa e ilustrativa que se puede brindar con esta información a los constructores, propietarios y diseñadores de dispositivos de sombreado.

La herramienta computacional desarrollada permite hacer la gráfica y la tabla correspondiente, para una vivienda de azimut arbitrario y paredes ortogonales. Por ejemplo si la vivienda tiene azimut 35° (respecto al Sur, levógiro es positivo), una corrida del programa proporciona la gráfica y la tabla para muros de 35°, 125°, 215°, y 305° de azimut. Si la vivienda tuviese más muros exteriores que los representados en los cuatro casos anteriores, se podrán hacer tantas corridas del programa como hagan falta.

Tabla 2.3. Incidencia Solar Total Anual (horas) por estaciones del año y orientación del muro. Latitud 40.0°N					
	Azimut del Muro				
Estación	Sur	Este	Norte	Oeste	Subtotal
Invierno	920	469	9	460	926
Primavera	883	643	393	634	1276
Verano	885	643	389	632	1274
Otoño	927	472	10	465	937
SubTotal	3616	2227	801	2190	
Incidencia en Porcentaje respecto al gran total					Est
Invierno	10	5	0	5	20
Primavera	10	7	4	7	28
Verano	10	7	4	7	28
Otoño	10	5	0	5	20
Muro	40	24	8	24	
Incidencia en Porcentaje respecto al total por estación					
Invierno	50	25	0	25	
Primavera	35	25	15	25	
Verano	35	25	15	25	
Otoño	49	25	1	25	
Incidencia en Porcentaje respecto al total de cada muro					
Invierno	25	21	1	21	
Primavera	24	29	49	29	
Verano	24	29	49	29	
Otoño	26	21	1	21	

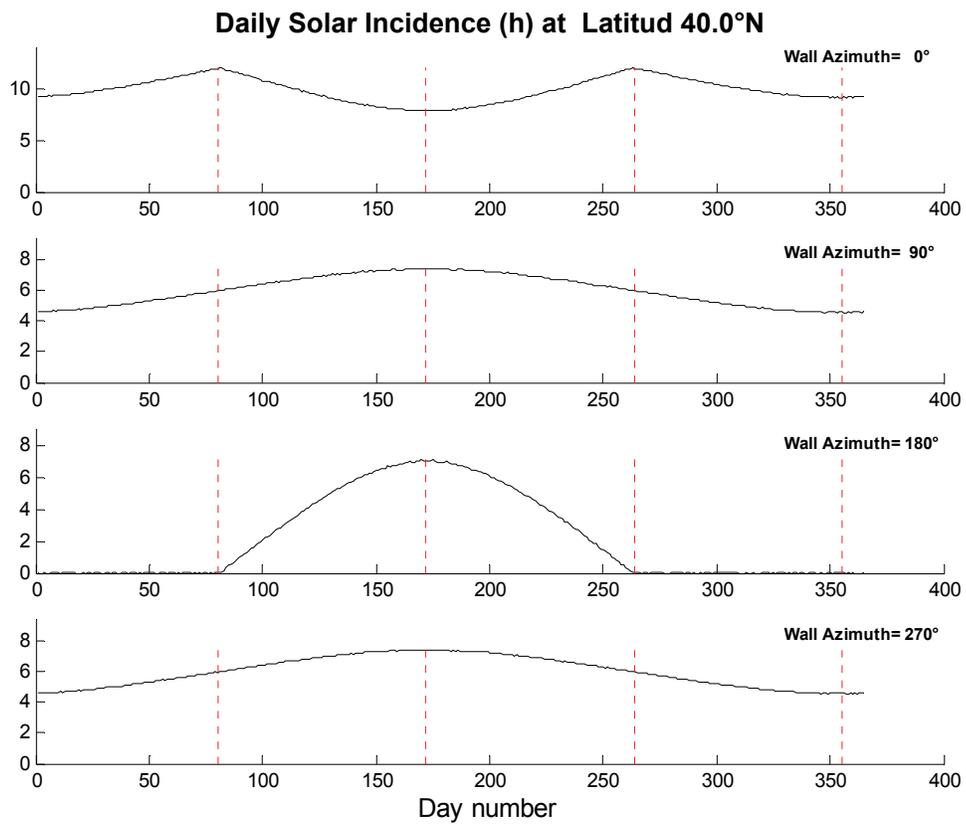


Figura 2.2. Duración diaria de la incidencia solar sobre cuatro muros exteriores o fachadas orientados hacia los puntos cardinales, a una latitud de 40°N.

Tabla 2.4. Incidencia Solar Total Anual (horas) por estaciones del año y orientación del muro. Latitud 24.0°N

	Azimet del Muro				
Estación	Sur	Este	Norte	Oeste	Subtotal
Invierno	996	503	5	498	1001
Primavera	602	600	592	594	1194
Verano	607	600	586	593	1193
Otoño	1005	507	6	504	1011
Subtotal	3210	2210	1190	2190	
Incidencia en Porcentaje respecto al gran total					Est
Invierno	11	6	0	6	23
Primavera	7	7	7	7	28
Verano	7	7	7	7	28
Otoño	11	6	0	6	23
Muro	36	26	14	26	
Incidencia en Porcentaje respecto al total por estación					
Invierno	50	25	0	25	
Primavera	25	25	25	25	
Verano	25	25	25	25	
Otoño	50	25	0	25	
Incidencia en Porcentaje respecto al total de cada muro					
Invierno	31	23	0	23	
Primavera	19	27	50	27	
Verano	19	27	49	27	
Otoño	31	23	0	23	

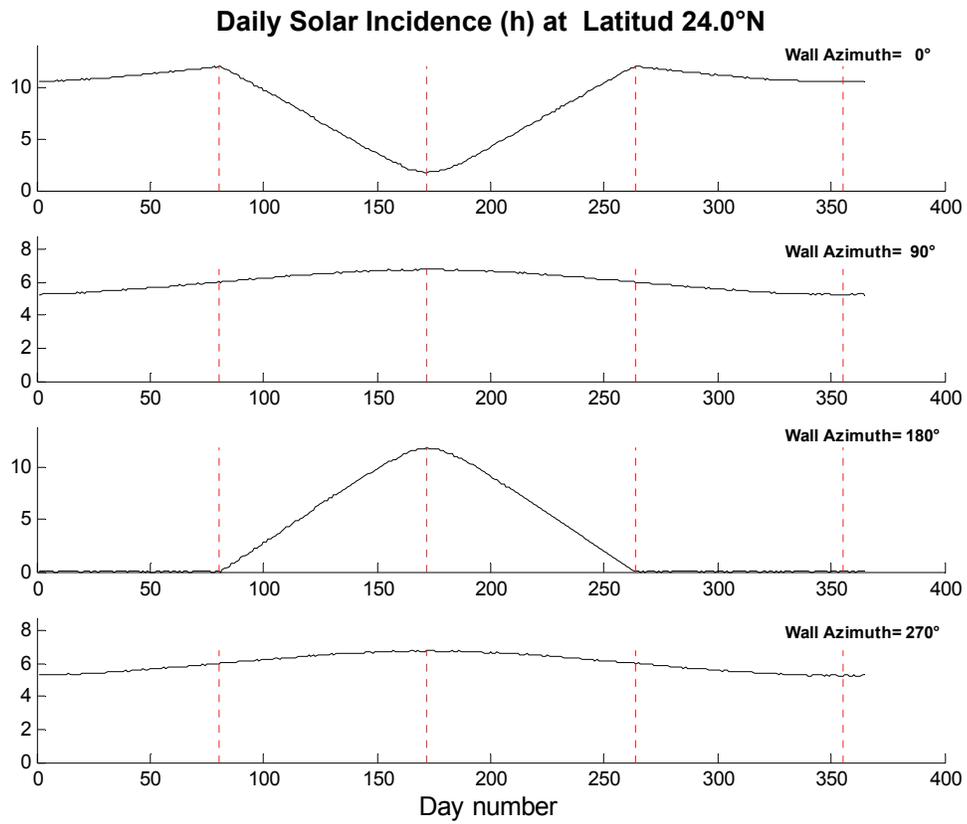


Figura 2.3. Duración diaria de la incidencia solar sobre cuatro muros exteriores o fachadas orientados hacia los puntos cardinales, a una latitud de 24°N.

Tabla 2.5. Incidencia Solar Total Anual (horas) por estaciones del año y orientación del muro. Latitud 19.5°N

	Azimet del Muro				
Estación	Sur	Este	Norte	Oeste	Subtotal
Invierno	1014	510	3	507	1017
Primavera	425	589	750	587	1175
Verano	431	589	743	586	1174
Otoño	1024	515	3	512	1027
Subtotal	2893	2204	1501	2192	
Incidencia en Porcentaje respecto al gran total					Est
Invierno	12	6	0	6	24
Primavera	5	7	9	7	28
Verano	5	7	8	7	27
Otoño	12	6	0	6	24
Muro	34	26	17	26	
Incidencia en Porcentaje respecto al total por estación					
Invierno	50	25	0	25	
Primavera	18	25	32	25	
Verano	18	25	32	25	
Otoño	50	25	0	25	
Incidencia en Porcentaje respecto al total de cada muro					
Invierno	35	23	0	23	
Primavera	15	27	50	27	
Verano	15	27	50	27	
Otoño	35	23	0	23	

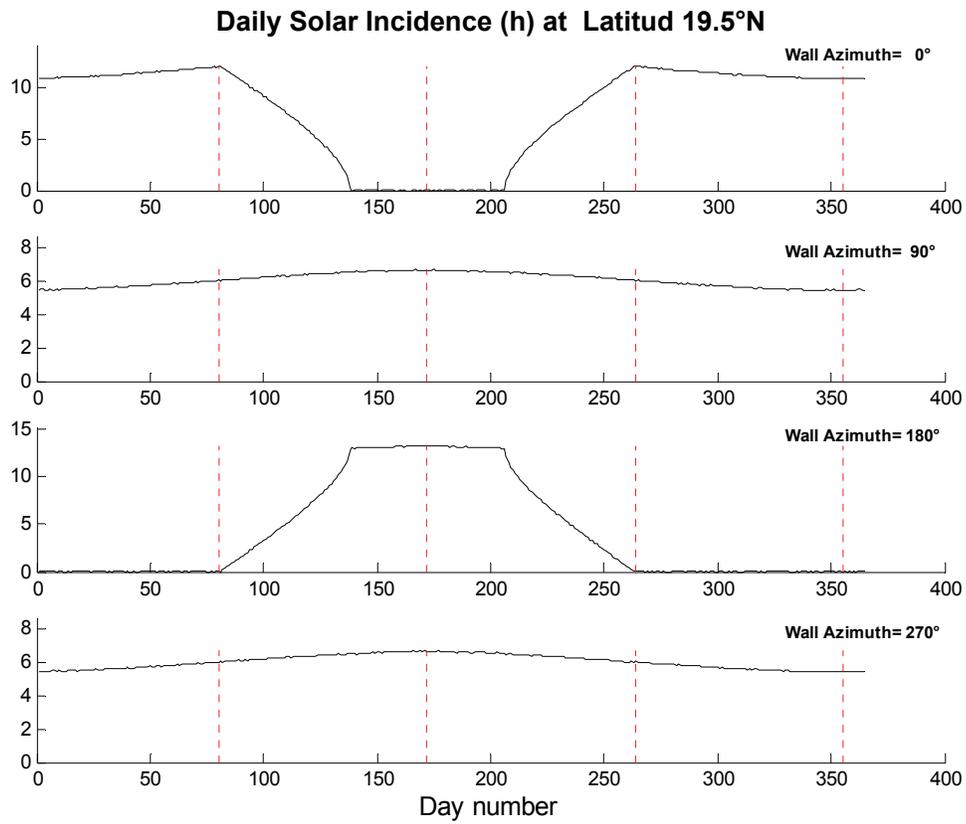


Figura 2.4. Duración diaria de la incidencia solar sobre cuatro muros exteriores o fachadas orientados hacia los puntos cardinales, a una latitud de 19.5°N.

Tabla 2.6. Incidencia Solar Total Anual (horas) por estaciones del año y orientación del muro. Latitud 5.0°N

	Azimut del Muro				
Estación	Sur	Este	Norte	Oeste	Subtotal
Invierno	1063	534	3	532	1066
Primavera	105	563	1019	562	1124
Verano	110	563	1014	562	1124
Otoño	1075	540	3	537	1078
Subtotal	2353	2201	2038	2193	
Incidencia en Porcentaje respecto al gran total					Est
Invierno	12	6	0	6	24
Primavera	1	6	12	6	25
Verano	1	6	12	6	25
Otoño	12	6	0	6	24
Muro	26	24	26	24	
Incidencia en Porcentaje respecto al total por estación					
Invierno	50	25	0	25	
Primavera	5	25	45	25	
Verano	5	25	45	25	
Otoño	50	25	0	25	
Incidencia en Porcentaje respecto al total de cada muro					
Invierno	45	24	0	24	
Primavera	4	26	50	26	
Verano	5	26	50	26	
Otoño	46	25	0	25	

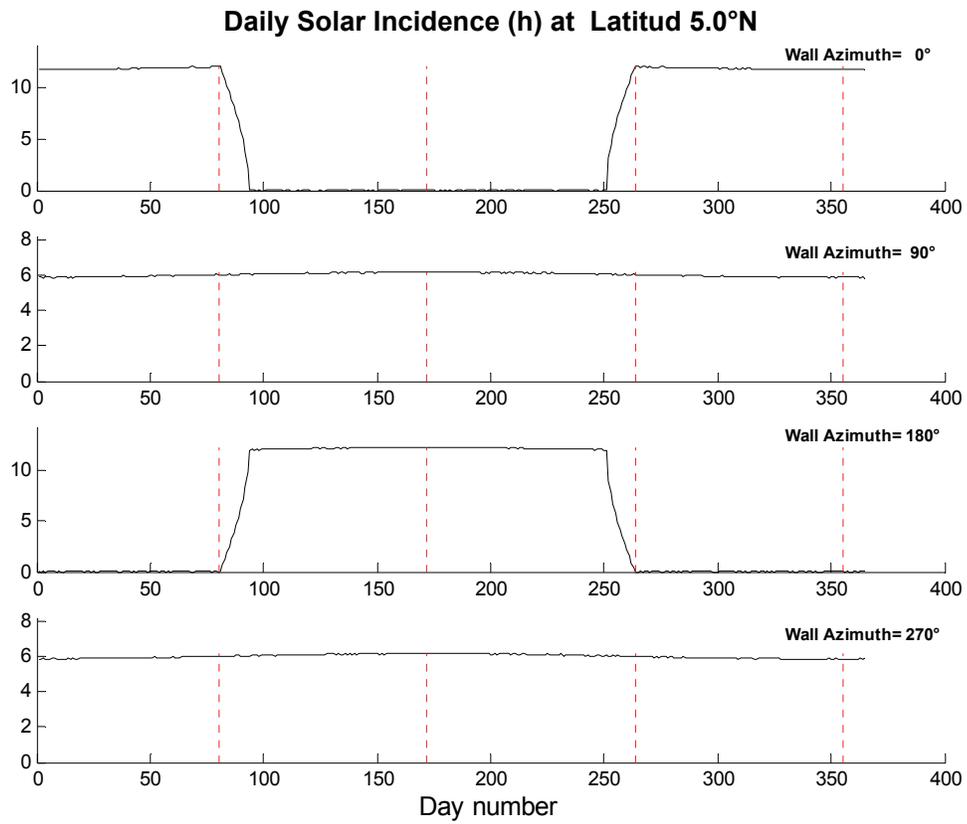


Figura 2.5. Duración diaria de la incidencia solar sobre cuatro muros exteriores o fachadas orientados hacia los puntos cardinales, a una latitud de 5°N.

En el Apéndice 2 se presentan los diagramas correspondientes a las bóvedas celestes a las latitudes 24°N , 23.45°N (Trópico de Cáncer) y 19.5°N durante los solsticios y equinoccios en cada caso, con el objeto de representar los cambios en la trayectoria aparente del sol cuando la vivienda se encuentra a una latitud arriba o abajo del trópico, y lo que pasa en el trópico mismo.

Las diferencias más notables en cuanto a un cambio en el comportamiento global se presentan al mediodía solar: como se sabe, en el solsticio de verano el sol pasa justo por el cenit en el trópico, y en las otras dos latitudes pasa por el meridiano local con una ligera desviación angular hacia el Norte (para el caso 19.5°N) o hacia el Sur (en la latitud 24°N), ocasionando diferencias en el soleamiento de las fachadas Norte y Sur.

En la última serie de diagramas también se presentan las bóvedas correspondientes a las latitudes 40°N , 5°N y en el Ecuador, donde los cambios en la trayectoria solar son notables. En las altas latitudes la duración del día solar es mucho mayor en verano y mucho menor en invierno que en las latitudes cercanas al Ecuador, donde el día solar dura siempre 12 h.

El Ecuador es la única latitud en la que la trayectoria solar pasa de estar completamente en el hemisferio norte de la bóveda (después del equinoccio de primavera hasta el de otoño, abarcando todo el verano) a encontrarse por completo en el sur (en la otra mitad del año), pasando exactamente por la línea del amanecer al atardecer durante los equinoccios.

En conjunto, todas las bóvedas anteriores explican el aplanamiento de las gráficas de la duración de la incidencia solar en cada muro en las latitudes inferiores al trópico en los muros orientados hacia el Sur y hacia el Norte (Figs. 2.4 y 2.5), así como las ondulaciones, en los casos correspondientes, arriba del trópico.

Capítulo 3
RADIACIÓN SOLAR SOBRE UNA VIVIENDA

§ 3.1. Radiación Solar sobre un Techo Horizontal

Los cálculos de la radiación solar incidente sobre un plano por medio de las expresiones 1.7-1.12 dependen de los valores de la radiación máxima (ya sea total o directa) que se usan en las expresiones 1.8, 1.9 y 1.12. Tales valores no siempre son disponibles y son diferentes para cada localidad. Para el caso de México es posible disponer de máximos promedio mensuales estimados entre las décadas de los setentas y los ochentas (Fernández Zayas, 1987). En algunos lugares del mundo es posible contar con estimaciones basadas en mediciones más frecuentes representativas de los últimos años, donde se llevan a cabo procesos de actualización continua. En todo caso, esta información es variable y tanto sus fluctuaciones como sus estimaciones dependen de diversos factores, principalmente de índole meteorológica, que están fuera del alcance de este trabajo. Con el objeto de estudiar la influencia de los parámetros geográficos, astronómicos y de construcción sobre la radiación solar incidente sobre una vivienda, se tomarán los valores de referencia de 800 W/m^2 y de 600 W/m^2 para las radiaciones máximas promedio mensuales, total y directa respectivamente.

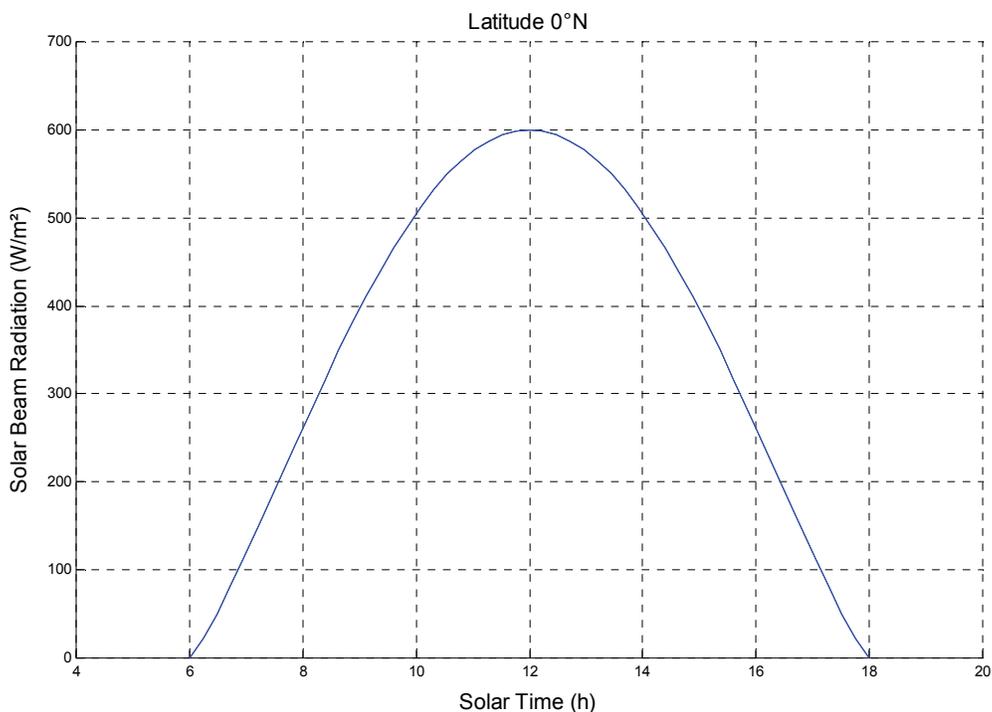


Figura 3.1. Radiación solar directa instantánea sobre un techo horizontal en el Ecuador, para cualquier día del año. La energía acumulada al día es de 15.6 MJ/m^2 .

Para el caso de un techo horizontal, no afecta la orientación o azimut de la construcción, sólo la latitud (duración del día solar y ángulos de incidencia), el día del año (duración del día solar y declinación) y la hora del día. Por las consideraciones anteriores, la radiación directa instantánea sobre un techo horizontal en el Ecuador es la misma para todos los días del año (Fig. 3.1).

Al aumentar la latitud, los cambios en la radiación debidos a la duración del día solar son más evidentes (Fig. 3.2). En cualquier caso, durante los equinoccios las ecuaciones producen la misma curva que en el Ecuador, con una energía solar directa acumulada durante el día de 15.6 MJ/m^2 .

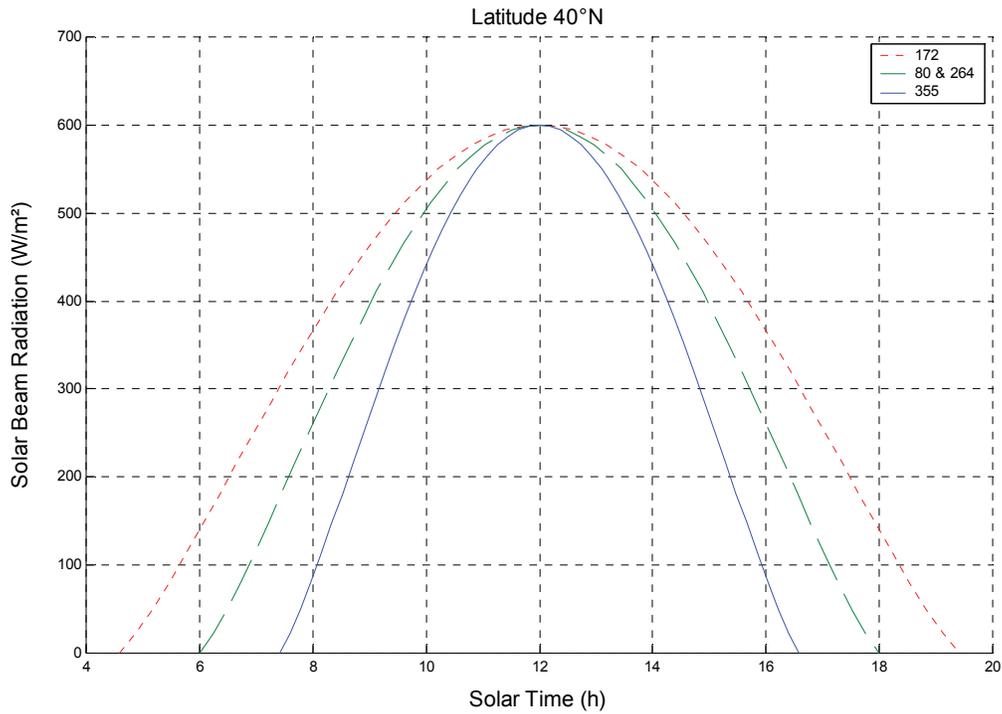


Figura 3.2. Radiación solar directa instantánea sobre un techo horizontal a una latitud de 40°N , durante los solsticios (días 172 y 355) y los equinoccios (días 80 y 264). La energía acumulada al día varía de 11.9 MJ/m^2 (solsticio de invierno) a 19.3 MJ/m^2 (solsticio de verano). Durante los equinoccios se reciben 15.6 MJ/m^2 .

Las mismas consideraciones teóricas que sustentan las expresiones 1.7-1.12, producen una energía solar diaria durante el año que fluctúa alrededor de dicho valor de 15.6 MJ/m^2 diarios, en función de la latitud y del día del año (Fig. 3.3). Los cambios son mayores, otra vez, al aumentar la latitud, principalmente alrededor de los solsticios.

Por las simetrías que se observan respecto a los solsticios, la radiación solar directa diaria sobre un techo horizontal es coincidente en primavera y verano, así como en otoño e invierno, igual que se observó en el capítulo anterior con el tema de la duración de la incidencia solar.

Similarmente, por las antisimetrías que se presentan respecto a los equinoccios alrededor del valor promedio de energía solar de 15.6 MJ/m^2 , entre el verano y el otoño, así como entre la primavera y el invierno, se producen valores acumulados anuales de la radiación solar directa constantes iguales a 5682 MJ/m^2 , que se distribuyen a lo largo del año según la latitud y la estación como se muestra en la figura 3.3.

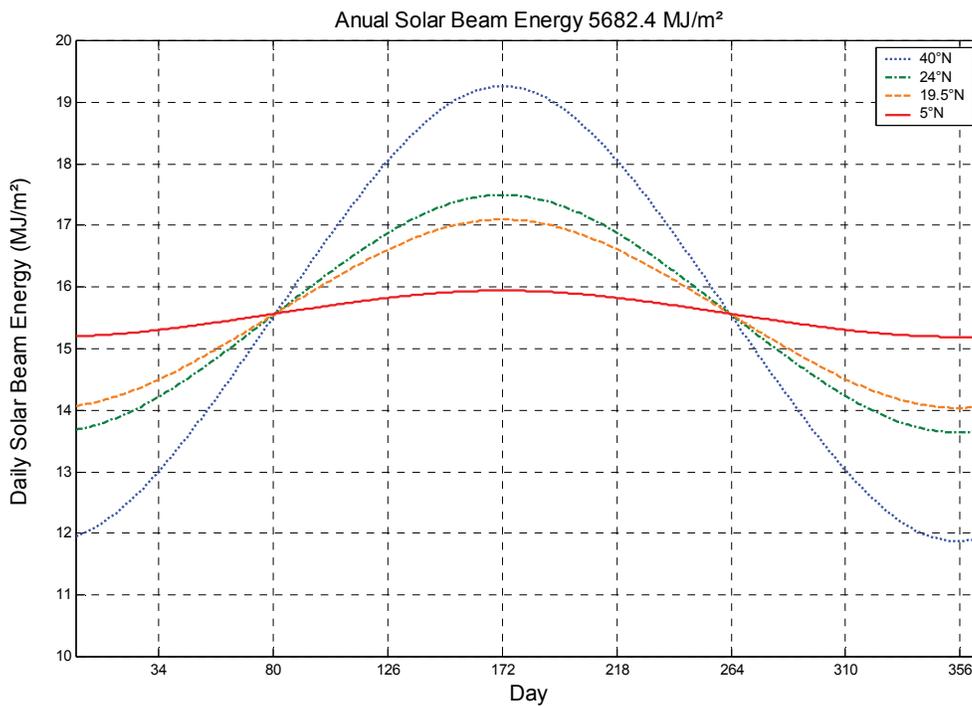


Figura 3.3. Distribución diaria de la energía solar directa recibida en todo el año, de 5682.4 MJ/m^2 . En el Ecuador se reciben 15.6 MJ/m^2 cada día. Al aumentar la latitud, las fluctuaciones de la energía solar directa diaria recibida por un techo horizontal son mayores a causa de los cambios en la longitud del día solar.

§ 3.2. Radiación Solar sobre una Fachada

La radiación solar directa sobre una fachada, además de la latitud, el día y la hora solar, depende del azimut de la construcción. A continuación se ejemplifica una vivienda orientada hacia los puntos cardinales, a las latitudes 24°N y 40°N, para resaltar las diferencias debidas al cambio de la longitud del día solar.

En una vivienda de planta rectangular, los muros opuestos (de azimuts suplementarios) son excluyentes en cuanto al soleamiento, es decir, el sol sólo puede incidir sobre uno de ellos a la vez. Los muros este y oeste de una vivienda son asoleados entonces entre el mediodía y el amanecer o el atardecer, según sea el caso, por lo que en todos los casos la radiación solar recibida por ellos siempre será simétrica respecto al mediodía, por lo que son equivalentes en ese aspecto. La diferenciación entre estos muros más bien será de tipo arquitectónica, considerando los usos de las habitaciones adyacentes, en función de la hora del día. Estos muros reciben la máxima radiación solar cerca del amanecer o el atardecer, según sea el caso, independientemente de la latitud. Cerca del mediodía la radiación recibida decae rápidamente a causa del ángulo de incidencia del sol sobre ellos (Fig. 3.4).

En el caso de los muros norte y sur sí hay diferencias notables en cuanto a su desempeño solar, tanto respecto a la latitud como a la época del año. El muro sur recibe la máxima radiación solar directa durante el solsticio de invierno, incluso mayor que la recibida por un techo horizontal (comparar las figuras 3.2 y 3.4), a causa de la declinación solar, por lo que en lugares que son calurosos incluso en invierno, el control solar sobre ese muro deberá ser más cuidadoso. En las altas latitudes es posible que este muro reciba radiación solar en verano. El soleamiento del muro norte solo se presenta en verano, antes y después del atardecer y el amanecer respectivamente y su contribución a la radiación directa recibida por la envolvente de la vivienda es mínima (Fig. 3.4).

Integrando cada una de las curvas de la radiación directa instantánea, se calcula la energía acumulada a lo largo del día solar en cada muro, para las latitudes 40°N, 24°N, 19.5°N y 5°N (Figs. 3.5-3.8).

La forma de las curvas es la misma para cada latitud: (1) en el muro sur la máxima radiación se presenta en el solsticio de invierno y la mínima en el de verano, aumentando el valor de ambos extremos al incrementar la latitud; (2) complementariamente, en el muro norte la radiación incide sólo en primavera y verano, con el máximo en el solsticio de verano, que se incrementa al disminuir la latitud; (3) los muros este y oeste tienen el mismo comportamiento y casi constante en todo el año, disminuyendo ligeramente al acercarse al Ecuador; (4) en cada muro y en todos los casos, se observa la equivalencia entre la primavera y el verano, así como entre el otoño y el invierno, desde el punto de vista de la radiación solar directa. Como referencia complementaria, se incluyen además los casos del Ecuador y el Trópico de Cáncer, que ilustran las coincidencias de las curvas de radiación con los equinoccios y los solsticios (Figs. 3.9 y 3.10).

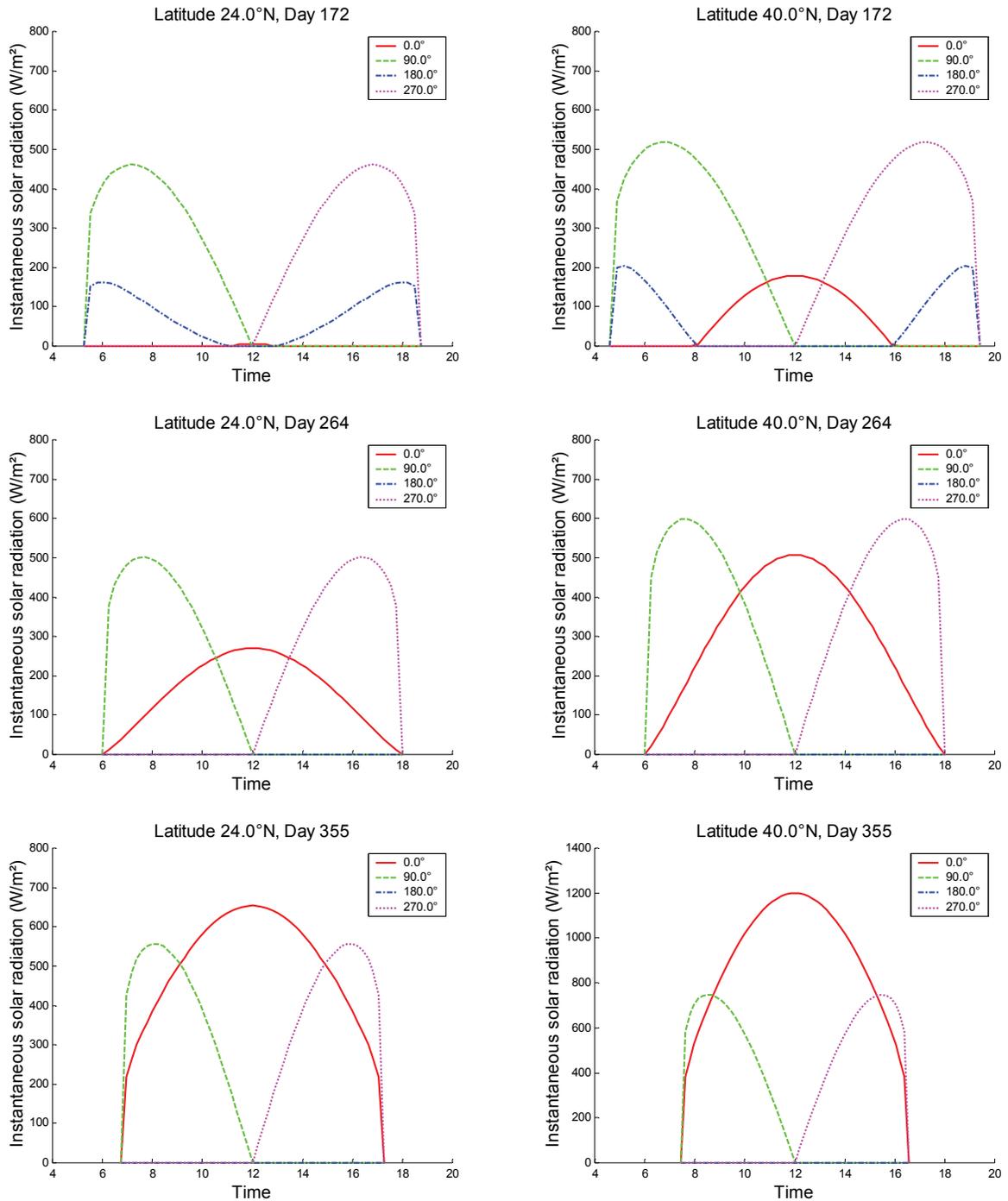


Figura 3.4. Radiación solar directa instantánea sobre cada una de las paredes exteriores o fachadas de una vivienda, orientadas hacia los puntos cardinales, durante los solsticios y los equinoccios, a las latitudes de 24°N y 40°N.

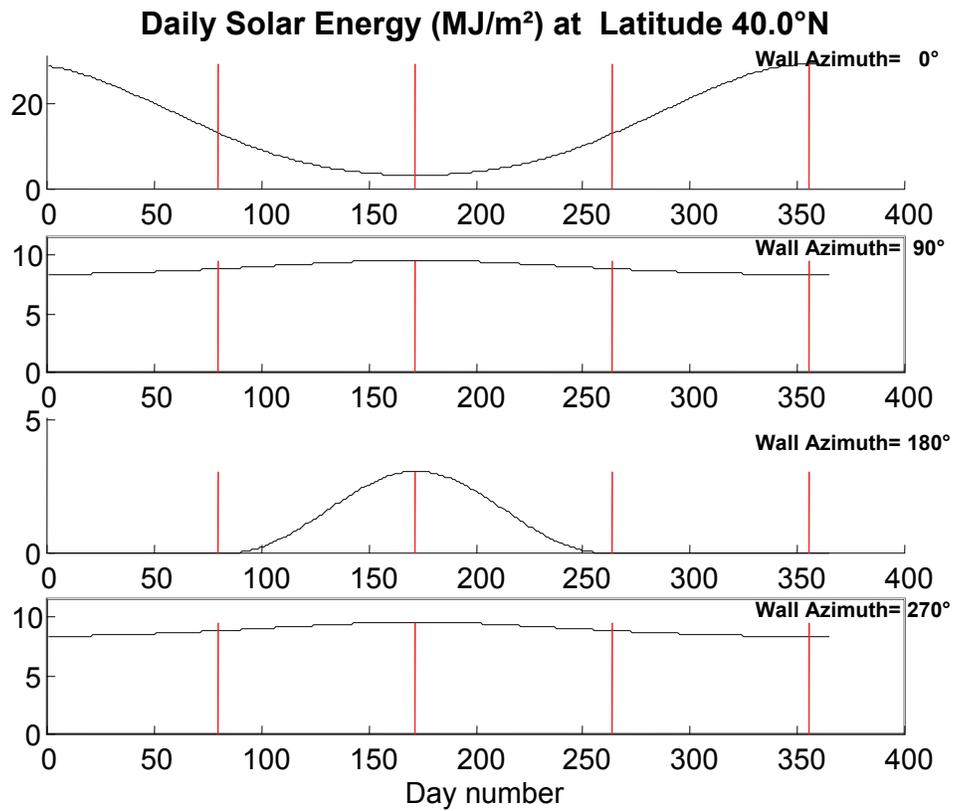


Figura 3.5. Energía acumulada diaria proveniente de la radiación solar directa sobre cuatro muros exteriores o fachadas orientados hacia los puntos cardinales, a una latitud de 40°N.

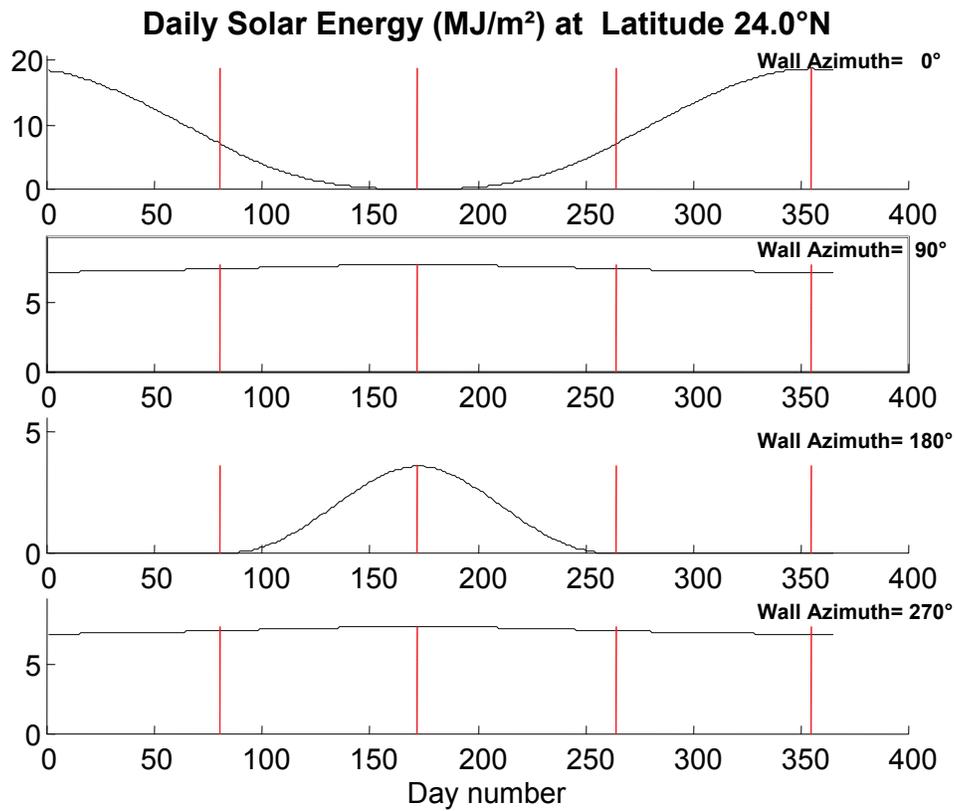


Figura 3.6. Energía acumulada diaria proveniente de la radiación solar directa sobre cuatro muros exteriores o fachadas orientados hacia los puntos cardinales, a una latitud de 24°N.

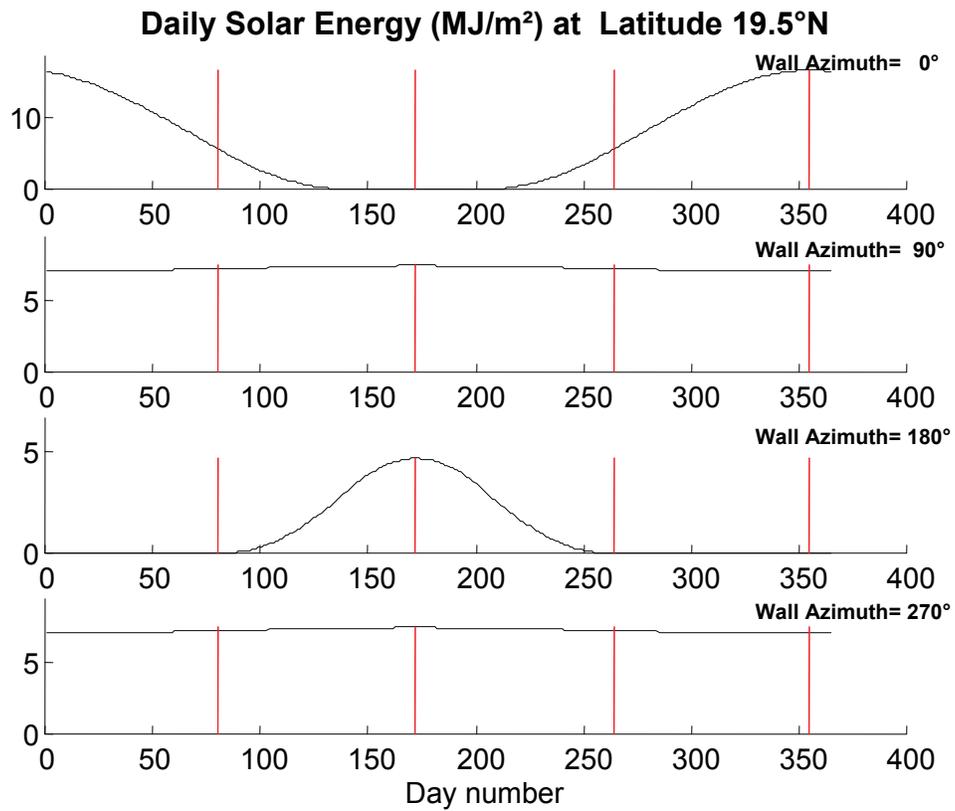


Figura 3.7. Energía acumulada diaria proveniente de la radiación solar directa sobre cuatro muros exteriores o fachadas orientados hacia los puntos cardinales, a una latitud de 19.5°N.

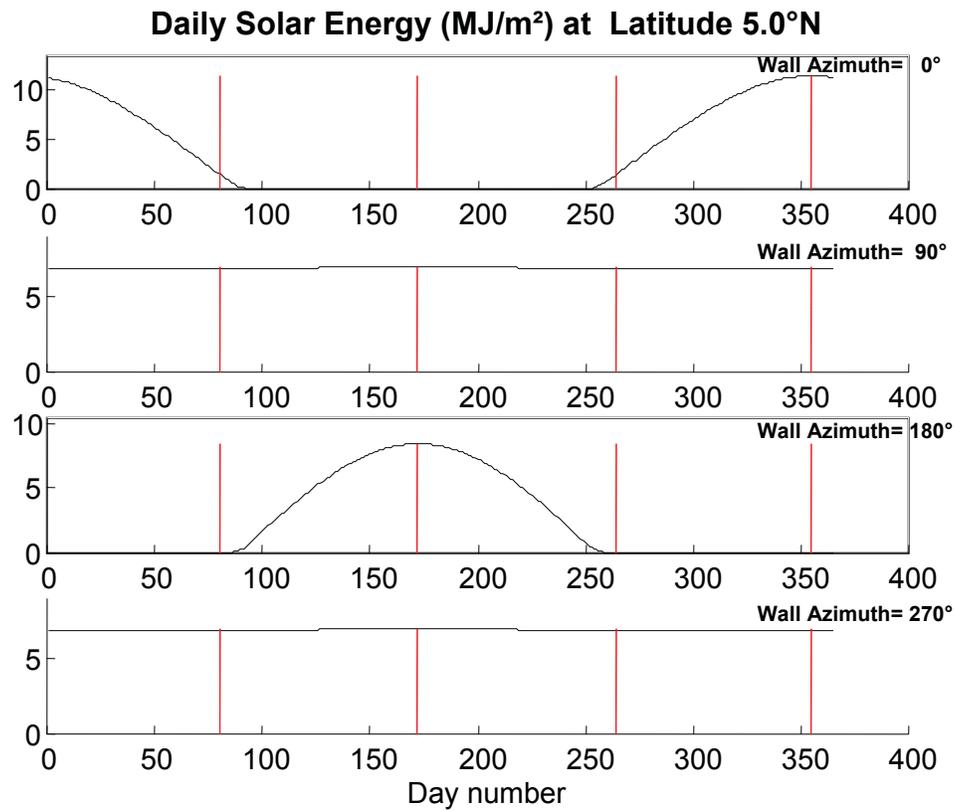


Figura 3.8. Energía acumulada diaria proveniente de la radiación solar directa sobre cuatro muros exteriores o fachadas orientados hacia los puntos cardinales, a una latitud de 5°N.

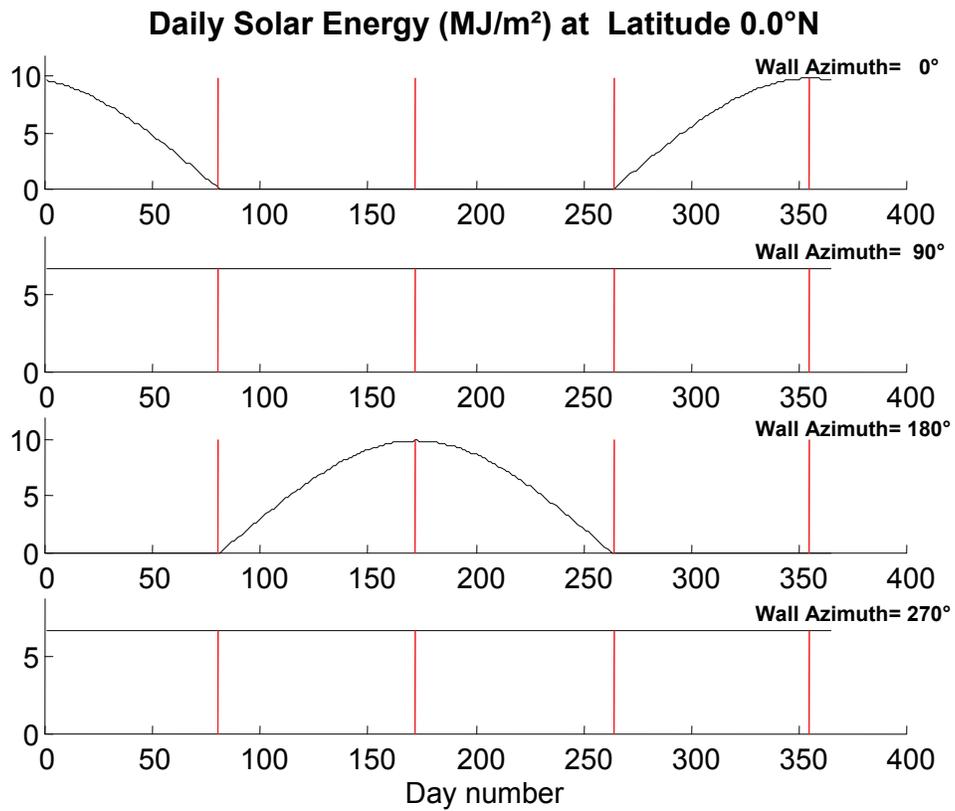


Figura 3.9. Energía acumulada diaria proveniente de la radiación solar directa sobre cuatro muros exteriores o fachadas orientados hacia los puntos cardinales, a una latitud de 0°N.

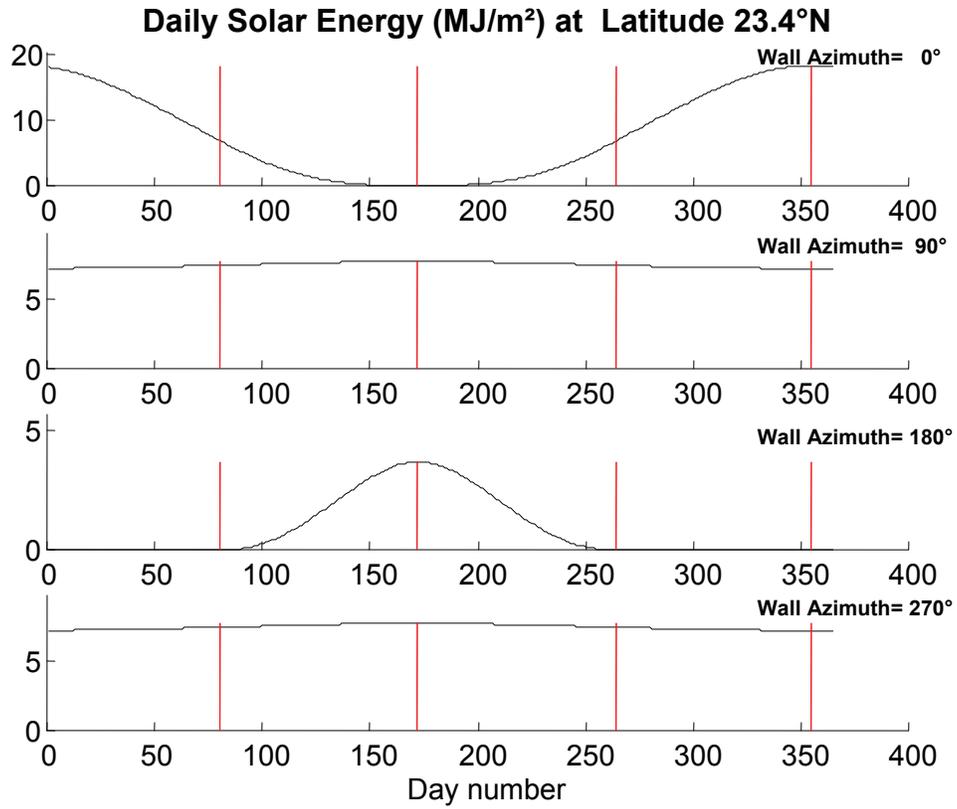


Figura 3.10. Energía acumulada diaria proveniente de la radiación solar directa sobre cuatro muros exteriores o fachadas orientados hacia los puntos cardinales, a una latitud de 23.45°N.

Capítulo 4

ENERGÍA SOLAR SOBRE DIFERENTES TIPOS DE TECHOS

§ 4.1. Techos inclinados

Parametrización

La radiación solar sobre un techo inclinado se calcula aplicando las fórmulas de la radiación sobre un plano inclinado (expresiones 1.7-1.12), a partir de la parametrización que se muestra en la figura 4.1, en la que se hace referencia a la altura del techo respecto al borde superior de las paredes (**H**), a las dimensiones del techo (**P** y **L**) y a su azimut (ψ). La inclinación del techo se calcula directamente a partir de los parámetros referidos.

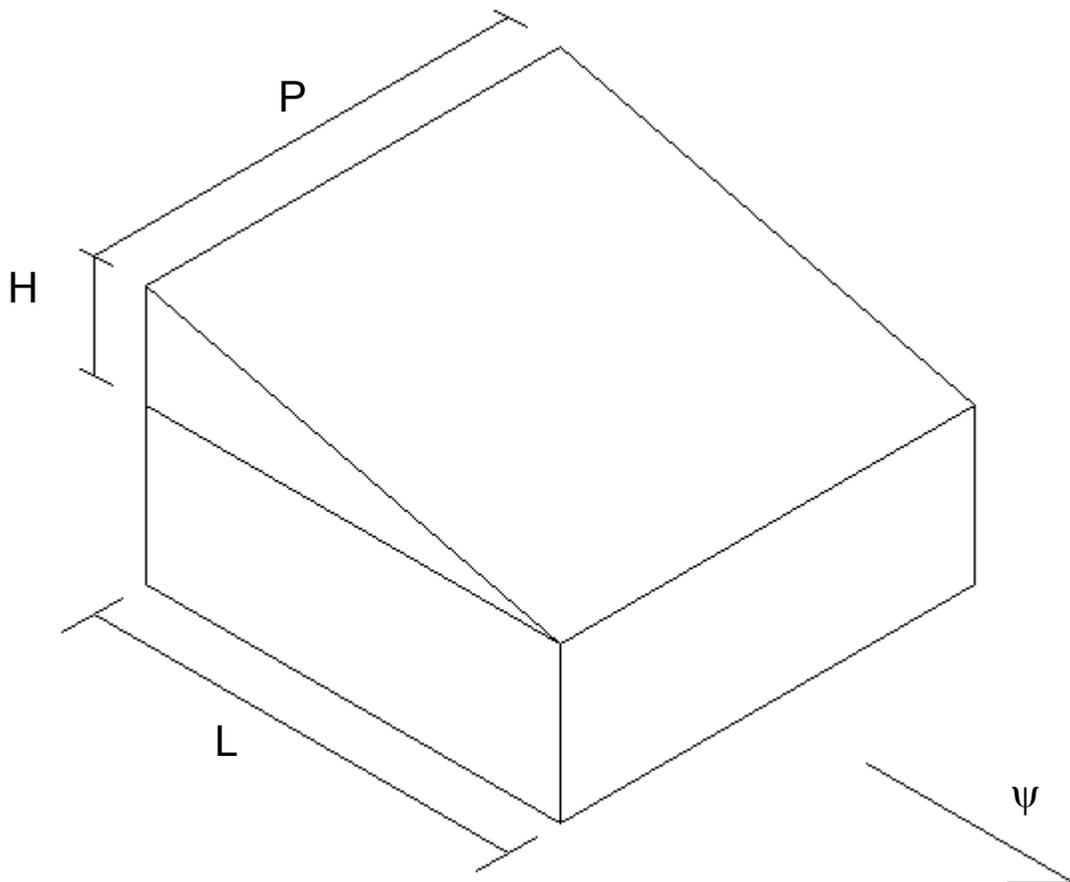


Figura 4.1. Parametrización de un techo inclinado para calcular la radiación solar directa sobre él.

Radiación Solar Directa

La radiación instantánea sobre un techo inclinado depende de la latitud, el día del año, el azimut y la inclinación del techo. En cada caso se obtienen diferentes curvas, en las que aparecen las horas críticas que determinan el periodo de soleamiento del techo. En la figura 4.2 se muestran cuatro ejemplos de tales curvas y en la tabla 4.1 los valores correspondientes, tanto de los parámetros mencionados, como de las horas críticas y la energía acumulada durante el día solar, que corresponde a la integral bajo cada una de las curvas.

Cuando el techo se orienta hacia el Sur durante el solsticio de invierno, recibe más energía debido a que se combina el efecto de la inclinación del techo y la declinación solar, por lo que los rayos inciden a mediodía de manera menos oblicua (Fig. 4.2, curva 1). En cambio, durante el solsticio de verano el azimut del sol se encuentra entre los 90° y 270° casi todo el día, y a pesar de que el día es más largo, cuando el techo se orienta hacia el norte, su inclinación disminuye la intensidad de la radiación (Fig. 4.2, curva 2). Cuando el techo se orienta hacia el este o hacia el oeste, la duración del soleamiento es menor dependiendo del día y de su inclinación (Fig. 4.2, curvas 3 y 4; Tabla 4.1).

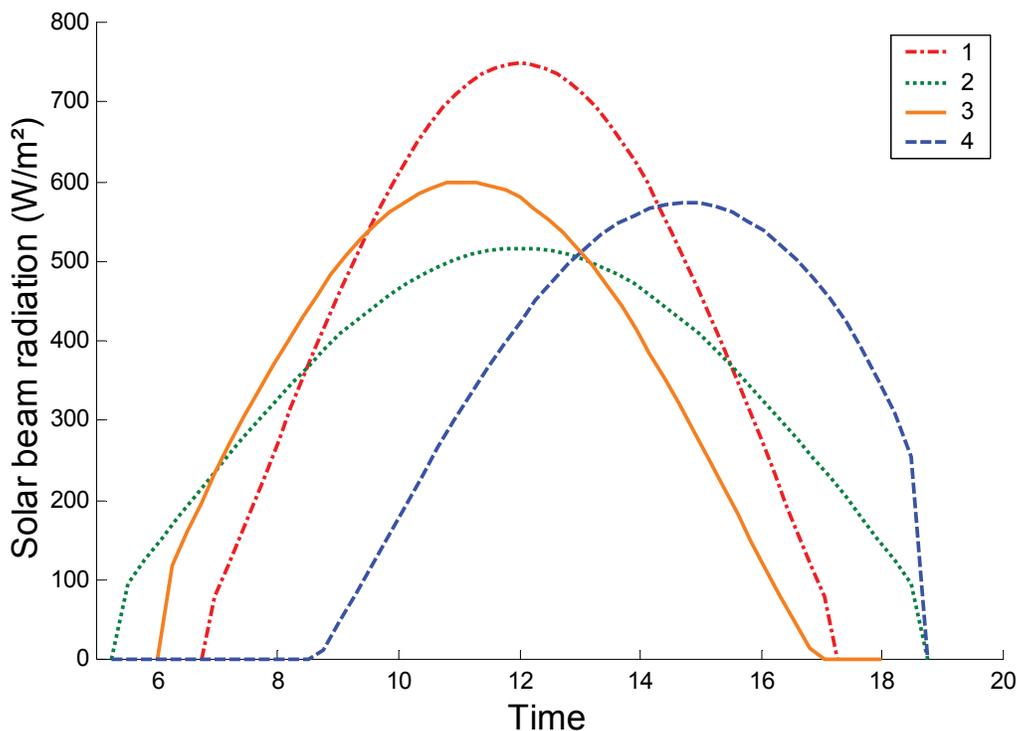


Figura 4.2. Cuatro ejemplos de curvas de energía solar directa sobre un techo inclinado a una latitud de 24°N , en diferentes condiciones: (1) solsticio de invierno, azimut 0° e inclinación 15° ; (2) solsticio de verano, azimut 180° e inclinación 30° ; (3) equinoccio de otoño, azimut 90° e inclinación 15° ; (4) solsticio de verano, azimut 270° e inclinación 45° .

Tabla 4.1. Parámetros correspondientes a las curvas de la Fig. 4.2, horas críticas y energía solar directa acumulada durante el día, todas a una latitud de 24°N.

Curva	Día	Azimut	Inclinación	Horas críticas (h)	Energía (MJ/m ²)
1	355	0°	15°	6.74-17.26	18.0
2	172	180°	30°	5.26-18.74	17.0
3	264	90°	15°	6.00-16.90	15.2
4	172	270°	45°	8.67-18.74	14.3

Para cada día del año es posible encontrar una orientación y una inclinación óptimas de un techo inclinado, en las que reciba la menor radiación solar directa posible. Por ejemplo, durante el solsticio de verano se obtienen valores de radiación más bajos orientando el techo hacia el Sur (azimut 0°) con la mayor inclinación que permita el diseño arquitectónico (Fig. 4.3).

Si el diseño obliga a que el techo tenga determinado azimut, por ejemplo, a que se oriente hacia el Norte, entonces se recomienda, por el contrario, la menor inclinación posible. Así mismo, para orientaciones este-oeste la variación de la radiación es poca, disminuyendo ligeramente al aumentar la inclinación del techo. Estos criterios son generalizables a intervalos más amplios del azimut del techo, a saber: si el azimut está entre 90° y 270°, es decir con orientación más cercana al Norte que al Sur, se recomienda disminuir la inclinación; por el contrario, si la orientación del techo es más próxima al Sur, es decir, azimut entre -90° y 90°, conviene incrementar la inclinación.

Durante los equinoccios y el solsticio de invierno, la orientación óptima es hacia el Norte, con valores menores de energía al aumentar la inclinación del techo. En los lugares calurosos durante todo el año, ésta podría ser la orientación más recomendable (Figs. 4.4 y 4.5), pero es necesario corroborarlo con cálculos integrales a lo largo de todo el año, considerando toda la envolvente en conjunto, tema que se abordará en el capítulo 5.

Por la cercanía de las isóneas en las figuras 4.3-4.5 (casi todas a intervalos de 1 MJ/m²), se deduce que la variabilidad de la radiación recibida por un techo inclinado, al modificar su orientación e inclinación, es menor durante el solsticio de verano y mayor durante el solsticio de invierno. En otras palabras, la radiación sobre un techo inclinado es más sensible a los cambios de orientación y de inclinación del techo en invierno que en verano. En todos los casos la radiación sobre el techo es más sensible a la orientación que a la inclinación del techo, hecho que se demuestra observando la variación de los niveles de energía al recorrer las gráficas de isóneas verticalmente, en contraste con lo que ocurre al hacer los recorridos horizontalmente.

La complementariedad de estas gráficas al cambiar de día, permite que los criterios que sirven para encontrar la orientación y la inclinación con los que se reciba menos radiación en verano, igualmente sirven para que durante el invierno incida más radiación (Fig. 4.6), criterio que es más relevante y evidente en las altas latitudes, donde la duración del día solar es extrema: muy largo en verano y muy corto en invierno (Apéndice 3).

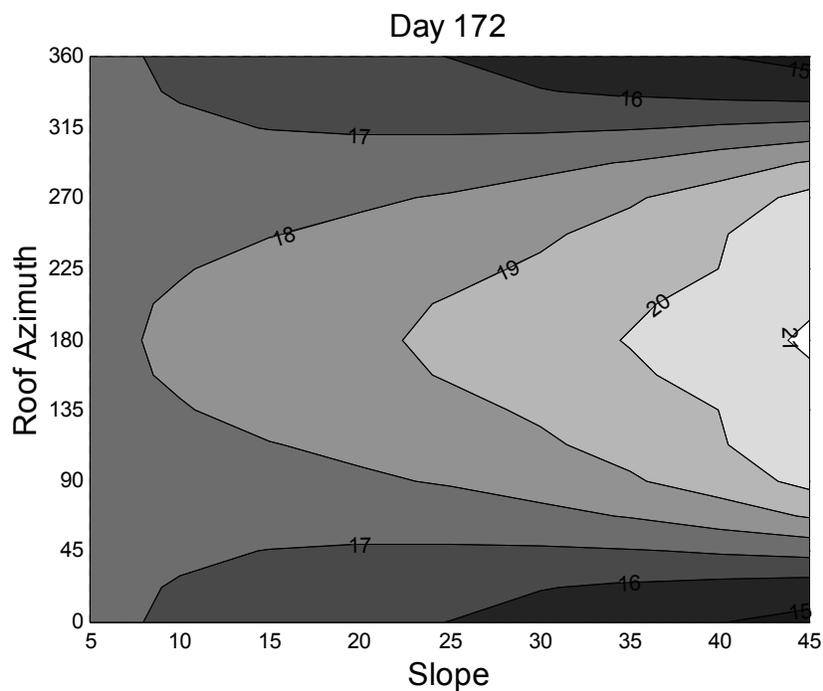


Figura 4.3. Isolneas de energía solar directa (15-21 MJ/m²) sobre un techo inclinado a una latitud de 24°N, durante el solsticio de verano, para diferentes combinaciones de inclinación y azimut del techo. Las zonas más oscuras corresponden a los valores más bajos.

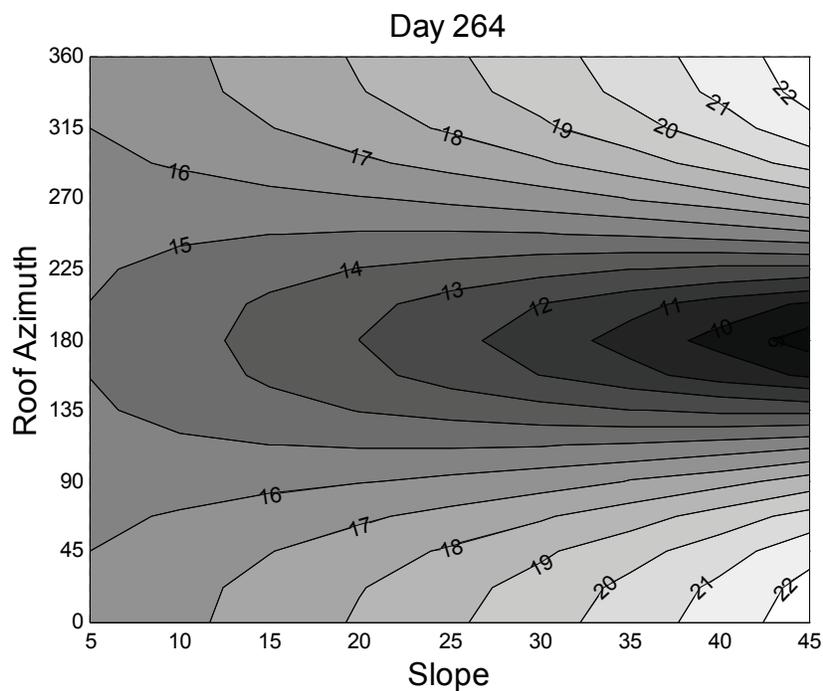


Figura 4.4. Isolneas de energía solar directa (9-22 MJ/m²) sobre un techo inclinado a una latitud de 24°N, durante un equinoccio, para diferentes combinaciones de inclinación y azimut del techo. Las zonas más oscuras corresponden a los valores más bajos.

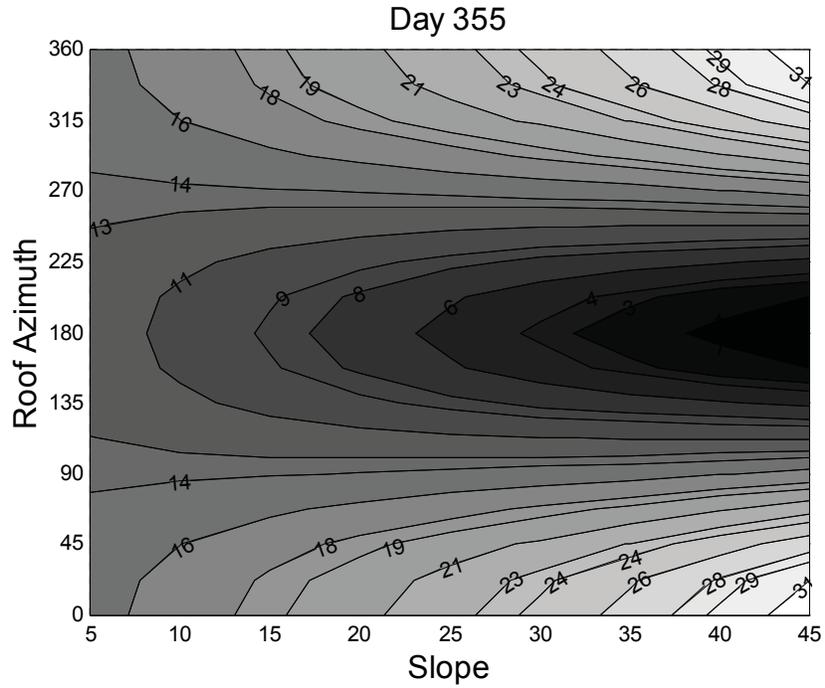


Figura 4.5. Isolíneas de energía solar directa (1-31 MJ/m²) sobre un techo inclinado a una latitud de 24°N, durante el solsticio de invierno, para diferentes combinaciones de inclinación y azimut del techo. Las zonas más oscuras corresponden a los valores más bajos.

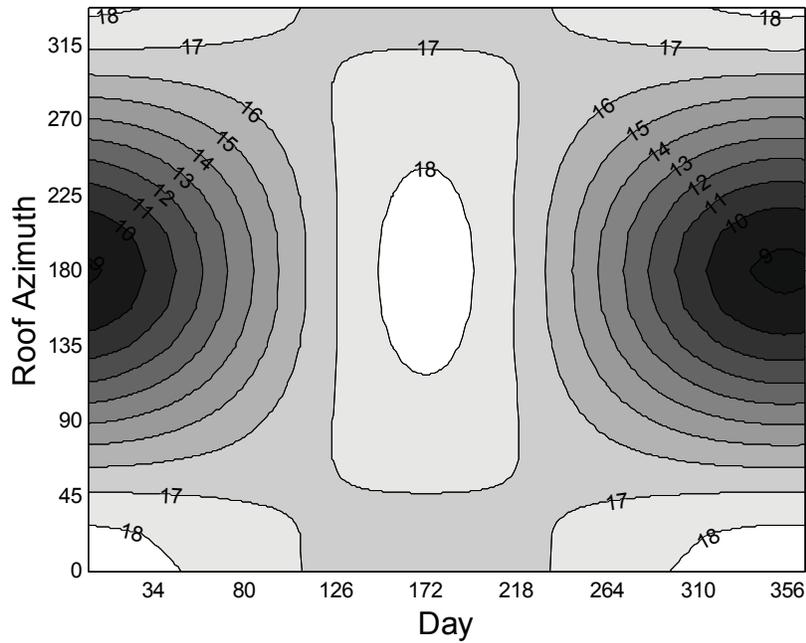


Figura 4.6. Isolíneas de energía solar directa (9-18 MJ/m²) sobre un techo inclinado 15° a una latitud de 24°N, en función del azimut del techo, a lo largo del año. Las zonas más oscuras corresponden a los valores más bajos.

§ 4.2. Techos de Dos Aguas

Parametrización

La radiación solar sobre cada una de las superficies de un techo de dos aguas, se calcula a partir de la parametrización que se muestra en la figura 4.2, en la que se hace referencia a la altura de la costilla del techo respecto al extremo superior de las paredes (H), a la distancia desde el vértice inferior izquierdo de la ubicación de la costilla (x), la longitud de la costilla (P), la longitud de la fachada principal (L) y del azimut (ψ) del techo referido a la orientación de la fachada principal. La inclinación, el azimut y el área de cada uno de los dos planos del techo se calculan directamente a partir de los parámetros referidos. La simetría del techo depende del parámetro x .

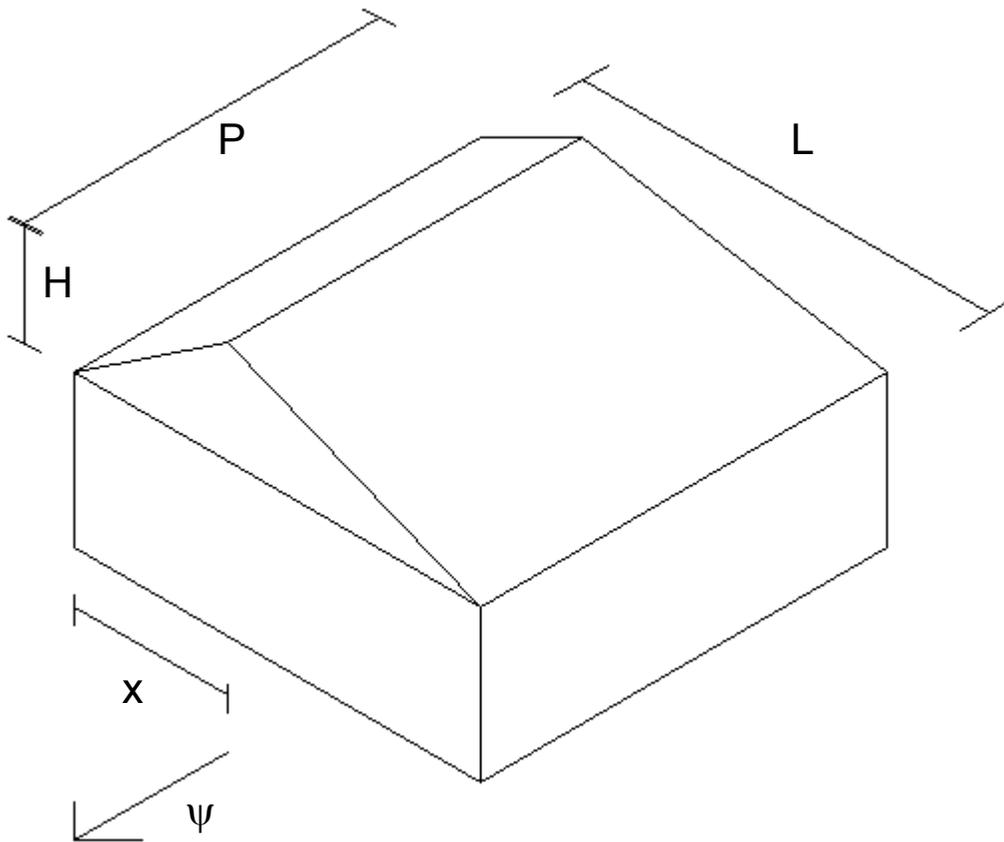


Figura 4.7. Parametrización de un techo de dos aguas para calcular la radiación solar directa sobre cada una de sus superficies.

Radiación Solar Directa

Los cambios en la radiación solar directa incidente sobre un techo de dos aguas, radiación instantánea (W/m^2) y energía solar diaria (MJ/m^2), se analizan en diferentes condiciones. Se considera una vivienda de 12×6 m², en la que la fachada principal (**L**) mide 12 y 6 m, combinada con la otra dimensión (**P**), que respectivamente se toma de 6 y 12 m.

Se analizan los cambios en la radiación debidos a la orientación, al pasar de un azimut de la costilla de 0° a uno de 90° , donde inicialmente el valor correspondiente de **x** se usa de modo que el techo resulte simétrico respecto a la costilla, con un techo de 2 m de altura y una latitud de $24^\circ N$ (Figs. 4.8 y 4.9).

En los comentarios siguientes distinguimos los resultados de ambas figuras en términos de la longitud **L** de la fachada principal, es decir, en la figura 4.8 se usa $L=12$ m, y en la figura 4.9, $L=6$ m. Cuando la fachada principal es menor, son más evidentes las diferencias entre las dos superficies del techo, por ejemplo la separación de los máximos de las curvas de radiación, horizontalmente en la orientación hacia el Sur (columnas izquierdas) y verticalmente en la orientación hacia el Este (columnas derechas). Estas diferencias se deben a que las inclinaciones de las dos superficies del techo dependen de la combinación de valores de **H** y **L**, esto es, siendo **H** constante, la inclinación es mayor cuando **L** es menor (Fig. 4.9).

La radiación diaria es menor cuando **L** es más pequeña, y más baja aún cuando se orienta la vivienda hacia el Este. Si para cada día de los que se muestran en estas figuras, se compara la radiación diaria más baja con la más alta, se obtienen disminuciones de más del 10% en la energía solar recibida por el techo en todos los casos. Este tema se analizará junto con la radiación recibida por las fachadas, ya que ciertos tipos de techos aumentan la superficie expuesta al sol de algunas paredes, como es el caso del techo de dos aguas y no es conveniente hacer recomendaciones basadas solamente en el desempeño solar de los techos.

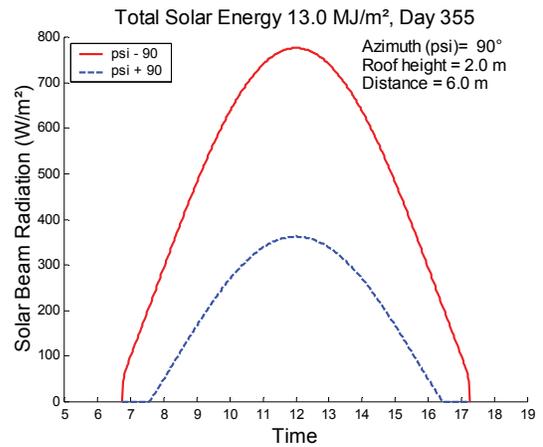
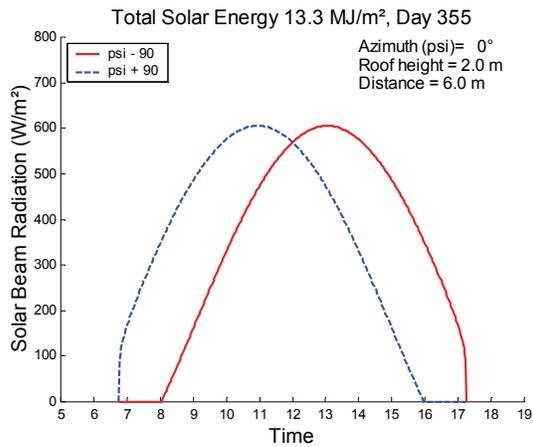
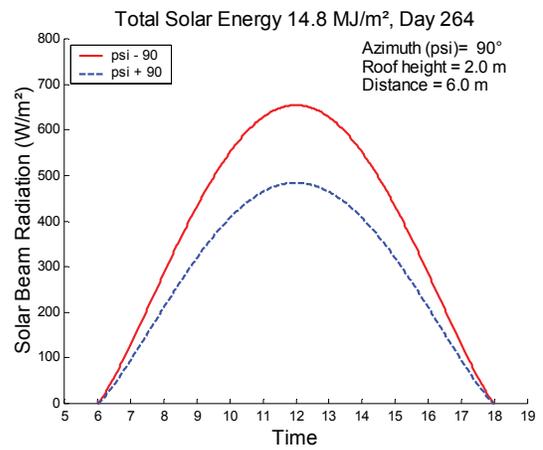
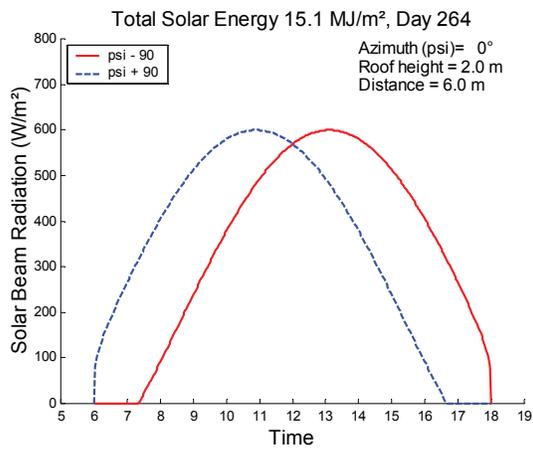
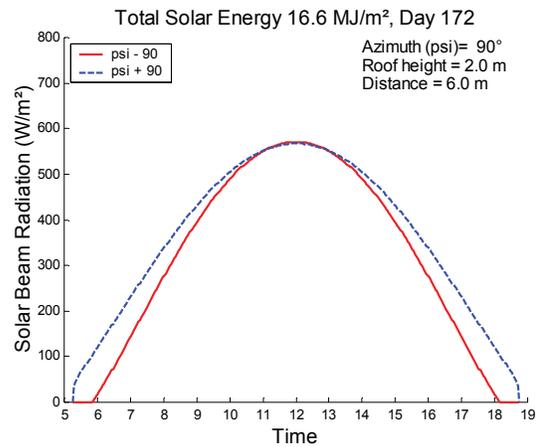
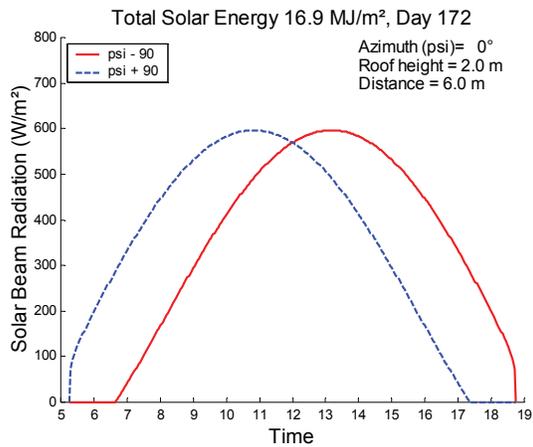


Figura 4.8. Radiación solar directa instantánea sobre cada una de las superficies de un techo de dos aguas simétrico, de una vivienda de 12x6 m² orientada hacia el Sur (columna izquierda) y hacia el Este (columna derecha), durante los solsticios y los equinoccios, a una latitud de 24°N.

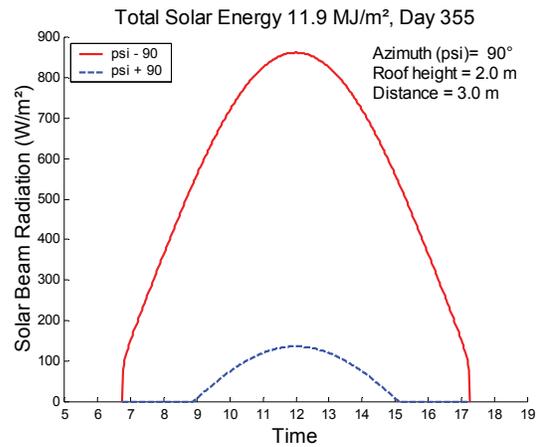
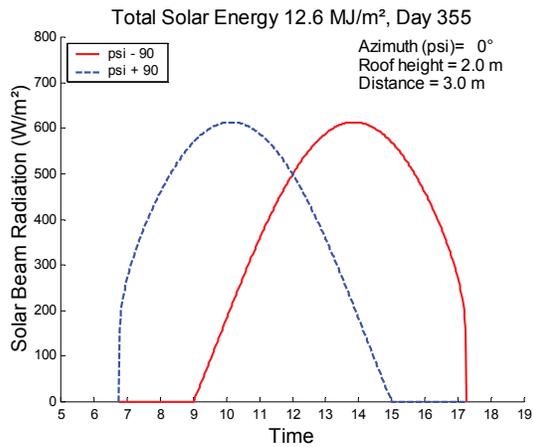
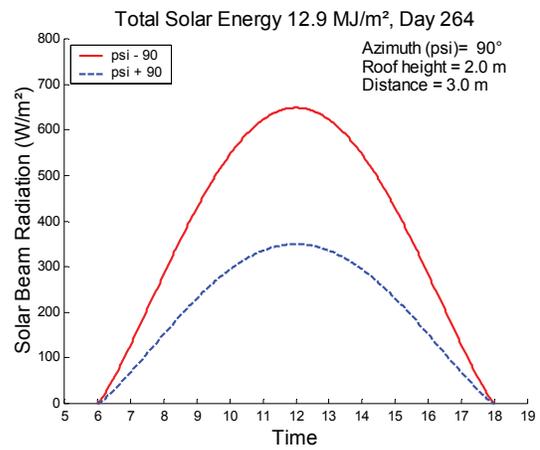
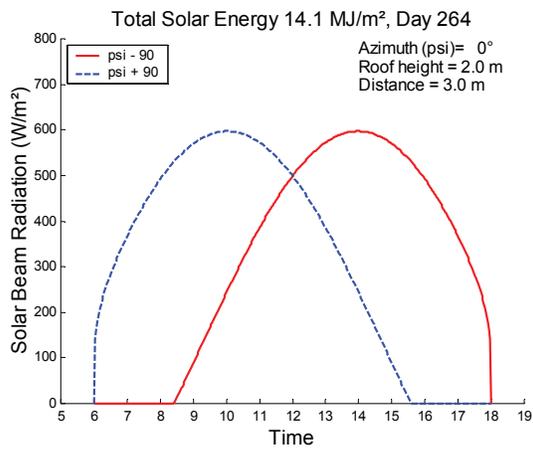
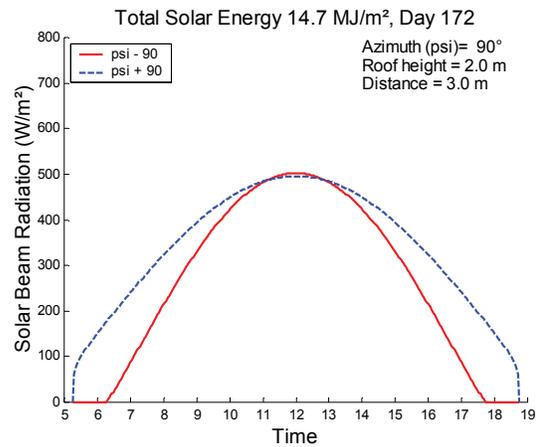
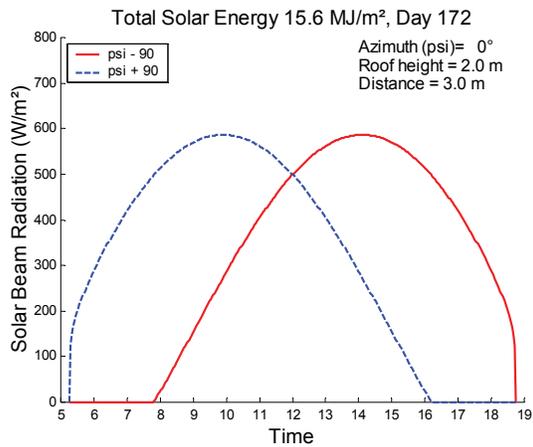


Figura 4.9. Radiación solar directa instantánea sobre cada una de las superficies de un techo de dos aguas simétrico, de una vivienda de 6x12 m² orientada hacia el Sur (columna izquierda) y hacia el Este (columna derecha), durante los solsticios y los equinoccios, a una latitud de 24°N.

§ 4.3. Techos de Cuatro Aguas

Parametrización

La radiación solar sobre cada una de las superficies de un techo de cuatro aguas, se calcula a partir de los siguientes parámetros de construcción (Fig. 4.10):

H = Altura de la cúspide o vértice del techo respecto al extremo superior de las paredes

ψ = Azimut de la vivienda referido a la orientación de la fachada principal

x = Distancia horizontal desde el vértice superior derecho de la fachada principal de la proyección de la cúspide.

y = Distancia horizontal desde el vértice superior izquierdo de la fachada con azimut $\psi - 90^\circ$ de la proyección de la cúspide.

L = Longitud de las fachadas principal y trasera.

P = Longitud de las fachadas laterales.

La inclinación, el azimut y el área de cada uno de los dos planos del techo se calculan directamente a partir de los parámetros referidos. La simetría del techo depende de los parámetros **x** y **y**.

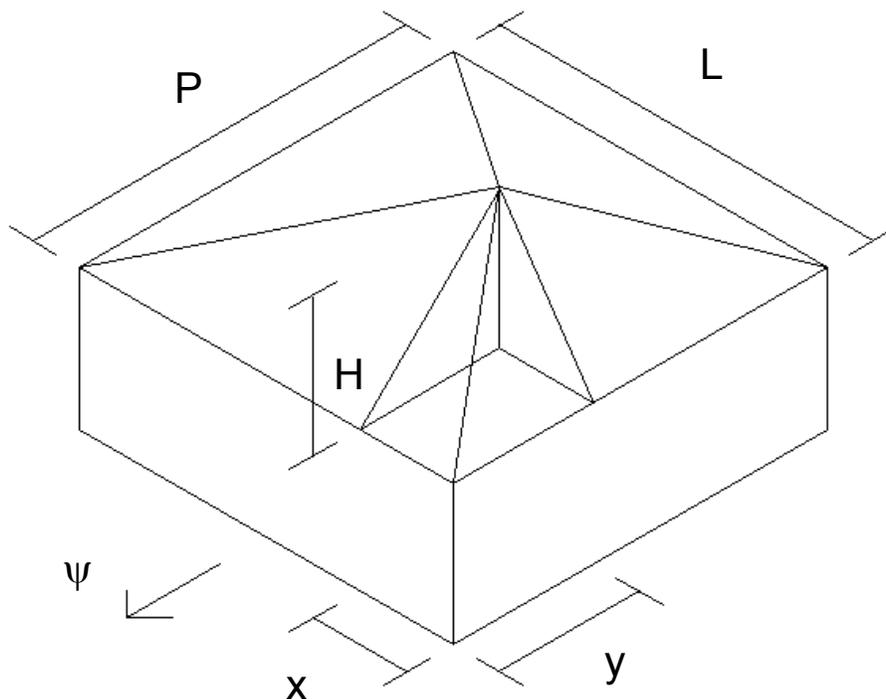


Figura 4.10. Parametrización de un techo de cuatro aguas para calcular la radiación solar directa sobre cada una de sus superficies.

Radiación Solar Directa

La radiación que recibe cada una de las caras de un techo de cuatro aguas se ejemplifica en diversas situaciones para una vivienda de planta $12 \times 6 \text{ m}^2$, con diferentes orientaciones y valores de los parámetros de construcción. El azimut de referencia corresponde a la fachada principal y de ahí se calculan los de cada plano del techo.

En las gráficas de la figura 4.11, la curva continua corresponde al plano del techo cuya orientación es igual a la de la vivienda. En las gráficas correspondientes a los equinoccios se ejemplifica esta situación, en la que se muestran orientaciones de la vivienda de 90° (caso a) y 45° (caso d). Este último caso es el único de la figura en el que se usa un techo de 3 m de altura para hacer más evidente el efecto de la asimetría logrado con los valores de x & y . En el resto se usaron orientaciones hacia el Sur (azimut 0°).

El patrón de radiación se modifica al cambiar de día del año. Durante el solsticio de invierno (día 355) se distingue claramente el comportamiento de las cuatro curvas (Fig. 4.11, b y e): la simetría respecto al mediodía de las curvas correspondientes a los planos este y oeste, el incremento de la radiación en el plano sur a causa de la declinación solar y el plano menos afectado, que es el plano hacia el Norte.

Las cuatro curvas de radiación son muy similares durante el solsticio de verano (día 172), cuando el sol pasa cerca del cenit a esa latitud y los efectos de las diferentes inclinaciones, orientaciones y simetrías de los planos son menos evidentes (Fig. 4.11, c y f).

La energía solar sobre el trecho a lo largo del día se calcula en cada caso mediante el proceso de integración de las cuatro curvas, asignando a cada integral la proporción que corresponda al área de cada plano respecto al área total del techo. En este sentido, las energías sobre los techos de cuatro aguas simétricos son comparables, obteniéndose la mayor energía durante el solsticio de verano y la menor durante el de invierno a causa de la longitud del día solar (Fig. 4.11; a b y c).

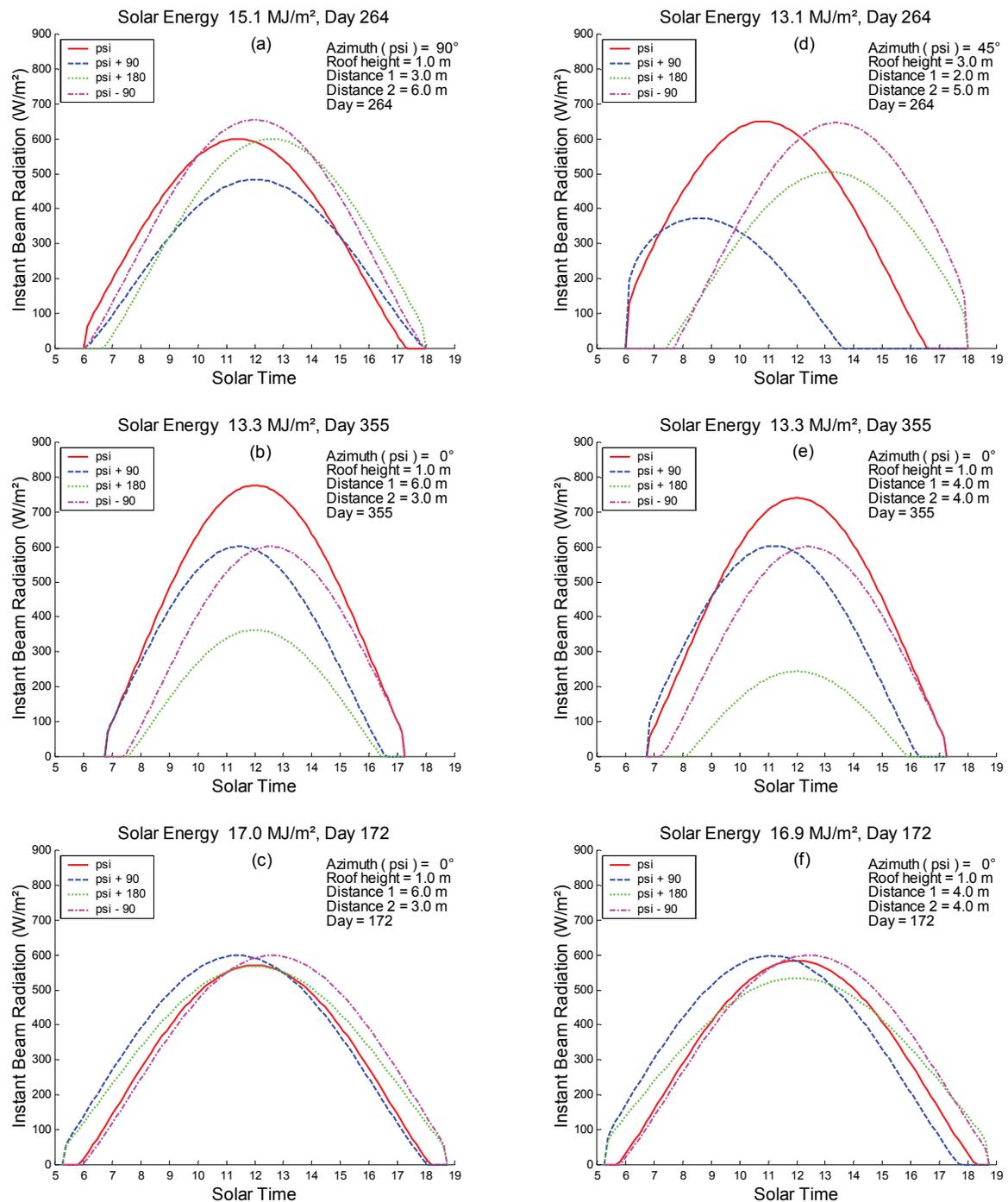


Figura 4.11. Radiación solar directa instantánea sobre cada una de las superficies de un techo de cuatro aguas. La planta de la vivienda es 6x12 m² en el primer renglón (gráficas a y d) y de 12x6 m² en el resto. Los techos simétricos se representan en la columna izquierda (a, b, c) y los asimétricos en la columna derecha (d, e, f), durante los equinoccios y los solsticios, a una latitud de 24°N.

§ 4.4. Bóveda de Cañón

Parametrización

Una bóveda de cañón se caracteriza por su radio R , su longitud L y el azimut ψ de la fachada frontal (Fig 4.12a). Dividiendo la semicircunferencia de la bóveda en un cierto número partes iguales, se calcula un ángulo ρ con el cual se define una tira longitudinal, que es un plano con inclinación β y azimut igual $\psi + 90^\circ$ o $\psi - 90^\circ$, según la hora del día (Fig. 4.12b). Aproximando la superficie de la bóveda con estas tiras y aplicando la formulación de la radiación directa sobre cada plano para cada momento del día solar (expresión 1.12), se calcula la aditivamente la radiación instantánea sobre la bóveda, considerando la proporción que representa el área de cada tira respecto al área total de la bóveda.

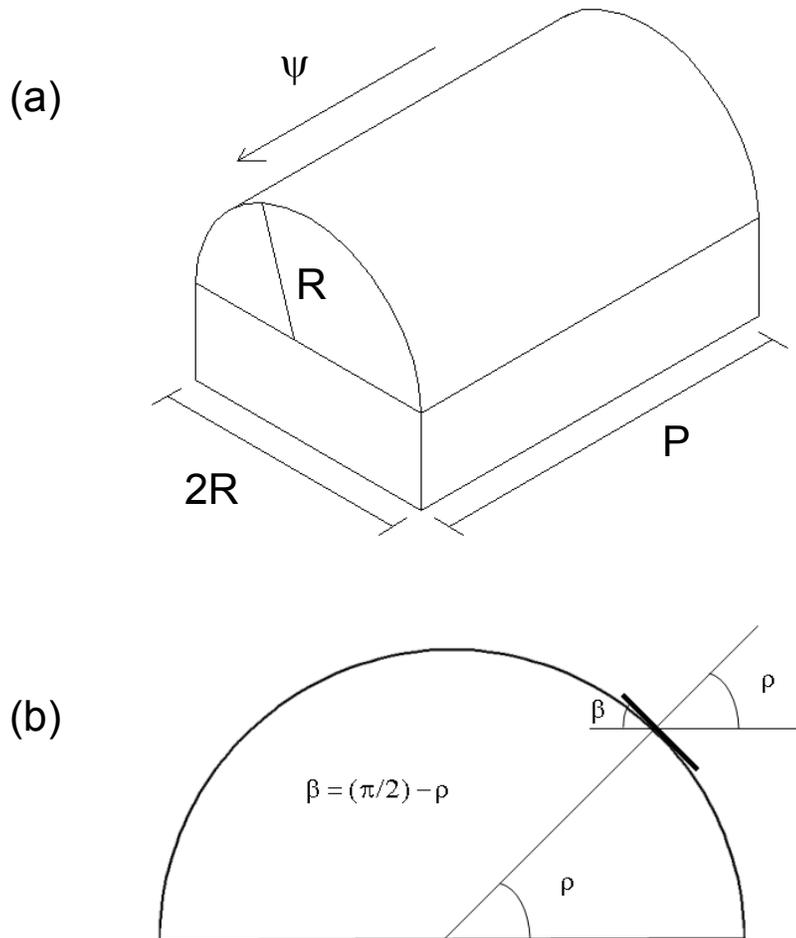


Figura 4.12. Parametrización de una bóveda de cañón para calcular la radiación solar directa sobre cada una de los planos longitudinales que aproximan su superficie.

Radiación Solar Directa

Para el cálculo de la radiación solar directa sobre una bóveda, se usó una aproximación de su superficie mediante 50 tiras longitudinales. La radiación solar directa instantánea en una bóveda de cañón prácticamente no presenta cambios debidos a la orientación a lo largo de un día determinado del año (Fig. 4.13), a diferencia de lo que se observa al cambiar de día. En efecto: durante el solsticio de invierno se alcanzan los valores máximos de radiación, que al integrar se compensan con la menor longitud del día solar, proporcionando valores más bajos de energía que en el solsticio de verano, que es cuando se alcanzan los valores más bajos de radiación instantánea sobre la bóveda, pero los más altos a lo largo del día (Tabla 4.2). A excepción del solsticio de invierno, la bóveda de cañón funciona mejor con un azimut de 90°, es decir, con una orientación este-oeste, aunque los valores de energía solar sobre la pura bóveda no debieran ser concluyentes, sobre todo porque este tipo de techo añade una superficie semicircular a las fachadas frontal y trasera de la vivienda, por lo que se debe hacer el análisis de toda la envolvente, paredes y fachadas en conjunto.

Tabla 4.2. Energía solar diaria (MJ/m²) sobre una bóveda de cañón de 3 m de radio y 12 m de largo, correspondiente a las curvas de figura 4.13 durante los solsticios y equinoccios, para tres orientaciones diferentes, a una latitud de 24°N.

Azimut	Día del año		
	172	264	355
0°	14.31	13.50	13.77
45°	14.17	13.18	13.28
90°	13.52	12.30	13.76

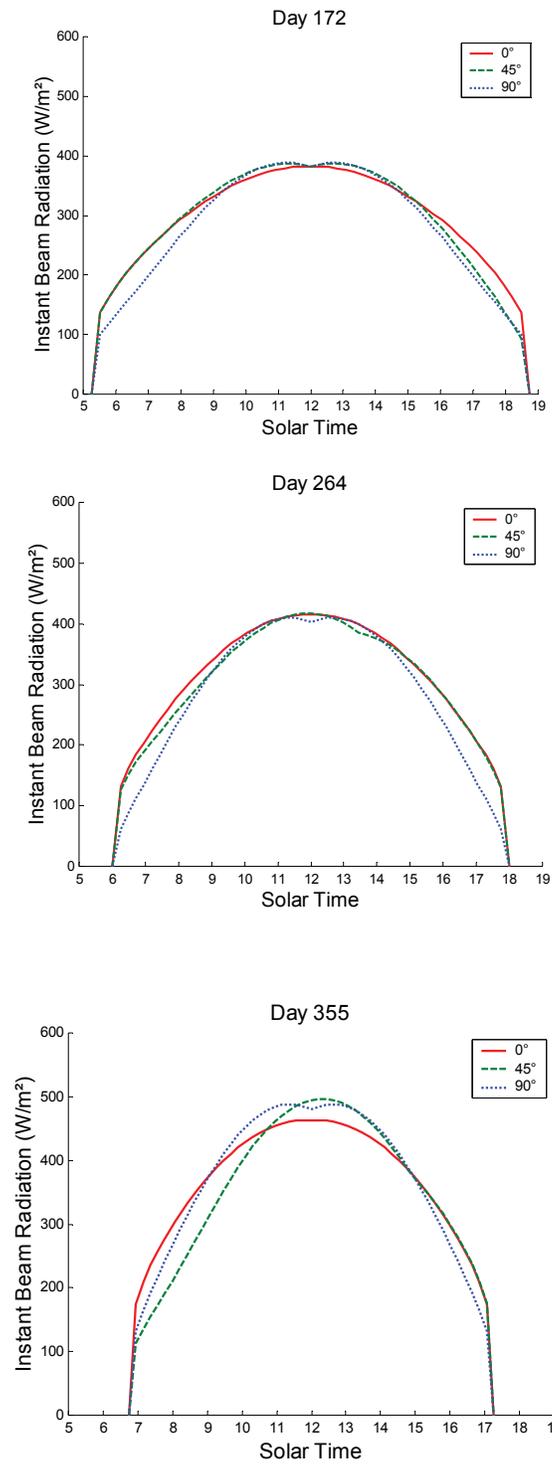


Figura 4.13. Radiación solar directa instantánea sobre una bóveda de cañón de 3 m de radio y 12 m de largo (para una vivienda de planta 6x12 m²) durante los equinoccios y los solsticios, con orientaciones de 0°, 45° y 90° de azimut, a una latitud de 24°N.

§ 4.5. Techo Cónico

Parametrización

El techo cónico solamente depende del radio **R** y la altura **H** sobre las paredes laterales de la vivienda. Al igual que el techo horizontal, el comportamiento solar de este tipo de techo es independiente de la orientación.

Para calcular la radiación solar directa sobre un techo cónico con la metodología del plano inclinado (expresión 1.12), su superficie se aproxima mediante una serie de triángulos iguales con vértice coincidente con el del cono y bases con extremos sobre la circunferencia de la base del cono (Fig. 4.14).

La circunferencia se recorre mediante un ángulo ψ que define el azimut del triángulo. La exactitud del cálculo de la radiación y de las áreas de los rectángulos depende del número de triángulos que se utilicen. La inclinación de cada triángulo coincide con la inclinación α del techo. Para cada intervalo de tiempo, la radiación sobre cada triángulo contribuye proporcionalmente a la radiación sobre el cono según la razón que represente su área respecto al área A_C del techo dada por:

$$A_C = \pi R \sqrt{R^2 + H^2} \quad (4.1)$$

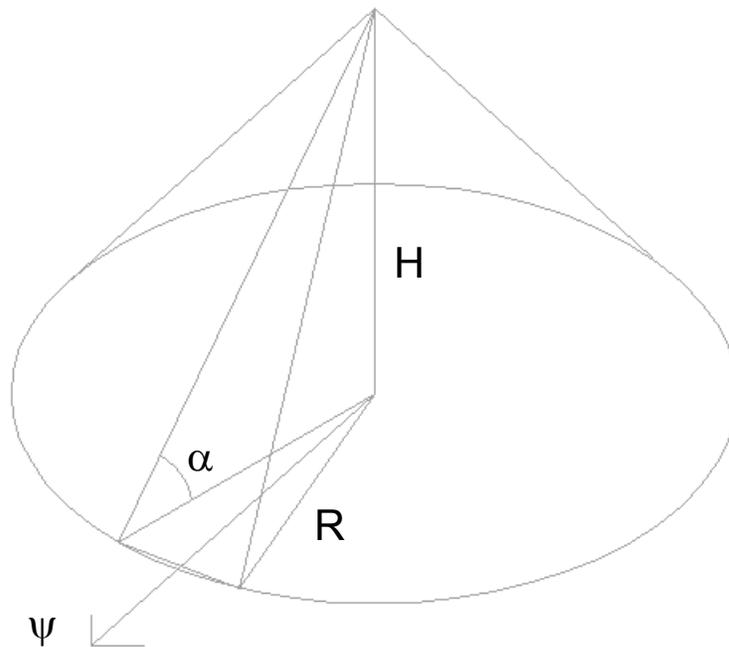


Figura 4.14. Parametrización de un techo cónico de altura H y radio R para calcular la radiación solar directa sobre cada uno de los triángulos que aproximan su superficie. El ángulo α del techo, es la inclinación de todos los triángulos.

Radiación Solar Directa

El cálculo de la radiación solar directa sobre el techo cónico se hizo aproximando su superficie con 60 triángulos. Las fluctuaciones de la radiación se ejemplifican usando un cono de radio 4 m con diferentes alturas durante el solsticio de verano y con un cono de 2 m de altura durante los solsticios y equinoccios (Fig. 4.15).

El patrón de radiación a lo largo del día es muy similar para los días mostrados, diferenciándose por la duración del día solar y con valores máximos que disminuyen al aumentar la altura del cono. En todos los casos, el cono expone una mayor superficie a la radiación solar alrededor de los amaneceres y atardeceres, por lo que la curva adquiere una forma acampanada a causa del borde de la curva a esas horas y a la simetría de la curva alrededor del mediodía.

El efecto de auto sombreado de este tipo de techo es mayor durante el solsticio de invierno cuando la declinación solar es mayor, y disminuye en el solsticio de verano cuando el sol pasa cerca del cenit a la latitud de 24°N que se usó en los ejemplos (Fig. 4.15).

Esto se corrobora en el proceso de integración de cada curva, con el que se calcula la energía solar al día correspondiente a los solsticios y los equinoccios para diferentes alturas del techo (Tabla 4.3).

Las mejoras en el desempeño solar del cono al ir aumentando la altura del techo de 1 m en 1 m, son mayores durante el solsticio de verano y menores en el de invierno. Tales mejoras son cada vez más grandes en la medida que se incrementa la altura; por ejemplo, para el día 172 la radiación disminuyó en 6.3, 8.2 y 8.5%, al aumentar la altura de 1 a 2 m, de 2 a 3 m y de 3 a 4 m, respectivamente. El desempeño solar del techo al pasar de una altura de 1 m a una de 4 m, mejora un poco más del 20% durante la primavera y el verano en promedio (Tabla 4.3).

Altura (m)	Día del año		
	172	264	355
1	17.04	15.16	13.34
2	15.97	14.22	12.70
3	14.66	13.10	12.02
4	13.41	12.04	11.51

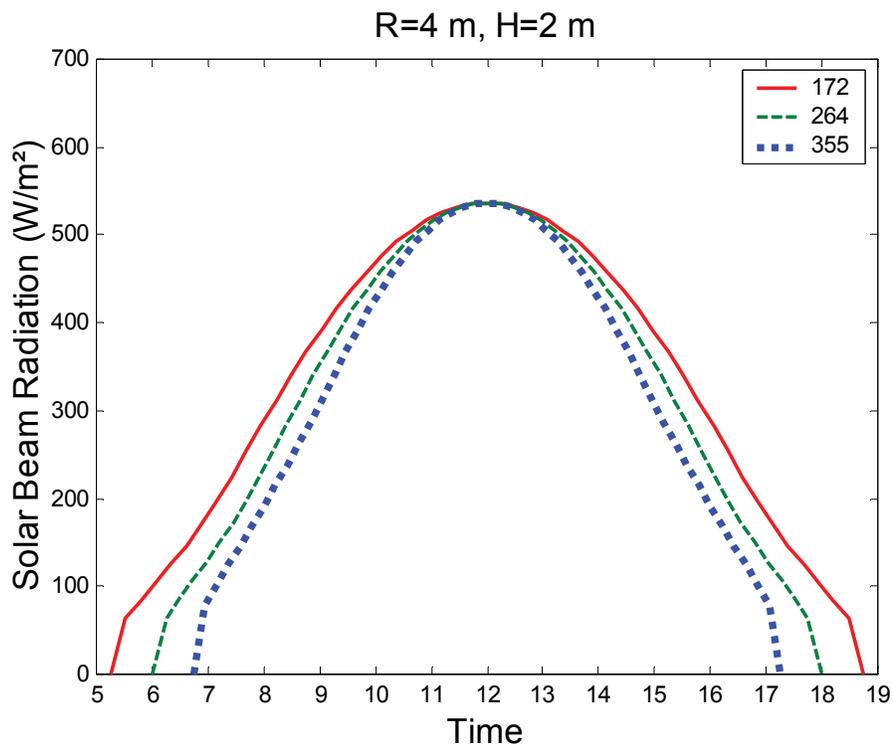
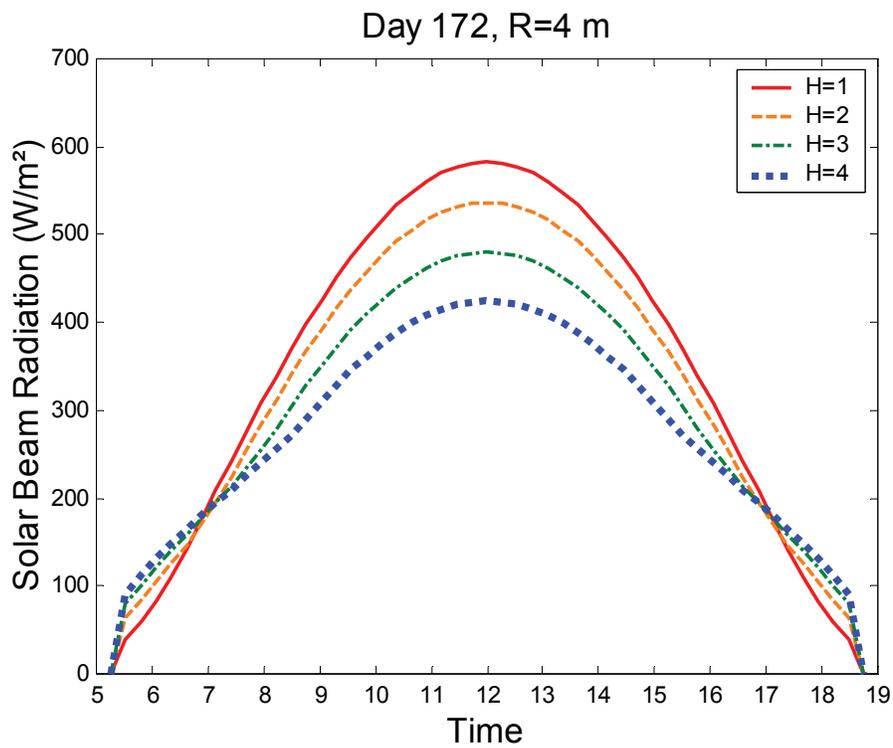


Figura 4.15. Radiación solar directa instantánea sobre un techo cónico de 4 m de radio, a una latitud de 24°N. Arriba se muestra con diferentes alturas del cono durante el solsticio de verano. Abajo para una altura de 2 m durante los equinoccios y los solsticios.

§ 4.5. Bóveda Semiesférica

Parametrización

La bóveda semiesférica se denomina en el medio arquitectónico domo o cúpula, y se caracteriza sólo por su radio R ; se usarán indistintamente estos nombres, o simplemente bóveda cuando no haya confusión con la de cañón. La radiación sobre el domo se calcula aproximando su superficie con pequeños rectángulos en los que se aplica la formulación de la radiación sobre un plano inclinado (expresión 1.12). La cúpula se divide en n_p "paralelos" y n_m "meridianos", definidos mediante los ángulos ρ y ψ , con los que se localiza cada rectángulo.

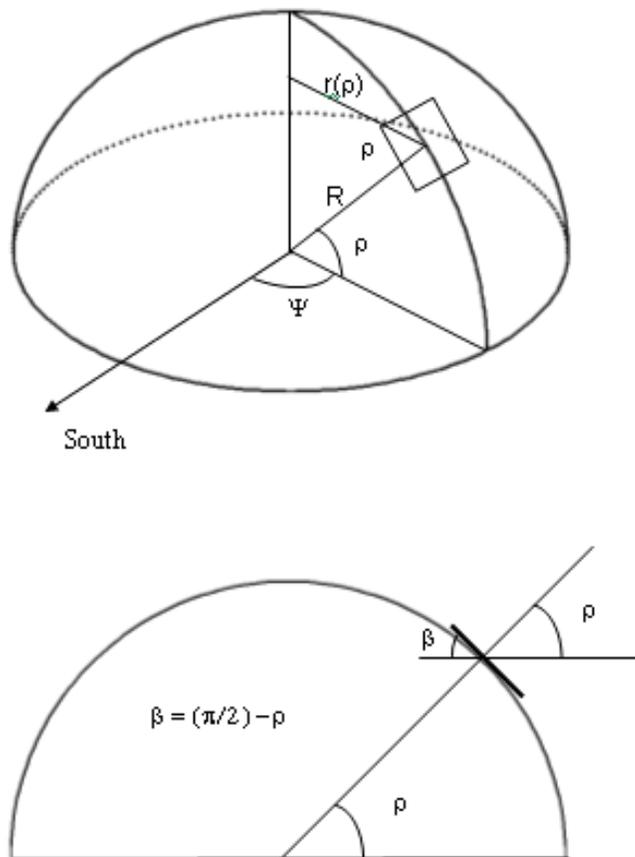


Figura 4.16. Parametrización de un domo de radio R para calcular la radiación solar directa sobre cada una de los rectángulos que aproximan su superficie, localizados en un "paralelo" del cono mediante el ángulo ρ , y un ángulo ψ para girar los rectángulos sobre la circunferencia de radio $r(\rho)$ del paralelo, que define su azimut. La inclinación β de cada rectángulo es el complemento de ρ .

El complemento del primero de estos ángulos es la inclinación del plano y el segundo su azimut. La radiación sobre la bóveda se calcula sumando la proporcionalmente las radiaciones sobre cada rectángulo, en función del área que represente respecto al área de la bóveda (Fig. 4.16).

A partir del radio $r(\rho) = R \cos(\rho)$ del paralelo localizado mediante el ángulo ρ , se calcula el área A_r de cada rectángulo:

$$A_r = \frac{\pi R}{2n_p} \cdot \frac{\pi r(\rho)}{n_m} = \frac{\pi^2 R^2 \cos(\rho)}{2n_p n_m} \quad (4.2)$$

La radiación solar directa instantánea $G_v(t)$ sobre la bóveda semiesférica se calcula mediante:

$$G_v(t) = \frac{1}{A_v} \sum G_{sB}(t) \cdot A_r \quad (4.3)$$

donde $G_{sB}(t)$ es la radiación sobre cada rectángulo (Expresión 1.12) y $A_v = 2\pi R^2$ es el área del domo.

Resultado 4.1

La radiación solar sobre una bóveda semiesférica no depende de su radio.

En efecto: en la expresión 4.3, la razón entre las áreas de cada rectángulo y del domo no depende de R , ya que en el cociente de A_r (expresión 4.2) entre A_v se cancela R^2 .

La simulación descrita permite no sólo calcular la radiación, si no también mostrar el efecto de auto sombreado de la bóveda (Fig. 4.17), que siempre está presente, excepto cuando el sol se encuentra exactamente en el cenit del lugar.

La radiación directa del sol sobre la bóveda actúa de manera diferente según la época del año y la latitud del lugar (Fig. 4.18). En las latitudes ecuatoriales la radiación es muy similar durante todo el año, mientras que en las altas latitudes (arriba del Trópico de Cáncer) la radiación durante el solsticio de invierno se incrementa notablemente alrededor del mediodía (Fig. 4.18, columna derecha). Tales valores de radiación se deben a que la radiación máxima promedio sobre el plano horizontal se ha mantenido en 600 W/m^2 en todos los cálculos y en esas fechas los rayos del sol inciden sobre la bóveda con un ángulo menor debido a la declinación solar, por lo que la proyección sobre el ángulo de incidencia de ese valor constante, es el mayor que se puede obtener en todo el año.

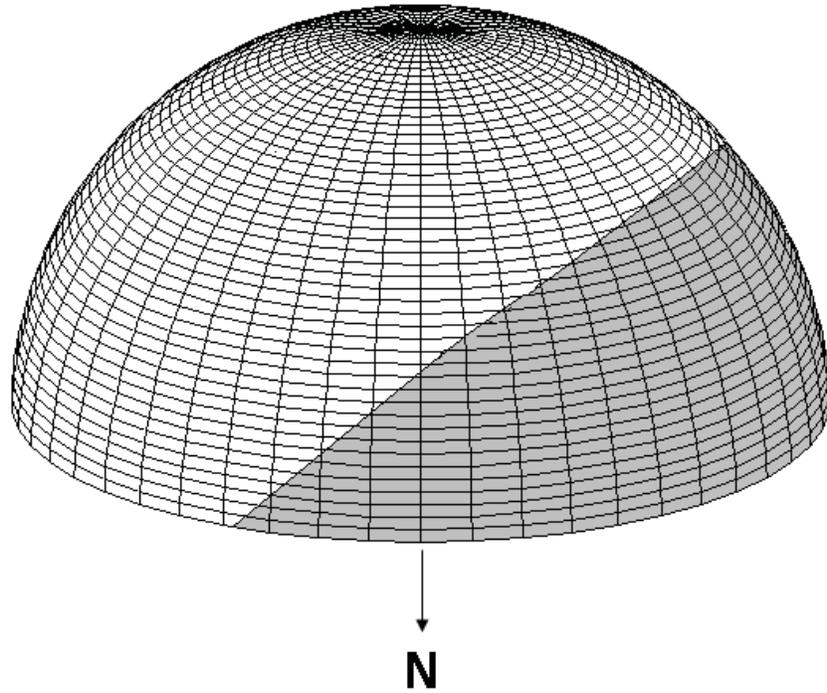


Figura 4.17. Simulación del efecto de auto sombreado de una bóveda durante el equinoccio de primavera a las 10 horas, a una latitud de 24°N. Los cuadros oscuros corresponden a la sombra de los rayos solares.

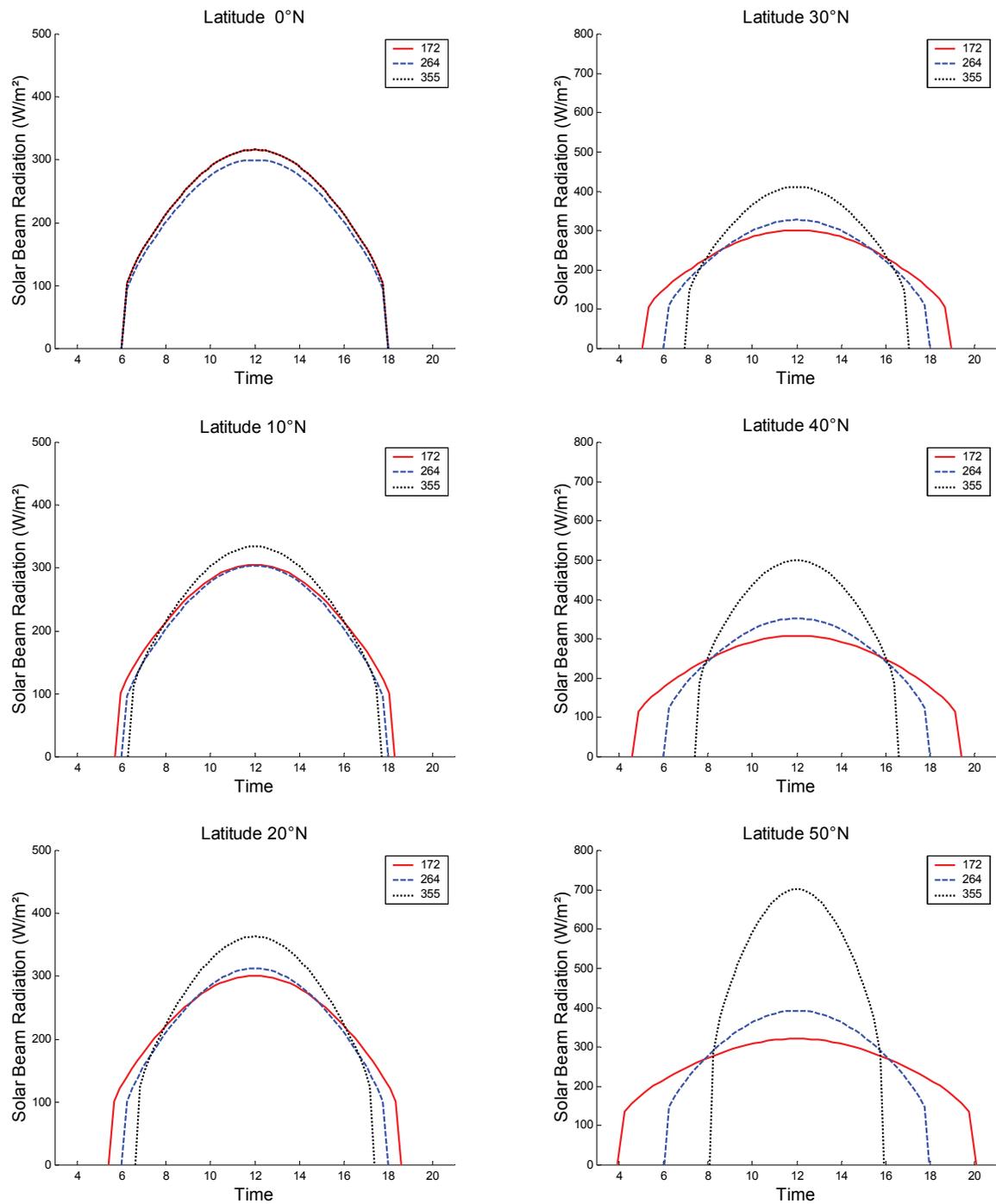


Figura 4.18. Radiación solar directa instantánea sobre un domo de radio arbitrario, a diferentes latitudes, durante los equinoccios y los solsticios.

Mediante el proceso de integración de cada una de las curvas de la Figura 4.18, se obtiene la energía solar sobre la bóveda para cada día (Tabla 4.4). La combinación de las modificaciones de la radiación con la longitud del día solar proporciona diferentes situaciones comparativas para cada día en función de la latitud.

En todos los casos la bóveda funciona mejor durante los equinoccios (representados en las tablas y figuras por el día 264), mientras que durante los solsticios, la radiación en el de verano es igual a la de invierno en el Ecuador, mayor entre 10° y 30°N y menor para las latitudes 40° y 50°N.

El promedio de las radiaciones correspondientes al solsticio del verano y al equinoccio, representativa del desempeño solar de la cúpula entre la primavera y el verano, es menor que la radiación durante el solsticio de invierno. Las mejoras calculadas con dichos promedios (a partir de los resultados de la Tabla 4.4) son cada vez menores al disminuir la latitud y van desde el 12.7% al pasar de 40° a 50°N hasta 1.2% al comparar la latitud 10°N con el Ecuador.

Tabla 4.4. Energía solar diaria (MJ/m²) sobre un domo de radio arbitrario durante los solsticios y equinoccios, para diferentes latitudes.			
Latitud Norte	Día del año		
	172	264	355
0	10.28	9.72	10.28
10	10.43	9.82	10.36
20	10.83	10.12	10.70
30	11.54	10.67	11.42
40	12.73	11.58	12.79
50	14.77	13.09	15.66

Capítulo 5

ENERGÍA SOLAR SOBRE LA ENVOLVENTE DE UNA VIVIENDA

§ 5.1. Energía Solar sobre la Envolvente

Metodología

En los capítulos anteriores se ha mostrado el desempeño de un conjunto de superficies en términos de la radiación solar directa por metro cuadrado sobre cada una de ellas. Así se revisó el desempeño de un techo horizontal y de las fachadas de una vivienda, tanto en número de horas de incidencia solar (Cap. 2), como en términos de la radiación instantánea, diaria y anual (Cap. 3). Tal enfoque muestra el comportamiento de cada una de las superficies externas de una vivienda convencional, es decir, de planta rectangular con techo horizontal, ante la radiación solar directa. Menos comunes son los diferentes tipos de techos, vistos como una composición de diversas superficies, cada una con su propia orientación o azimut y su propia inclinación (Cap.4). Los resultados mostraron un enfoque más amplio del comportamiento individual de los diferentes tipos de techos y sus ventajas comparativas como diferentes opciones bioclimáticas para ser usadas en viviendas.

Con el objeto de comparar el desempeño solar de diferentes tipos de viviendas, incluso aquellas que tengan la misma geometría pero diferentes dimensiones, se calculará la radiación $r(t)$ recibida por la envolvente (superficies externas expuestas a la radiación solar), considerando la radiación instantánea $r_i(t)$ incidente sobre cada una de sus superficies y de su área correspondiente A_i , como sigue:

$$r(t) = \frac{\sum r_i(t) \cdot A_i}{\sum A_i} \quad (5.1)$$

Para una vivienda 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 a energía solar $SE_v(n)$ por unidad de superficie (MJ/m^2):

$$SE_v(n) = \frac{3600}{1e6} \int_{ama}^{ata} r(t) dt \quad (5.2)$$

La energía solar acumulada a lo largo del día n o de un periodo determinado $SE_v(n)$ correspondiente a una vivienda v , será usada como el principal indicador de su desempeño solar $DS_v(n)$ al compararla con la energía $SE_0(n)$ recibida por la vivienda que se use como referencia, mediante:

$$DS_n = 1 - \frac{SE_v}{SE_0} \quad (5.3)$$

La expresión anterior del desempeño vale cero para la vivienda de referencia y podría ser

negativa para el caso de una vivienda que reciba más energía que ella durante el periodo considerado.

En resumen, la radiación instantánea sobre la envolvente equivale a la radiación ponderada sobre todas sus superficies en función de la proporción que representa el área de cada una respecto al área total de la envolvente (expresión 5.1). La energía solar acumulada sobre la vivienda a lo largo del día o de un periodo determinado (expresión 5.2), se usa para comparar su desempeño con otra que se tome de referencia. Si el diseño de la vivienda de referencia es malo desde este punto de vista, el desempeño de cualquier otra que lo mejorase debería estar entre cero y uno (este último valor sólo se presentaría para el caso de una vivienda a la que no le de el sol). Las viviendas que no mejoren a la de referencia tendrán un desempeño negativo (expresión 5.3).

§ 5.2. Energía Solar sobre una Vivienda de Planta Rectangular

A continuación se revisa el desempeño solar de una vivienda de planta rectangular de 12 x 6 m² con diferentes tipos de techos. Las dimensiones son arbitrarias, sólo se pretende que en los cálculos se pongan de manifiesto las variaciones debidas a los cambios de orientación de la vivienda. Cada techo es afectado de manera distinta en función de su geometría como ya se vio en el capítulo anterior, así como las paredes de la fachada, que en este caso se diferenciarán tanto por su orientación como por la exposición de áreas diferentes a la radiación solar.

Techo Horizontal

En la gráfica de la radiación recibida por la envolvente de una vivienda a través de la expresión 5.1, se representa también la radiación recibida por las paredes y el techo por separado, con el objeto de analizar su contribución individual. En el desglose se usa la misma expresión 5.1 para realizar cualquier cálculo parcial. La radiación solar instantánea recibida por el techo, es considerablemente mayor que la recibida por las paredes laterales de la fachada, como se muestra en el ejemplo correspondiente al solsticio de invierno a la latitud 24°N, para una vivienda con la fachada de mayor superficie orientada hacia el Sur (Fig. 5.1).

Para mejor comprensión de este tipo de gráfica, se ilustra el desempeño solar de la envolvente de una construcción cuando hay diferencias notables entre las dimensiones de las paredes y el techo, como en el caso de una torre, en la que el área de las fachadas es mucho mayor que la del techo, por lo que el desempeño de la envolvente se asemeja más al de aquellas. Análogamente, cuando el área del techo es mucho mayor que la de las fachadas, como en las naves industriales y almacenes; el desempeño de la envolvente es más cercano al del techo (Fig. 5.2). Para todos los casos que se analicen, este comportamiento es generalizable, es decir, la energía solar sobre la envolvente será más similar a la de las fachadas o a la del techo, en la medida que respectivamente predomine el área de las primeras o la del techo.

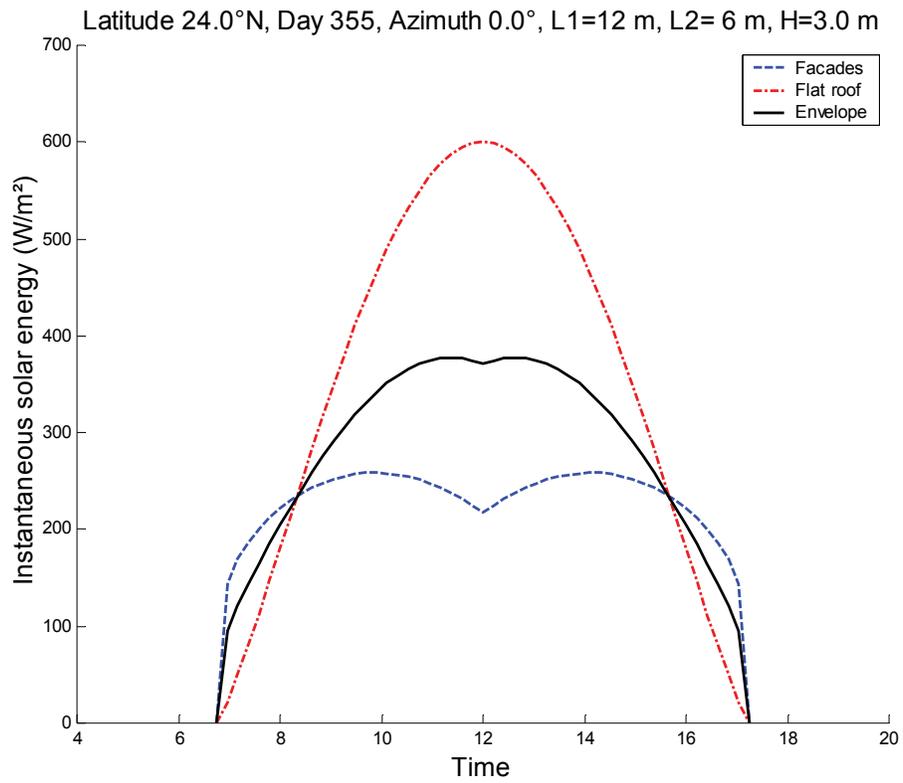


Figura 5.1. Radiación solar instantánea directa sobre la envolvente de una vivienda, considerando las contribuciones de la radiación sobre el techo y de las fachadas en función de las áreas de cada una.

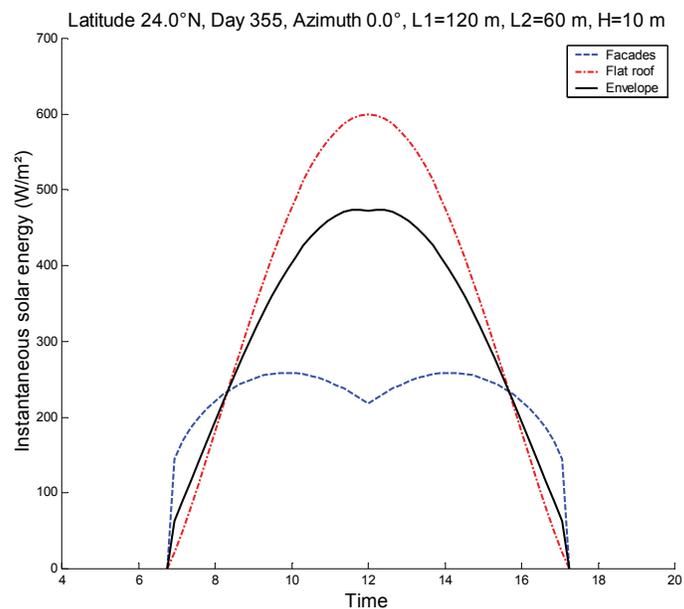
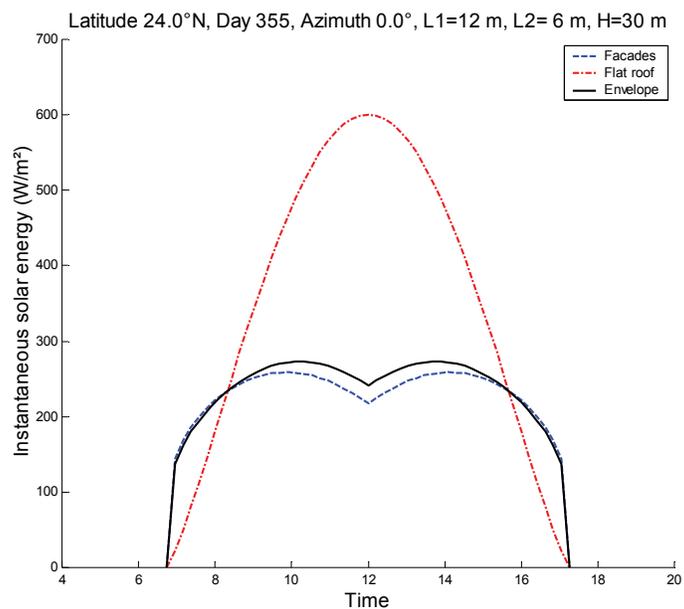


Figura 5.2. Radiación solar instantánea directa sobre la envolvente de una construcción, considerando las contribuciones de la radiación sobre el techo y de las fachadas en función de las áreas de cada una. En la gráfica superior se representa la radiación en una torre y en la inferior una nave en la que la planta es muy grande comparada con la altura de las paredes.

Las mejoras obtenidas al modificar la orientación y la altura del techo de una vivienda se muestran en la Tabla 5.1 para los solsticios y los equinoccios. El caso 1 se usa como referencia para calcular la expresión 5.3 en porcentaje para cada modificación. Al girar la vivienda 90° (caso2), el mayor beneficio se obtiene durante el solsticio de verano, que representa el día con mayor intensidad de la radiación en términos de la duración del día solar. El valor negativo obtenido durante el solsticio de invierno significa que la vivienda recibe una cantidad mayor de energía solar, efecto que no necesariamente es malo para esa época del año. Con ese resultado se puede concluir de manera general que cuando se orienta la fachada de mayor superficie hacia el Sur se obtiene una mejora considerable en su desempeño solar durante la primavera y el verano, a cambio de recibir más energía solar durante el invierno.

La mejora anterior conseguida con el cambio de orientación es mayor que la que se obtiene al aumentar la altura del techo solamente (caso 3, Tabla 5.1), ya que la máxima mejora con un techo de 4 m ocurre durante el solsticio de verano de casi 8% respecto al techo de 3 m de altura.

Aplicando las dos modificaciones simultáneamente, cambio de orientación y aumento de la altura del techo de 3 a 4 m, la mejora es notable durante el solsticio de verano (Tabla 5.1, caso 4). La mejora entre el 15 y el de 20% lograda entre la primavera y el verano, representa una contribución importante al confort de la vivienda y un ahorro considerable en la energía y en el costo usados para enfriarla.

Tabla 5.1. Desempeño solar en (MJ/m²) de la envolvente de una vivienda de 12x6 m² con techo horizontal en una latitud de 24°N y mejora en porcentaje respecto al caso 1. El azimut ψ se refiere a la orientación de la fachada de 12 m.					
			Día del año		
Caso	H	ψ	172	264	355
1	3	90°	10.44	9.89	10.19
2	3	0°	9.26	9.11	10.62
Mejora (%)			11.30	7.89	-4.22
3	4	90°	9.65	9.26	9.81
Mejora (%)			7.57	6.37	3.73
4	4	0	8.34	8.39	10.29
Mejora (%)			20.11	15.17	-1

Techo Inclinado

A diferencia del techo horizontal, este tipo de techo es sensible a la orientación y añade área a las paredes laterales y trasera de la vivienda, dependiendo de su altura respecto a las mismas. Esto incrementa la energía solar directa que recibe la envolvente y a la vez la distribuye de manera más eficiente. La evolución de la radiación solar a lo largo del día depende de todos los parámetros implicados y ya no se presentan situaciones simétricas como con los techos horizontales. En el ejemplo de la Figura 5.3, se muestra cómo la radiación instantánea sobre la envolvente es sensible a la exposición de las diferentes superficies a la insolación al orientar la vivienda (y el techo, ver Figura 4.1) hacia el Este. El máximo de la radiación sobre el techo ocurre antes del mediodía, y la radiación sobre las fachadas o paredes exteriores es mayor en la tarde que durante la mañana. El efecto combinado mostrado en la curva de la radiación sobre la envolvente, indica que la radiación es mayor durante la mañana debido a que predomina el efecto de la radiación en el techo sobre el de las fachadas (Fig. 5.3, curva continua).

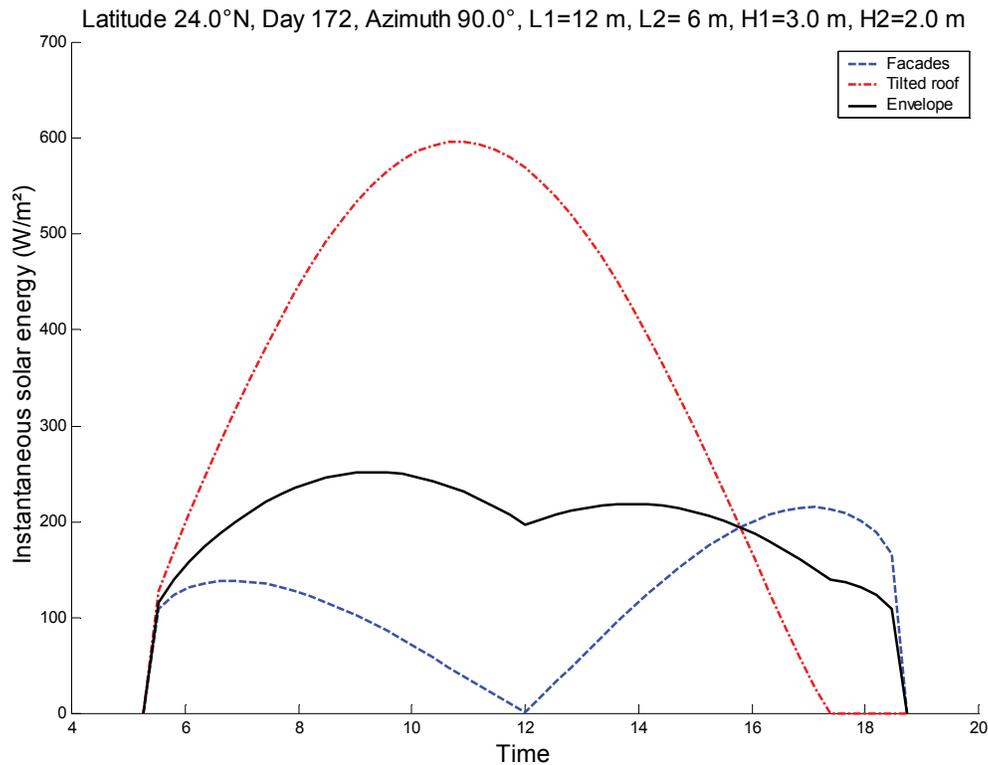


Figura 5.3. Radiación solar instantánea directa sobre la envolvente de una vivienda con techo inclinado, considerando las contribuciones de la radiación sobre el techo y de las fachadas en función de las áreas de cada una. L1 es la longitud de la fachada de referencia para definir el azimut del techo, L2 es la longitud de las fachadas perpendiculares a la anterior, H1 es la altura de las paredes y H2 la del techo sobre las paredes.

En la Tabla 5.2 se muestran los valores de energía solar sobre la envolvente de la vivienda para 30 combinaciones de los parámetros de construcción, durante los solsticios y un equinoccio, donde se aprecia que en función de la consideración del investigador, se pueden adoptar diferentes diseños, ya que las situaciones en las que se obtienen los mínimos no coinciden para esos tres días.

Para el solsticio de verano, considerado como el día crítico de la temporada de calor, el mínimo se obtiene cuando la fachada principal es mayor y está orientada hacia el Sur, con los valores más grandes de las alturas de las paredes y del techo (caso 11). De hecho, cuando la fachada principal es mayor, siempre se obtiene la mínima energía solar en tal orientación (casos 1-15); por el contrario, cuando las fachadas laterales son mayores que la principal, la energía mínima ocurre con azimut de 90° , es decir orientando la vivienda hacia el Este, o equivalentemente hacia el Oeste (casos 16-30).

El incremento de la altura del techo no necesariamente mejora el desempeño solar de la vivienda, como se muestra en la Tabla 5.24, en el solsticio de invierno, al pasar del caso 6 al 11 y del 21 al 26, debido a una mayor exposición de la superficie del techo al sol. En el resto de combinaciones, siempre se obtiene una menor energía solar incidente sobre la envolvente al incrementar la altura de las paredes o del techo.

Durante el solsticio de verano es posible alcanzar casi un 28% de mejora al pasar de la peor condición (caso 20) a la mejor (caso 11). Análogamente, durante los equinoccios ocurre que al pasar del caso 16 al caso 15 se obtiene una mejora de más del 25%; durante el solsticio de invierno al pasar de las condiciones del caso 1 a las del caso 15 mejora el desempeño solar de la vivienda casi en un 23%, por un efecto claro de la declinación solar sobre el techo orientado hacia el Sur.

Cuando la fachada principal debe ser mayor según el diseño arquitectónico, no existe una orientación que funcione simultáneamente para la primavera y el verano, ya que en tal situación no coinciden las orientaciones en las que se recibe la mínima radiación durante los días 172 y 264, pues para el primero de ellos es hacia Sur y para el otro hacia el Norte (casos 1-15).

Sin embargo, en el caso de que el diseño arquitectónico obligue a que la fachada principal sea menor que las laterales, se recomienda la orientación este-oeste de la vivienda, para lograr los valores mínimos de energía solar durante la primavera y el verano, gracias a la simetría de la radiación en tales estaciones del año (casos 18, 23 y 28; días 172 y 264).

Tabla 5.2. Energía solar diaria (MJ/m²) sobre la envolvente de una vivienda de planta rectangular de 12x6 m² con techo inclinado, durante los solsticios y los equinoccios, a una latitud de 24°N.

Caso	Parámetros de construcción					Día del año		
	L1 (m)	L2 (m)	H1 (m)	H2 (m)	ψ	172	264	355
1	12	6	3	2	0°	8.02	8.62	11.12
2	12	6	3	2	45°	9.24	9.17	10.08
3	12	6	3	2	90°	9.57	9.19	9.74
4	12	6	3	2	135°	9.44	8.64	8.78
5	12	6	3	2	180°	8.39	7.86	9.14
6	12	6	4	2	0°	7.42	8.09	10.77
7	12	6	4	2	45°	8.70	8.69	9.71
8	12	6	4	2	90°	9.03	8.75	9.48
9	12	6	4	2	135°	8.88	8.23	8.59
10	12	6	4	2	180°	7.74	7.43	9.07
11	12	6	4	3	0°	7.01	7.89	10.86
12	12	6	4	3	45°	8.39	8.50	9.70
13	12	6	4	3	90°	8.77	8.55	9.34
14	12	6	4	3	135°	8.58	7.90	8.27
15	12	6	4	3	180°	7.43	6.99	8.58
16	6	12	3	2	0°	9.51	9.41	10.28
17	6	12	3	2	45°	9.36	9.12	9.84
18	6	12	3	2	90°	8.32	8.37	10.26
19	6	12	3	2	135°	9.49	8.85	9.14
20	6	12	3	2	180°	9.71	9.02	9.26
21	6	12	4	2	0°	8.97	8.94	9.94
22	6	12	4	2	45°	8.81	8.64	9.50
23	6	12	4	2	90°	7.67	7.86	10.03
24	6	12	4	2	135°	8.91	8.41	8.90
25	6	12	4	2	180°	9.14	8.61	9.06
26	6	12	4	3	0°	8.69	8.79	9.97
27	6	12	4	3	45°	8.54	8.48	9.47
28	6	12	4	3	90°	7.40	7.65	9.92
29	6	12	4	3	135°	8.67	8.16	8.66
30	6	12	4	3	180°	8.91	8.32	8.75

L1 = Longitud de la fachada principal y la trasera; L2 = Longitud de las fachadas laterales; H1 = altura de las paredes; H2 = altura del techo respecto al borde superior de las paredes; ψ = azimut del techo y de la fachada principal.

Techo de Dos Aguas

Este tipo de techo presenta más posibilidades de controlar el desempeño solar de la vivienda que los anteriores, con dos superficies con orientaciones suplementarias, que incluso pueden tener áreas diferentes (dependiendo del valor de x , según la parametrización de la Fig. 4.7).

Con este tipo de techo se añade un área triangular a las fachas principal y trasera, que bien orientado puede contribuir a la mejor distribución de la energía sobre las fachadas y sobre la envolvente de la vivienda, o por el contrario, convertirse en colector más de energía solar.

En la Figura 5.4 se muestra un ejemplo de la radiación solar directa sobre la envolvente de la vivienda a lo largo del día, separando la radiación sobre las paredes exteriores o fachadas y sobre el techo. Se usó un techo de dos aguas asimétrico con azimut de 45° (orientación sureste) y una altura exagerada de 5 m, para hacer evidentes los comportamientos diferenciales de los elementos mencionados entre la mañana y la tarde.

En tal ejemplo, la radiación sobre la envolvente de la vivienda es mayor durante la mañana a causa de un predominio de la radiación en las fachadas sobre la radiación en el techo. En tal orientación y dado que la fachada principal es mayor, su orientación hacia el sureste provoca una mayor incidencia solar, a diferencia del techo, que a esas horas recibe menos radiación que durante la tarde, pues es entonces cuando expone una mayor superficie a la radiación, la que tiene orientación suroeste. La otra superficie recibe poca radiación en el día gracias a su orientación noreste. La integral de la radiación de la envolvente (línea negra) proporciona el valor de la energía solar largo del día de 8.8 MJ/m^2 . Tales valores de energía se usarán como en los casos anteriores para medir y comparar el desempeño solar de la vivienda al modificar los parámetros de construcción.

El diseño arquitectónico permite construir el techo de dos aguas a lo largo o a lo ancho de la vivienda, dependiendo de las dimensiones de la fachada principal y de su orientación. Considerando una vivienda con una planta rectangular de superficie $12 \times 6 \text{ m}^2$, donde la fachada principal (la que tiene el mismo azimut del techo, conforme a la parametrización de la vivienda de la Figura 4.7) puede medir 12 o 6 metros, tendremos diferentes casos, para un techo simétrico, combinando los parámetros anteriores con la orientación del techo y la altura, tanto de las paredes como del techo. Se revisan los efectos del cambio de orientación sobre la energía recibida por la envolvente para 0° , 45° y 90° . No es necesario verificar las orientaciones de 135° y 180° , ya que los resultados coinciden con los de 45° y 0° respectivamente.

A diferencia del techo inclinado, el techo de dos aguas simétrico presenta un comportamiento completamente regular (Tabla 5.3). En todos los casos mejora el desempeño solar al aumentar las alturas, ya sea de las paredes, del techo o ambas. Además; si el diseño requiere que la fachada principal sea mayor que las laterales (casos 1-12), con una orientación hacia el Sur (azimut 0°) se obtienen los valores mínimos de radiación durante el solsticio de verano y los equinoccios, con la particularidad de que en el solsticio de invierno la energía es máxima en dicha orientación, efecto que pudiera ser deseable en las altas latitudes o en algunas zonas áridas, donde hay mayores diferencias entre las estaciones cálidas y las templadas. Por el contrario, si el diseño precisa que la fachada principal sea menor que las laterales (casos 13-24), entonces se recomienda una orientación hacia el Este (azimut 90°), con la que se obtienen de nuevo los mismos efectos: energía mínima durante el solsticio de verano y los equinoccios, y máxima

durante el solsticio de invierno.

La orientación de 45° sólo proporciona valores mínimos de energía durante el solsticio de invierno, situación que no es posible combinar con la expuesta en el párrafo anterior.

Debido a las simetrías de la radiación solar alrededor de los solsticios que se han expuesto en los capítulos anteriores, el promedio de la energía durante los días 172 y 264 corresponde al promedio de la energía solar recibida por la envolvente entre la primavera y el verano, es decir, sin conocer explícitamente la curva, corresponde a la integral de la curva dividida entre el número de días del periodo.

Por ejemplo, con los datos del caso 1 de la Tabla 5.3 se obtiene un valor promedio por día de 8.75 MJ/m^2 representativo de esas dos estaciones del año. Con este tipo de cálculos, se pueden evaluar los efectos de usar la orientación correcta, en lugar de la más mala, en cada combinación del resto de los parámetros arquitectónicos (analizando cada bloque de tres renglones). De esa manera se obtienen mejoras en el desempeño solar durante la primavera y el verano, que van desde el 8.9% (casos 13-15), hasta el 15% (casos 10-12).

Al considerar los valores extremos de la Tabla 5.3 para cada día, durante el solsticio de verano se puede mejorar el desempeño solar en un 25% y en los equinoccios un 19%, en ambos casos al pasar de a peor situación (caso 3) a la mejor (caso 10).

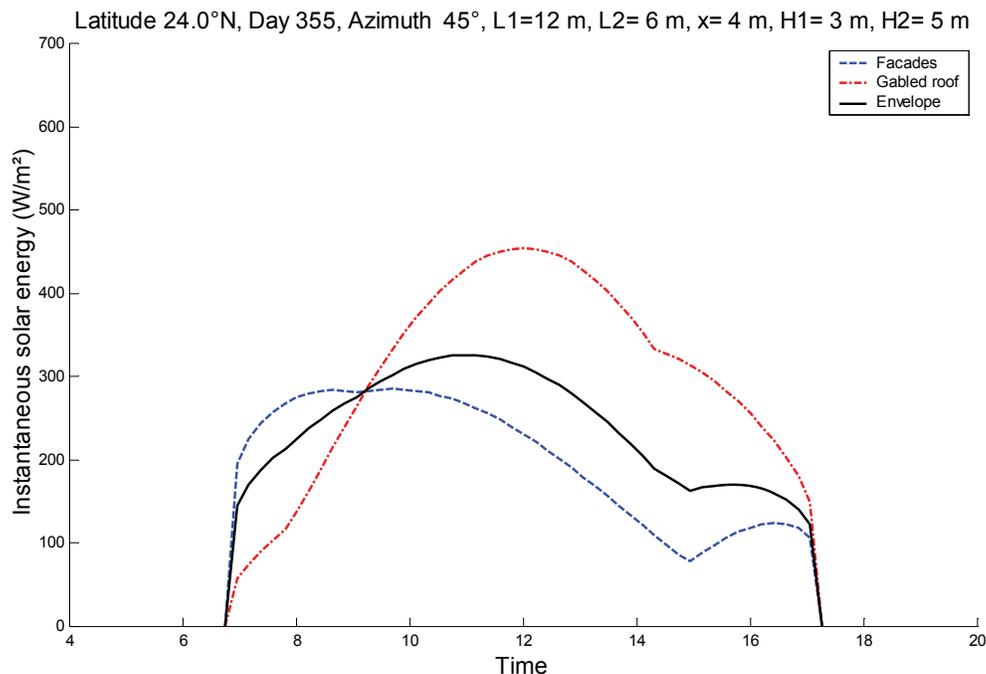


Figura 5.4. Radiación solar instantánea directa sobre la envolvente de una vivienda con un techo de dos aguas, considerando las contribuciones de la radiación sobre el techo y de las fachadas en función de las áreas de cada una. $L1$ es la longitud de las fachadas principal y trasera, $L2$ es la longitud de las fachadas laterales, $H1$ es la altura de las paredes y $H2$ la del techo sobre las paredes. El parámetro x es la distancia de la costilla a la fachada lateral izquierda, medida horizontalmente (Fig. 4.7).

Tabla 5.3. Energía solar diaria (MJ/m²) sobre la envolvente de una vivienda de planta rectangular de 12x6 m² con techo de dos aguas simétrico, durante los solsticios y los equinoccios, a una latitud de 24°N.

Caso	Parámetros de construcción					Día del año		
	L1 (m)	L2 (m)	H1 (m)	H2 (m)	ψ	172	264	355
1	12	6	3	1	0°	8.76	8.73	10.51
2	12	6	3	1	45°	9.92	9.39	9.75
3	12	6	3	1	90°	10.21	9.68	9.96
4	12	6	3	2	0°	8.31	8.39	10.39
5	12	6	3	2	45°	9.56	9.09	9.54
6	12	6	3	2	90°	9.94	9.41	9.68
7	12	6	4	1	0°	7.98	8.12	10.21
8	12	6	4	1	45°	9.22	8.82	9.39
9	12	6	4	1	90°	9.51	9.12	9.63
10	12	6	4	2	0°	7.64	7.86	10.13
11	12	6	4	2	45°	8.95	8.60	9.24
12	12	6	4	2	90°	9.32	8.93	9.42
13	6	12	3	1	0°	10.05	9.59	10.08
14	6	12	3	1	45°	9.95	9.40	9.74
15	6	12	3	1	90°	9.03	8.87	10.33
16	6	12	3	2	0°	9.62	9.27	9.91
17	6	12	3	2	45°	9.48	8.99	9.49
18	6	12	3	2	90°	8.57	8.37	9.88
19	6	12	4	1	0°	9.36	9.04	9.73
20	6	12	4	1	45°	9.23	8.82	9.38
21	6	12	4	1	90°	8.19	8.22	10.05
22	6	12	4	2	0°	9.04	8.80	9.61
23	6	12	4	2	45°	8.88	8.51	9.19
24	6	12	4	2	90°	7.86	7.84	9.69

L1 = Longitud de la fachada principal y la trasera; L2 = Longitud de las fachadas laterales; H1 = altura de las paredes; H2 = altura del techo respecto al borde superior de las paredes; ψ = azimut del techo y de la fachada principal. En todos los casos x=L1/2 para que el techo sea simétrico.

Techo de Cuatro Aguas

La radiación solar directa sobre este tipo de techo, depende de más factores que los anteriores, pues no sólo se tienen más planos expuestos al soleamiento, sino que se pueden plantear múltiples situaciones variando los valores de los parámetros x & y de los que depende de la simetría del techo. Esta situación se ejemplifica para una vivienda con azimut de 45° , que define la orientación de la fachada más larga, y un techo de dos metros de altura asimétrico a causa del valor del parámetro y (Fig. 5.5).

Las contribuciones individuales de las fachadas sobre la envolvente de las paredes, así como de cada uno de los planos sobre la envolvente del techo, resultan en formas irregulares en las curvas correspondientes (Fig. 5.5, líneas discontinuas), que a su vez determinan la forma de la curva de radiación sobre envolvente de la vivienda (línea continua), que es la que se integra para calcular la energía solar debida a la radiación directa correspondiente al día.

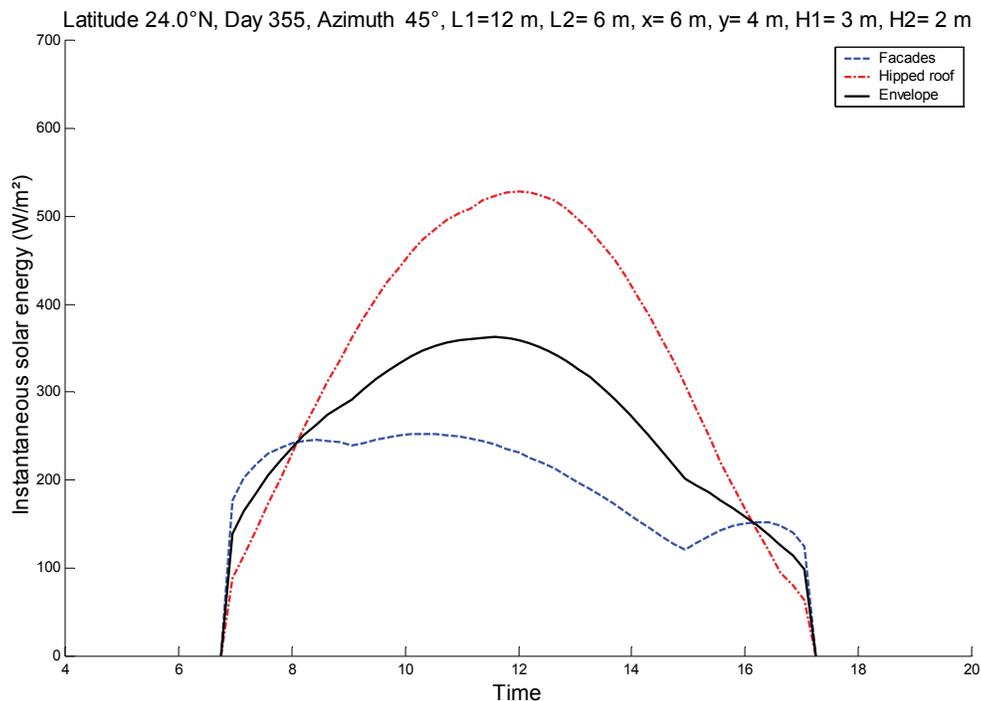


Figura 5.5. Radiación solar instantánea directa sobre la envolvente de una vivienda con techo de cuatro aguas, considerando las contribuciones de la radiación sobre el techo y de las fachadas en función de las áreas de cada una. $L1$ es la longitud de las fachadas principal y trasera, $L2$ es la longitud de las fachadas laterales, $H1$ es la altura de las paredes y $H2$ la del techo sobre las paredes. Con los parámetros x & y se localiza la proyección de la cúspide del techo (Fig. 4.10) y de ellos depende su simetría.

Para el caso del techo de cuatro aguas simétrico con planta rectangular, por simetría sólo es necesario probar con los valores de azimut entre 0° y 90° , con una verificación intermedia a 45° (Tabla 5.4). Par las diferentes alturas ensayadas, tanto de las paredes como del techo, en todos los casos la orientación de esta vivienda con la que se obtuvo la menor energía solar sobre la envolvente fue hacia el Sur para el solsticio de invierno y el equinoccio. Los valores máximos correspondientes a esos días fueron con azimut 90° .

La energía solar sobre la envolvente disminuyó al incrementar las alturas, ya sea de las paredes, del techo o de ambas. Al comparar la mejor opción (Tabla 5.4, caso 10) con la peor (caso 3), es decir la vivienda bien orientada (hacia el Sur) con las alturas incrementadas, con la que se orienta hacia el Este sin aumentar las alturas, se obtienen considerables disminuciones de energía sobre la envolvente de 22% y 17.5% los días 172 y 264 respectivamente.

Tabla 5.4. Energía solar diaria (MJ/m^2) sobre la envolvente de una vivienda de planta rectangular de $12 \times 6 \text{ m}^2$ con techo de cuatro aguas simétrico, durante los solsticios y los equinoccios, a una latitud de 24°N .

Caso	Parámetros de construcción					Día del año		
	L1 (m)	L2 (m)	H1 (m)	H2 (m)	ψ	172	264	355
1	12	6	3	1	0°	9.15	9.00	10.51
2	12	6	3	1	45°	10.16	9.58	9.86
3	12	6	3	1	90°	10.35	9.81	10.12
4	12	6	3	2	0°	8.89	8.72	10.28
5	12	6	3	2	45°	9.91	9.35	9.71
6	12	6	3	2	90°	10.16	9.65	9.98
7	12	6	4	1	0°	8.26	8.31	10.20
8	12	6	4	1	45°	9.38	8.95	9.46
9	12	6	4	1	90°	9.59	9.20	9.76
10	12	6	4	2	0°	8.07	8.09	10.01
11	12	6	4	2	45°	9.20	8.78	9.35
12	12	6	4	2	90°	9.45	9.08	9.65

L1 = Longitud de la fachada principal y la trasera; L2 = Longitud de las fachadas laterales; H1 = altura de las paredes; H2 = altura del techo respecto al borde superior de las paredes; ψ = azimut de la fachada principal. En todos los casos $x=L1/2$ & $y=L2/2$ para que el techo sea simétrico.

Bóveda de Cañón

La radiación solar directa instantánea se ejemplifica de nuevo con un azimut de 45° , para hacer más claros los efectos de las radiaciones diferenciales sobre las diferentes superficies, principalmente sobre las paredes de las fachadas. El patrón de radiación sobre la bóveda es más regular, ligeramente cargada hacia la derecha, esto es, con máximo que ocurre después del mediodía (Fig. 5.6).

La integral de la curva de radiación sobre la envolvente proporciona los valores de energía solar correspondientes a cada día. Para este tipo de planta rectangular se presentan los cálculos sólo para el caso en el que la bóveda se construye a lo largo de la vivienda, es decir con azimut de la bóveda coincidente con la fachada más corta, según la parametrización de la Figura 4.12 (Tabla 5.5), ya que el caso de la bóveda con el "cañón" construido hacia las fachadas más largas no parece ser una práctica arquitectónica para viviendas, pues genera un techo exageradamente alto: para las medidas que se han usado en los ejemplos, la bóveda tendría una altura de 6 m, que se añadiría a la de las paredes.

La mejor orientación de la bóveda fue hacia el Este (azimut 90°), que mejoró ligeramente al aumentar la altura de las paredes de la fachada. El cambio de orientación de la bóveda respecto a la peor opción (azimut 0°) produjo mejoras para el solsticio de verano y el equinoccio de 13.5 y 12.7% respectivamente para la altura de las paredes de 3 m (Tabla 5.5, casos 1 y 3), y de 15.2 y 13.4% para las paredes de 4 m (casos 4 y 6).

La mejor opción contra la peor, esto es, si respecto al caso 1, simultáneamente se cambia la orientación de la vivienda de 0° a 90° y se aumenta 1 m la altura de las paredes (caso 6), se produce una mejora de 19.1 y 16.8% durante el solsticio de verano y el equinoccio respectivamente.

Tabla 5.5. Energía solar diaria (MJ/m^2) sobre la envolvente de una vivienda de planta rectangular con una bóveda de cañón de 3 m de radio y 12 m de largo, con un techo de 3 y 4 m de altura (H), durante los solsticios y los equinoccios, a una latitud de 24°N .

Caso	H	ψ	Día del año		
			172	264	355
1	3	0°	8.97	8.77	9.66
2	3	45°	8.78	8.47	9.25
3	3	90°	7.76	7.66	9.97
4	4	0°	8.56	8.43	9.44
5	4	45°	8.36	8.13	9.03
6	4	90°	7.26	7.30	9.80

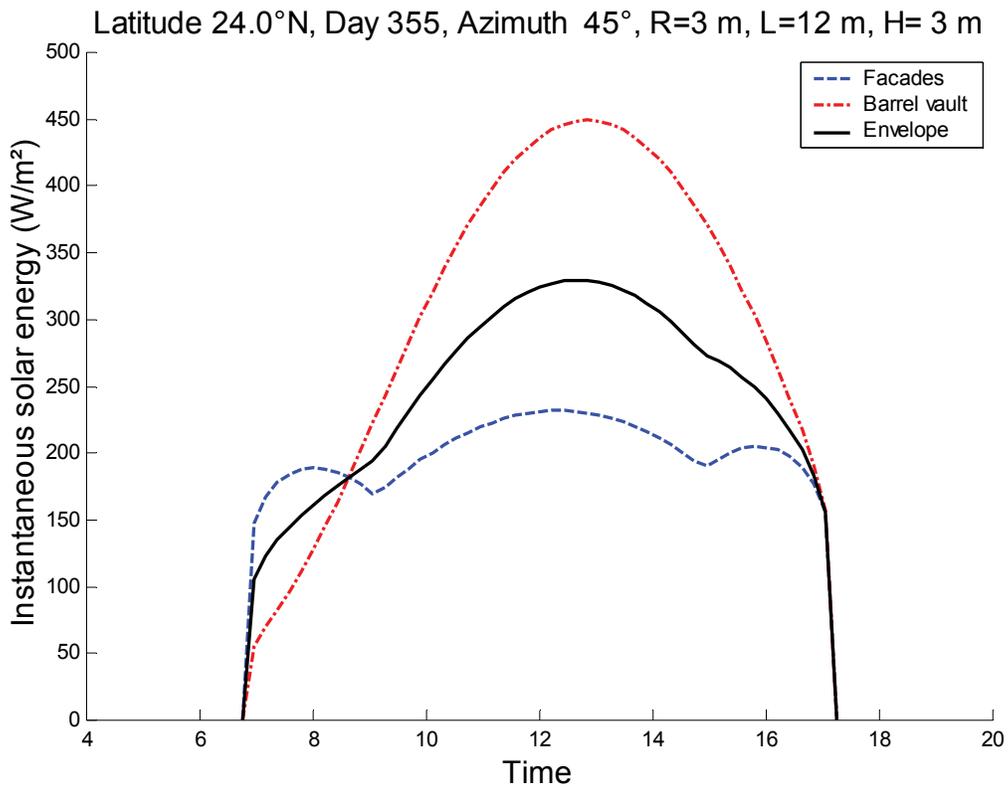


Figura 5.6. Radiación solar instantánea directa sobre la envolvente de una vivienda techada con una bóveda de cañón, considerando las contribuciones de la radiación sobre el techo y de las fachadas en función de las áreas de cada una. R es el radio de la bóveda, L es la longitud de las fachadas laterales y H es la altura de las paredes.

Comparación de Desempeños Solares

La comparación entre diferentes viviendas en función de su desempeño solar se dificulta a causa de que dependiendo del tipo de techo que se emplee, sus geometrías no siempre son comparables. La metodología desarrollada aquí siempre permite comparar el desempeño solar de dos viviendas y se puede saber con precisión cual de ellas recibe mayor energía del sol por unidad de superficie de su envolvente, pero eso no significa que sean estrictamente comparables en términos arquitectónicos. Con esa salvedad, a continuación se presentan comparaciones entre viviendas con planta rectangular con diferentes tipos de techos, bajo tres criterios: (1) que la altura máxima de la vivienda sea la misma; (2) que las dimensiones del techo sean de las más comunes dentro de la práctica arquitectónica; y (3) que la orientación de la vivienda sea fija.

Alturas Iguales

En la Tabla 5.6 se muestran para tres alturas de vivienda las mejores combinaciones de los parámetros de cada geometría en términos de su desempeño solar, es decir las que según los resultados de las secciones anteriores, proporcionan la menor energía solar sobre la envolvente durante el solsticio de verano y los equinoccios, situación que equivale en promedio al desempeño solar durante la primavera y el verano, como ya se argumentó antes.

En las tres alturas consideradas, el techo horizontal resultó ser la mejor opción, aunque el diseño resulte exagerado. En efecto, una vivienda con techo horizontal de 6 m de alto, no parece comparable arquitectónicamente con una con un techo de dos aguas de 2 m de alto y paredes 4 m de altura (casos 9 y 11), pues la primera parece más una casa de dos pisos y la segunda no. En todos los bloques, la vivienda con un techo de cuatro aguas fue la que tuvo el peor desempeño solar (casos 4, 8 y 12)

La bóveda de cañón (de 3 m de radio) sólo se consideró para una vivienda de 6 m de altura, pues por su geometría es la única opción que se puede manejar en una planta de 12x6 m². Poner el arco de una bóveda sobre la fachada de 12 m, implicaría que el radio y por ende la altura del techo sobre las paredes sería de 6 m, medida poco común para una vivienda, como ya se dijo en la sección correspondiente a la bóveda. Esta vivienda fue la única que tuvo un mejor desempeño solar con un azimut diferente de 0°, pues para este caso la mejor opción fue para una orientación de 90° (dirección este-oeste). Después del techo horizontal de 6 m de alto (caso 9), la mejor opción para una vivienda de estas dimensiones (planta rectangular de 12x6 m² y altura 6 m) durante la primavera y el verano es la bóveda de cañón de 3 m de radio (caso 13), aunque particularmente el desempeño del techo inclinado fue mejor el día 172 (caso10).

Las viviendas que sí se pueden comparar razonablemente para cualquier altura de vivienda, son las que tienen techo inclinado, la de dos y la de cuatro aguas. En promedio el techo con mejor desempeño solar fue el de dos aguas, aunque las diferencias con el techo inclinado fueron prácticamente despreciables, incluso coinciden en promedio para una vivienda 4 m de altura (casos 2 y 3).

En los casos de las viviendas de 5 y 6 m de altura, algunos diseños arquitectónicos permitieron comparar dos combinaciones de altura de las paredes y del techo. Por ejemplo, para las viviendas de 5 m de altura se compararon las combinaciones: 3 y 2 m, y de 4 y 1 m, respectivamente, y sólo aparece en la tabla la que resultó mejor. En todos esos casos la combinación de 4 y 1 m fue la mejor, es decir, mejora más el desempeño solar incrementar 1 m la altura de las paredes, que incrementar 1 m la altura del techo.

Análogamente se comprobó lo mismo para las viviendas de 6 m de altura, con las combinaciones de 3 y 3 m, y de 4 y 2 m de altura de las paredes y del techo respectivamente. En la Tabla 5.6, esto se verificó previamente para los techos: inclinado, de dos aguas y de cuatro aguas (casos 6-8 y casos 10-12).

La mejora en promedio durante la primavera y el verano al usar la mejor opción de techo en lugar de la peor, en cada caso de altura de la vivienda (bloque de la tabla) fue de 7.82% (para 4 m), 6.04% (para 5 m) y 9.03% (6 m). Si no se considera el techo horizontal como la mejor opción, entonces los porcentajes de mejora son: 3.64% (para 4 m, entre el T2 y el T4), 2.84% (para 5 m, entre el T2 y el T4) y 4.58% (para 6m, entre la BC y el T4). Estos precarios resultados indican que manteniendo fija la altura de la vivienda, el tipo de techo que se emplee no mejora sustantivamente el desempeño solar, siempre y cuando cada uno se use con la orientación adecuada y con la combinación óptima de sus parámetros de construcción, tal como se hizo en esta comparación (Tabla 5.6).

Tabla 5.6. Energía solar diaria (MJ/m²) sobre la envolvente de una vivienda de planta rectangular de 12x6 m² con los parámetros óptimos para el solsticio de verano y el equinoccio en promedio, a una latitud de 24°N, de los diferentes tipos de techo: horizontal (TH), inclinado (TI), de dos aguas (T2), de cuatro aguas (T4) y bóveda de cañón (BC). Se presentan los resultados por bloques conforme a la altura máxima de la vivienda (H1+H2: 4, 5 y 6 m).

Caso	Techo	Parámetros de construcción					Día del año	
		L1 (m)	L2 (m)	H1 (m)	H2 (m)	ψ	172	264
1	TH	12	6	4	0	0°	8.34	8.39
2	TI	12	6	3	1	0°	8.61	8.88
3	T2	12	6	3	1	0°	8.76	8.73
4	T4	12	6	3	1	0°	9.15	9.00
5	TH	12	6	5	0	0°	7.69	7.88
6	TI	12	6	4	1	0°	7.87	8.26
7	T2	12	6	4	1	0°	7.98	8.12
8	T4	12	6	4	1	0°	8.26	8.31
9	TH	12	6	6	0	0°	7.20	7.50
10	TI	12	6	4	2	0°	7.42	8.09
11	T2	12	6	4	2	0°	7.64	7.86
12	T4	12	6	4	2	0°	8.07	8.09
13	BC	6	12	3	3	90°	7.76	7.66

L1 = Longitud de la fachada principal y la trasera; L2 = Longitud de las fachadas laterales; H1 = altura de las paredes; H2 = altura del techo respecto al borde superior de las paredes; ψ = azimut de la fachada principal.

Medidas Comunes

Si consideramos las medidas más comunes para cada tipo de techo en la construcción de viviendas de planta $12 \times 6 \text{ m}^2$ y 3 m de altura de las paredes, podríamos incluir la vivienda con techo horizontal de 3 m de altura que proporciona valores de energía solar de 9.26 y 9.11 MJ/m² para los días 172 y 264 respectivamente. Esta opción se puede comparar entonces con los casos 2, 3, 4 y 13 de la Tabla 5.6, correspondientes a techos de 1 m de altura. El promedio de los valores de energía solar sobre la vivienda con techo horizontal (9.19 MJ/m²), que es la más simple de las viviendas con estas dimensiones, es apenas superior al de la vivienda de cuatro aguas (9.08 MJ/m²) y sólo se mejora en menos del 5% si se usan los techos inclinado o de dos aguas.

Sin embargo, el desempeño solar de un techo horizontal de 3 m de altura es mejorado 16% al usar la bóveda de cañón de 3 m de radio en su lugar. Evidentemente el costo de construcción de esta última posibilidad es mayor, pero es la única que proporciona un valor considerable de mejora energética, que podría a la larga amortizar la inversión adicional para construirla. En otras palabras, la única opción recomendable desde el punto de vista energético es cambiar el techo horizontal por una bóveda de cañón, ya que cambiarle a una vivienda de estas características un techo horizontal por cualquier otro de 1 m de altura, no representa una mejora considerable en el desempeño solar y sí un incremento en el costo de construcción.

Orientación Fija

Si por razones arquitectónicas la vivienda debiera tener una planta de $12 \times 6 \text{ m}^2$, con la fachada menor orientada hacia el Sur y paredes de 3 m de altura, se comparan energéticamente distintas posibilidades de techumbre (Tabla 5.7). Sólo se muestra en la Tabla la mejor opción de los techos que se pueden orientar de diversas formas en estas condiciones, como es el caso del techo inclinado, que admite cuatro orientaciones, y el techo de dos aguas, que admite dos. De nueva cuenta la bóveda de cañón resulta ser la mejor opción energética en esta situación, y la mejora en el desempeño de la vivienda al usar la bóveda en lugar del techo horizontal, es de casi 13% durante la primavera y el verano. Si la segunda mejor opción (techo inclinado) de cambia por la bóveda, la mejora es de casi 9%. En la Figura 5.7 se muestra la evolución de la radiación solar directa, durante el solsticio de verano, sobre la envolvente de la vivienda con los distintos techos usados.

Tabla 5.7. Energía solar diaria (MJ/m²) sobre la envolvente de una vivienda de planta rectangular de $12 \times 6 \text{ m}^2$, con la fachada de 6 m orientada hacia el Sur, y paredes de 3 m de altura, a una latitud de 24°N, con los parámetros óptimos de los diferentes tipos de techo: horizontal (TH), inclinado (TI), de dos aguas (T2), de cuatro aguas (T4) y bóveda de cañón (BC).

Caso	Techo	ψ	Día del año		
			172	264	Promedio
1	TH	0°	10.44	9.89	10.17
2	TI	180°	10.05	9.42	9.74
3	T2	0°	10.05	9.59	9.82
4	T4	0°	10.35	9.81	10.08
5	BC	0°	8.97	8.77	8.87

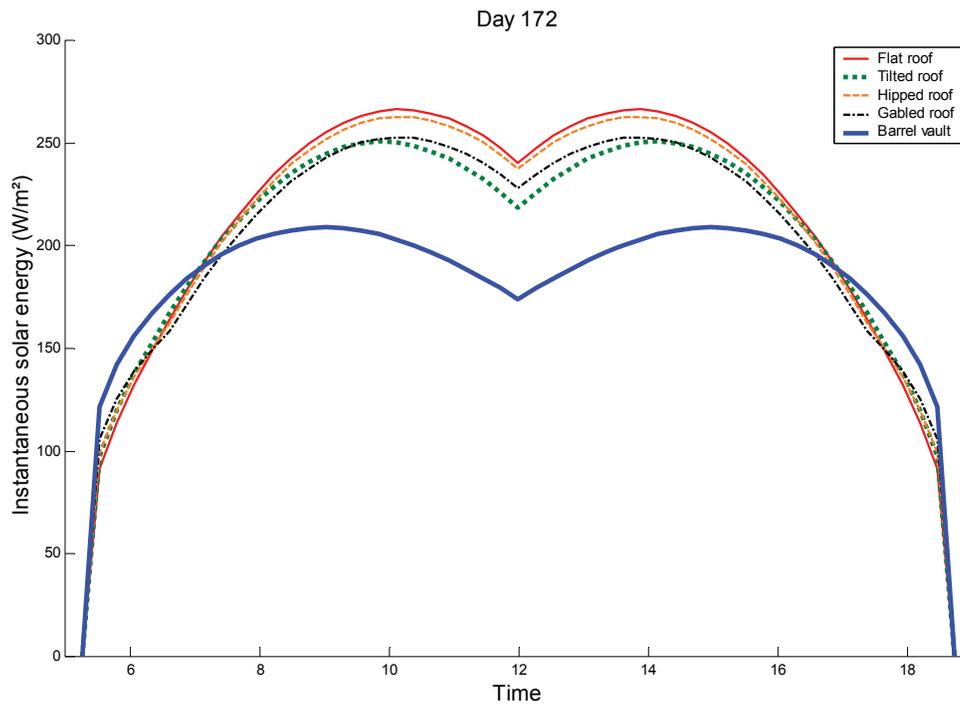


Figura 5.7. Radiación solar instantánea directa sobre la envolvente de una vivienda de planta 12x6 m², con la fachada de 6 m orientada hacia el Sur, paredes de 3 m de altura, con diferentes tipos de techos, durante el solsticio de verano a una latitud de 24°N.

§ 5.2. Energía Solar sobre una Vivienda de Planta Cuadrada

Aunque una vivienda cuadrada es un caso particular de una rectangular, se incluye este análisis por separado, ya que sólo en este caso se podrán usar ciertos tipos de techos como el cónico y la bóveda semiesférica, además de que se cancela el efecto de las áreas desiguales de las paredes de la fachada. De manera arbitraria se usará una vivienda de planta cuadrada de 8 x 8 m², superficie que se asemeja a la de las viviendas de interés social. Para los techos que ya se analizaron en la sección anterior referente a las viviendas de planta rectangular, ya no se mostrarán ejemplos del patrón de radiación solar directa sobre la envolvente a lo largo de un día.

Techo Horizontal

La mejora obtenida por el incremento en la altura del techo sigue un patrón similar que en las viviendas de planta rectangular, mayor durante el solsticio de verano y menor en el de invierno, en todos los casos positivo (Tabla 5.8).

	Día del año		
Altura del techo (m)	172	264	355
3	9.85	9.50	10.41
4	9.00	8.82	10.05
Mejora (%)	8.65	7.16	3.46

Techo Inclinado

La mejor orientación para este tipo de techo sigue siendo hacia el Norte (azimut 180°), ya que es con la que durante el solsticio de verano y el equinoccio la vivienda recibe la menor energía solar en promedio (8.75 MJ/m²) sobre su envolvente, gracias al bajo valor de energía que se logra durante el equinoccio para esa orientación. La mejora en el desempeño solar respecto al resto de orientaciones, va del 1.4% (azimut 90°) al 5.2% (azimut 45°), que son valores poco significativos (Tabla 5.9). Todos los valores anteriores son representativos del periodo que comprende la primavera y el verano en conjunto.

Tabla 5.9. Desempeño solar de la envolvente en (MJ/m²) de una vivienda de planta 8x8 m², con paredes de 3 m de altura y techo inclinado de azimut ψ, durante los solsticios y los equinoccios, a una latitud de 24°N.			
	Día del año		
ψ	172	264	355
0°	8.77	9.02	10.72
45°	9.30	9.15	9.97
90°	8.95	8.78	10.00
135°	9.47	8.75	8.95
180°	9.05	8.44	9.20

Techo de Dos Aguas

La radiación sobre un techo de dos aguas simétrico durante el solsticio de verano y el equinoccio es muy similar para las diferentes orientaciones de la vivienda, aunque la mejor orientación es hacia el Sur, ya que en promedio la vivienda recibe 8.9 MJ/m² por día durante la primavera y el verano. También con este tipo de techo las mejoras logradas al orientarlo correctamente, no llegan al 5%. Por simetría a lo largo de un día solar no se calculó la radiación para más orientaciones; por ejemplo, el valor correspondiente a un azimut de 135°, es el mismo que para 45°, ya que la integral de la radiación incidente sobre uno de ellos antes del mediodía solar, es la misma que sobre el otro para después del medio día solar y viceversa.

Tabla 5.10. Desempeño solar de la envolvente en (MJ/m²) de una vivienda de planta 8x8 m², con paredes de 3 m de altura y techo de dos aguas simétrico de 2m de altura, con azimut ψ, durante los solsticios y los equinoccios, a una latitud de 24°N.			
	Día del año		
ψ	172	264	355
0°	8.97	8.83	10.16
45°	9.54	9.05	9.52
90°	9.28	8.92	9.79

Techo de Cuatro Aguas

La radiación sobre este tipo de techo mejora poco al orientarlo hacia el Sur, ya que en promedio, durante la primavera y el verano se logra disminuir la radiación en menos del 3%, con un azimut de 0° en lugar de 45° . Por simetría no fue necesario calcular la radiación para más orientaciones de la vivienda.

Tabla 5.11. Desempeño solar de la envolvente en (MJ/m²) de una vivienda de planta 8x8 m², con paredes de 3 m de altura y techo de cuatro aguas simétrico de 2m de altura, con azimut ψ, durante los solsticios y los equinoccios, a una latitud de 24°N.			
	Día del año		
ψ	172	264	355
0°	9.54	9.20	10.14
45°	9.93	9.37	9.71

Bóveda de Cañón

Una vivienda con este tipo de techo disminuye considerablemente la energía solar incidente sobre su envolvente, con valores óptimos en promedio con orientación hacia el Sur (azimut 0°), aunque durante los equinoccios (representados por el de otoño, día 264) la radiación baja ligeramente con la orientación hacia el Este (Tabla 5.12).

Tabla 5.12. Desempeño solar de la envolvente en (MJ/m²) de una vivienda de planta 8x8 m², con paredes de 3 m de altura, bóveda de cañón de 4 m de radio y azimut ψ, durante los solsticios y los equinoccios, a una latitud de 24°N.			
	Día del año		
ψ	172	264	355
0°	7.86	7.98	9.77
45°	8.44	8.19	9.07
90°	8.14	7.89	9.55

Techo Cónico

Con fines de comparación se considera una vivienda de base $8 \times 8 \text{ m}^2$, como en los casos anteriores, con un techo cónico adaptado mediante el uso de pechinas en las esquinas (Fig. 5.8). Las áreas, tanto de las fachadas como del techo, no corresponden exactamente a las de las fachadas perfectamente rectangulares, ni al área de la base cuadrada. En los cálculos de radiación instantánea y energía solar diaria sobre la envolvente que se muestran a continuación no se corrige esta situación, por lo que se supone que es despreciable.

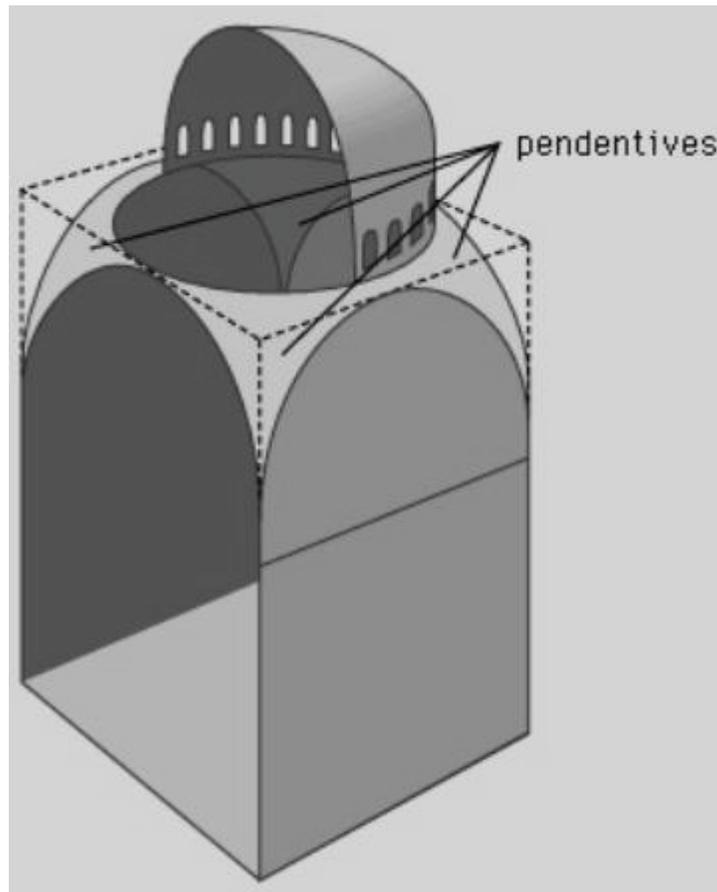


Figura 5.8. Adaptación arquitectónica para colocar un techo de base circular sobre una construcción de base cuadrada, llamada pechina, *pendentive* en inglés (tomado de la Enciclopedia Británica).

El patrón de radiación solar directa sobre un techo cónico (Fig. 5.9) es sensible los parámetros arquitectónicos de las fachadas y el techo, así como a la orientación de la vivienda. La geometría de esta vivienda, tanto por el techo como por las fachadas, produce patrones de radiación simétricos respecto al mediodía solar para orientaciones de 0° , 45° y 90° , y todos las equivalentes por adiciones de 90° a cualquiera de ellos. Se representa un caso en que a causa del azimut de 60° la radiación sobre cada una de las fachadas es diferente y por ende sobre toda la fachada completa (Fig. 5.9). Como en los casos anteriores, la integral de la curva continua es la energía solar por unidad de superficie que incidió sobre la vivienda.

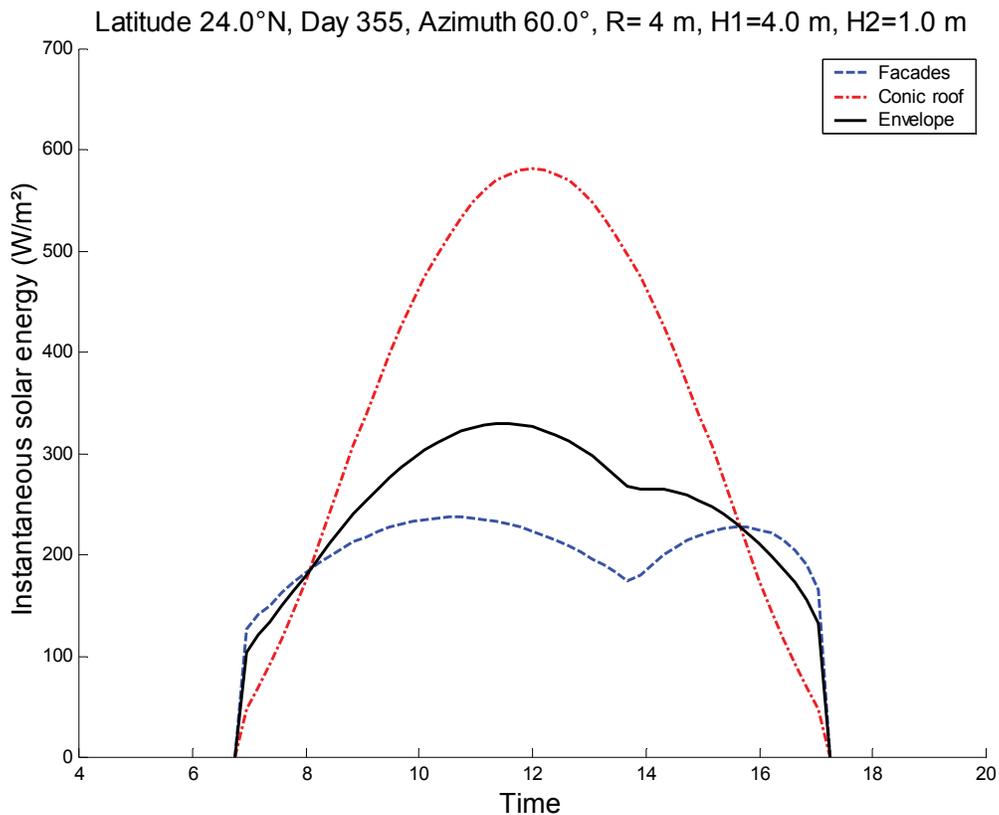


Figura 5.9. Radiación solar instantánea directa sobre la envolvente de una vivienda de planta $8 \times 8\text{ m}^2$, paredes de 4 m de altura y azimut 60° , con un techo cónico de 1 m de altura, considerando las contribuciones de la radiación sobre el techo y de las fachadas, durante el solsticio de invierno a una latitud de 24°N .

La energía solar diaria por unidad de superficie sobre la envolvente es menor durante los equinoccios y mayor en el solsticio de invierno, cuando la geometría del techo no contribuye a disminuir la radiación solar directa, debido al efecto de la declinación solar. A pesar de que durante el solsticio de verano este tipo de techo funciona bien, debido a que el sol pasa muy cerca del cenit a esta latitud, se obtienen valores intermedios de energía solar a causa de la mayor duración del día solar (Tabla 5.13).

Los efectos al aumentar las alturas, ya sea de las paredes de la fachada o la del cono, son muy leves. Al subir un metro cada uno, el desempeño solar de la vivienda apenas mejora 9.8, 8.2 y 4.3% en los días 172, 264 y 355 respectivamente (Tabla 5.13, casos 1 y 4).

Al incrementar 1 m la altura de las paredes de las fachadas solamente (Tabla 5.13; casos 1 y 2, 3 y 4), se obtienen mejoras de 8.3, 6.7 y 3.1%, durante los días 172, 264 y 355 respectivamente, que a pesar de ser bajas, son muy superiores a las que se logran al aumentar un metro la altura del techo solamente (casos 1 y 3, 2 y 4), cuando se logran mejoras entre el uno y dos por ciento.

De la misma forma se puede calcular a partir de la Tabla 5.13 que durante la primavera y el verano se puede mejorar el desempeño de la vivienda en promedio en 9% si las alturas de las paredes y el techo pasan de 3 y 1 m respectivamente, a 4 y 2 m, ya que en el primer caso la energía solar promedio es de 8.96 MJ/m² y en el segundo 8.15 MJ/m².

Tabla 5.13. Desempeño solar de la envolvente en (MJ/m²) de una vivienda de planta 8x8 m², con paredes de 3 y 4 m de altura (H1) y techo cónico de 1 y 2 m de altura (H2), durante los solsticios y los equinoccios, a una latitud de 24°N. Las fachadas están orientadas hacia los puntos cardinales.

Caso	H1 (m)	H2 (m)	Día del año		
			172	264	355
1	3	1	9.06	8.86	10.04
2	4	1	8.29	8.25	9.72
3	3	2	8.89	8.69	9.90
4	4	2	8.17	8.13	9.61

Bóveda Semiesférica

A diferencia de cómo se ha venido ejemplificando el patrón de radiación en los casos anteriores, en los que se buscaban casos atípicos con patrones asimétricos o raros, para la cúpula se muestra un patrón muy simétrico (Fig. 5.10) durante un equinoccio, logrado por el azimut de 0° de la vivienda. Para otros ángulos se podrían observar asimetrías, que más bien serían a causa de las diferencias de la radiación solar sobre las fachadas.

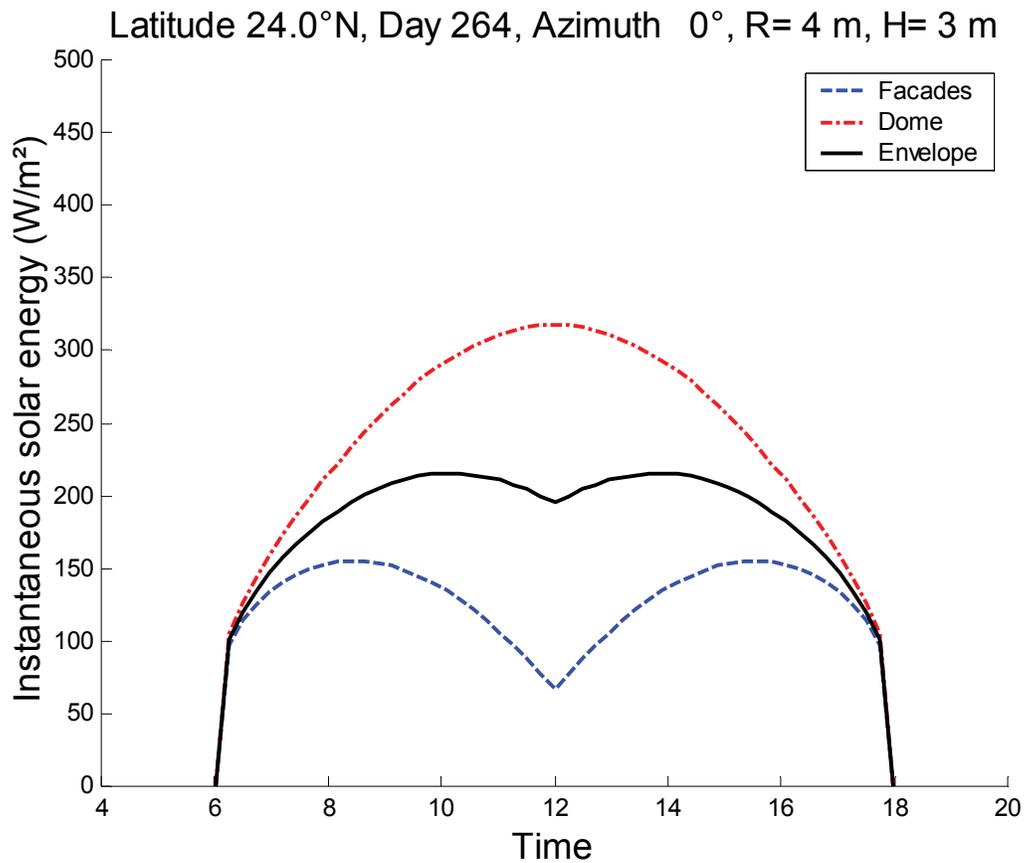


Figura 5.10. Radiación solar instantánea directa sobre la envolvente de una vivienda de planta $8 \times 8\text{ m}^2$, paredes de 3 m de alto y un domo de 4 m de radio, considerando las contribuciones de la radiación sobre el techo y de las fachadas, durante un equinoccio, a una latitud de 24°N .

Para este tipo de techo se muestra los cambios en la energía solar sobre la envolvente para diferentes latitudes (0°, 20° y 40°N), durante el solsticio de verano, un equinoccio y el promedio representativo de la energía solar diaria sobre la envolvente durante la primavera y el verano, para dos alturas del techo de las paredes de la fachada (Tabla 5.14).

En todos los casos, el desempeño de la bóveda es mejor durante los equinoccios, a causa de la mayor declinación solar, ya que durante el solsticio de verano es cuando el sol más cerca del cenit del lugar y el efecto de auto sombreado de la cúpula es menor.

Para cada latitud, el desempeño de la vivienda mejora al aumentar en un metro la altura de las paredes de la fachada. La mejora es cada vez menor al aumentar latitud: 5.2, 5.0 y 3.7% para 0°, 20° y 40°N respectivamente (Tabla 5.14).

Tabla 5.14. Desempeño solar de la envolvente en (MJ/m²) de una vivienda de planta 8x8 m², con paredes de 3 y 4 m de altura (H) y un domo de 4 m de radio, durante los solsticios y los equinoccios, a diferentes latitudes, para un azimut de 0°.					
Caso	Latitud	H	Día del año		
			172	264	Promedio
1	0	3	8.11	6.64	7.37
2	0	4	7.80	6.18	6.99
3	20	3	7.91	7.64	7.77
4	20	4	7.48	7.27	7.38
5	40	3	9.62	9.69	9.65
6	40	4	9.16	9.41	9.29

Comparación de Desempeños Solares

Para el caso de las viviendas con planta cuadrada, en las Figuras 5.11, 5.12 y 5.13 se comparan las curvas de radiación a una latitud de 24°N sobre los siete tipos de techo considerados, durante el solsticio de verano (día 172), un equinoccio (día 264) y el solsticio de invierno (día 355), respectivamente. Sólo se consideran para fines de comparación viviendas con medidas comunes, esto es: paredes de las fachadas de 3 m de altura y techos de 2 m de altura, cuando proceda. La vivienda con techo horizontal se calcula con 3 m de altura, y los techos abovedados, bóveda de cañón y domo, de 4 m de radio. Según el tipo de techo que se emplee, en cada caso se usará la mejor orientación que corresponda a la envolvente, es decir: con paredes de la fachada orientadas hacia los cuatro puntos cardinales, y un azimut de: 0° para todos los techos, excepto para el inclinado que se calcula con un azimut de 180° (orientación hacia el Norte), conforme a los resultados previos.

Analizando las tres gráficas en conjunto (Figs. 5-11-5.13) se observa una clara diferenciación de los techos abovedados durante los días 172 y 264, que reciben menos radiación alrededor del mediodía que el resto. Este comportamiento también ocurre durante el día 355 (Fig. 5.13) en el que con la escala de radiación ampliada, las curvas están más cercanas entre sí.

El orden de los techos respecto a la radiación recibida alrededor del mediodía no se conserva. Sólo los tres primeros techos que reciben más radiación son los mismos: horizontal, de cuatro aguas y de dos aguas. El techo cónico recibe más radiación que el inclinado los días 172 y 264, y sólo durante el solsticio de invierno recibe un poco menos, de manera prácticamente imperceptible. El desempeño de los techos abovedados es prácticamente igual durante el día 355, siendo mejor el domo durante el equinoccio y la bóveda de cañón durante el solsticio de verano.

Las integrales de cada una de las curvas de estas tres figuras, dan origen al valor de energía solar directa sobre la envolvente correspondiente a cada día. En la Tabla 5.15 se anotan estos valores para los días 172 y 264, junto con el promedio correspondiente a estos dos días, que representa la energía promedio al día durante la primavera y el verano, gracias a la simetría de la radiación alrededor del solsticio de verano. Bajo ese criterio y en las condiciones con las que se calculó la tabla, la bóveda de cañón es la que tiene el mejor desempeño solar. Entre los techos de superficies planas, destaca el techo inclinado con el mejor desempeño solar, que recibe menos energía solar por día que los demás y que el techo cónico inclusive.

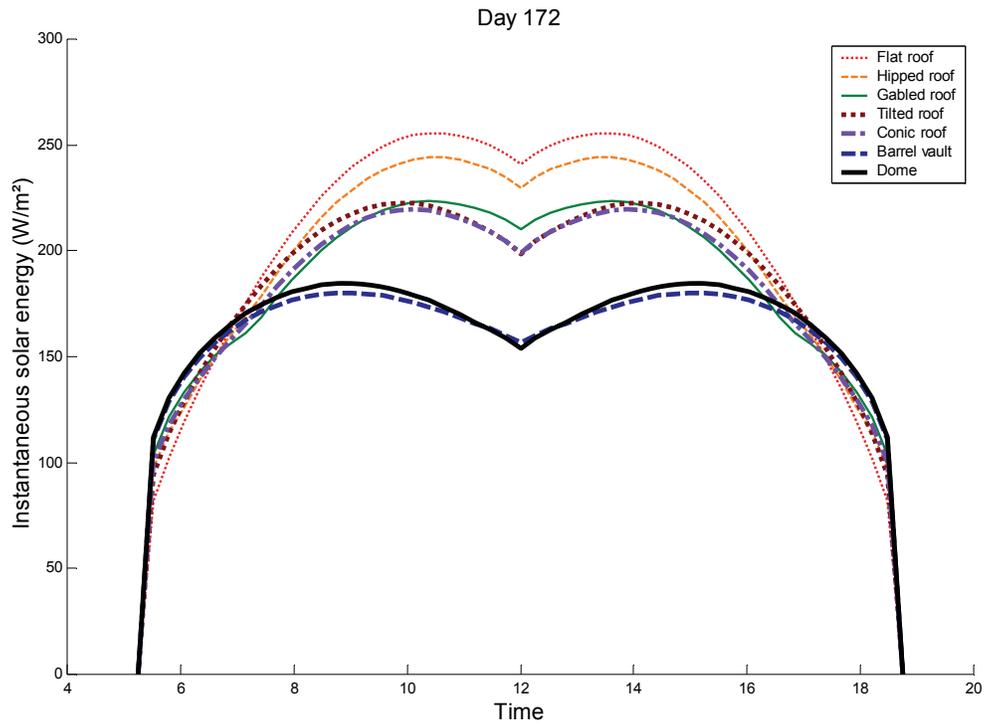


Figura 5.11. Radiación solar instantánea directa durante el solsticio de verano sobre la envolvente de una vivienda de planta 8x8 m², paredes de 3 m de altura, con diferentes tipos de techos, todos con azimut 0° excepto el inclinado que se usó con azimut 180°, a una latitud de 24°N.

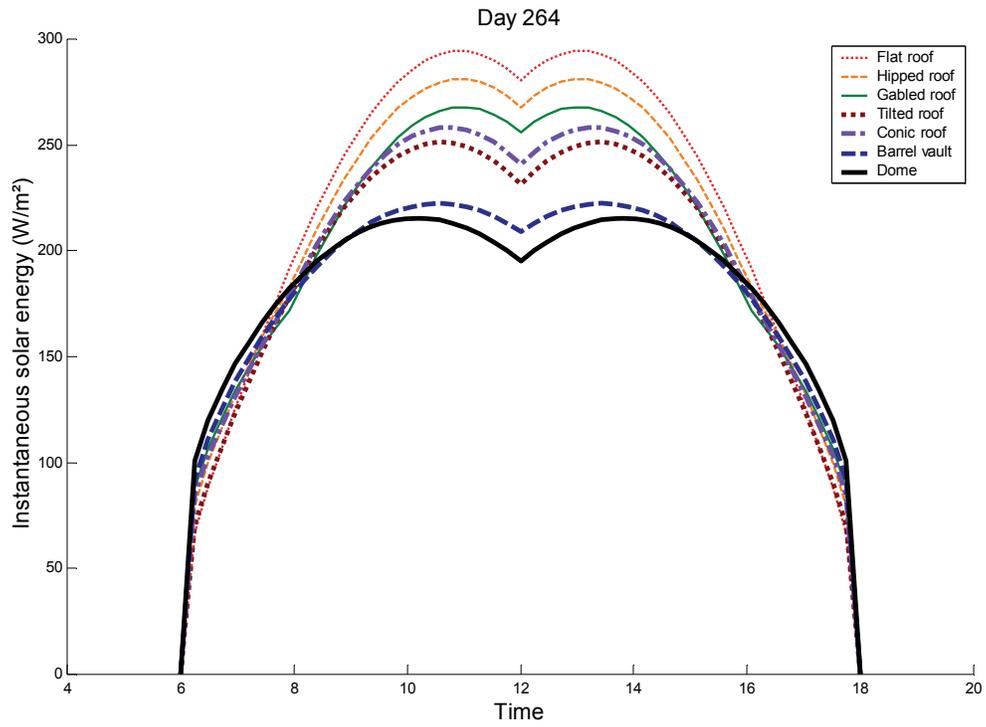


Figura 5.12. Radiación solar instantánea directa durante un equinoccio sobre la envolvente de una vivienda de planta 8x8 m², paredes de 3 m de altura, con diferentes tipos de techos, todos con azimut 0° excepto el inclinado que se usó con azimut 180°, a una latitud de 24°N.

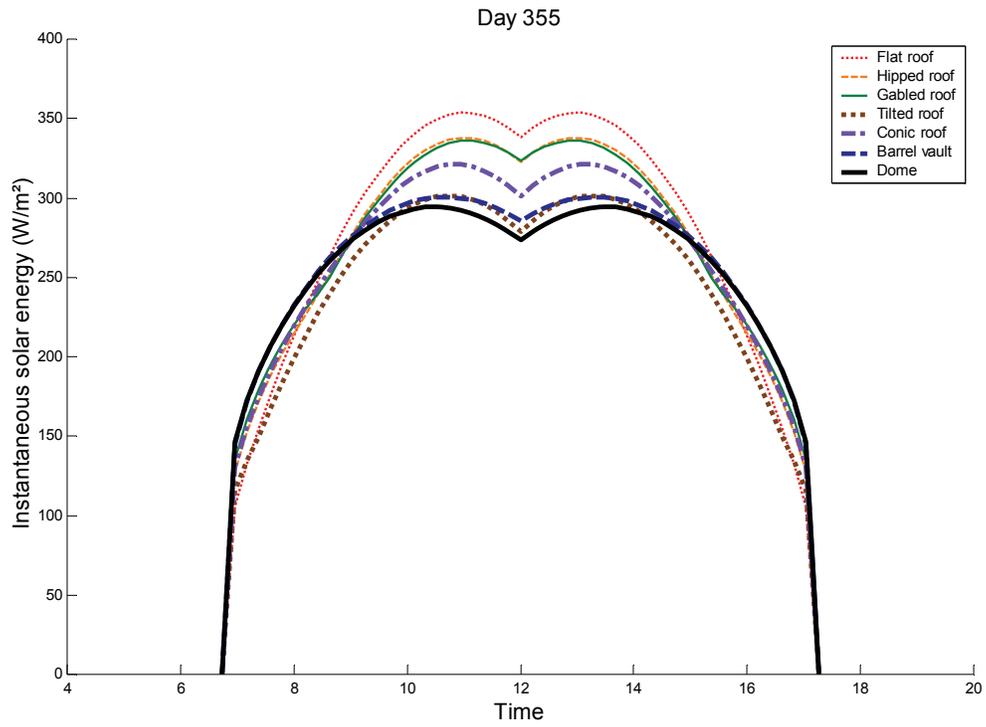


Figura 5.13. Radiación solar instantánea directa durante el solsticio de invierno sobre la envolvente de una vivienda de planta 8x8 m², paredes de 3 m de altura, con diferentes tipos de techos, todos con azimut 0° excepto el inclinado que se usó con azimut 180°, a una latitud de 24°N.

Tabla 5.15. Energía solar diaria (MJ/m²) sobre la envolvente de una vivienda de planta 8x8 m², paredes de 3 m de altura, a una latitud de 24°N, con diferentes tipos de techos de 2 m de altura cuando se requiere especificar: horizontal (TH), de cuatro aguas (T4), de dos aguas (T2), inclinado (TI), cónico (TC), bóveda de cañón (BC) y domo (D).

			Día del año		
Caso	Techo	ψ	172	264	Promedio
1	TH	0°	9.85	9.50	9.67
2	T4	0°	9.54	9.20	9.37
3	T2	0°	8.97	8.83	8.90
4	TI	180°	9.05	8.44	8.75
5	TC	0°	8.89	8.69	8.79
6	BC	0°	7.86	7.98	7.92
7	D	0°	7.98	7.94	7.96

Capítulo 6

ÍNDICE DE DESEMPEÑO SOLAR DE UNA CONSTRUCCIÓN

§ 6.1. Definición del Índice

El índice de desempeño solar de una construcción se define a partir del mismo razonamiento que dio origen a la expresión 5.3, usando como referencia la vivienda de 8x8 m², 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 que la que se quiere evaluar.

Con el objeto de que el índice refleje el desempeño solar de una vivienda ubicada en una zona cálida, se usan las simetrías alrededor de los solsticios de las evaluaciones de la radiación solar diaria sobre la construcción a lo largo del año, que sistemáticamente se estuvieron encontrando a lo largo de este trabajo (Figs. 2.1-2.5, 3.3, 3.5-3.10, 4.6 y Apéndice 2).

Para evaluar el comportamiento promedio durante la primavera y el verano, a partir de la simetría de la radiación solar diaria sobre la vivienda alrededor del solsticio de verano, es suficiente calcular la media de los valores correspondientes a ese día 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.

$$IDS_v = 1 - \frac{\text{med}(\mathbf{SE}_v(172), \mathbf{SE}_v(264))}{\text{med}(\mathbf{SE}_o(172), \mathbf{SE}_o(264))} \quad (6.1)$$

donde los valores de $\mathbf{SE}_v(n)$ y $\mathbf{SE}_o(n)$, con $n=172$ o 264 , correspondientes a la vivienda a evaluar y a la de referencia respectivamente, se calculan a partir de la expresión 5.2, cada una con los parámetros de construcción que le 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.

§ 6.2. Aplicaciones

Incrementos Unidireccionales

A partir de la vivienda 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 vivienda: largo de la fachada frontal (azimut 0°), largo de la fachada lateral (azimut 90°) y altura del techo. Esta última opción es la única que proporciona mejoras en el desempeño solar de la vivienda, pues el índice aumentó aproximadamente de manera proporcional a los incrementos en la altura del techo, por ejemplo: 8% para un techo de 4 m y 13% para un techo de 5 m, es decir, la vivienda recibe 8 y 13% menos energía solar sobre la envolvente durante la primavera y el verano que la referencia (Fig. 6.1; curva continua para incrementos de 1 m y 2 m).

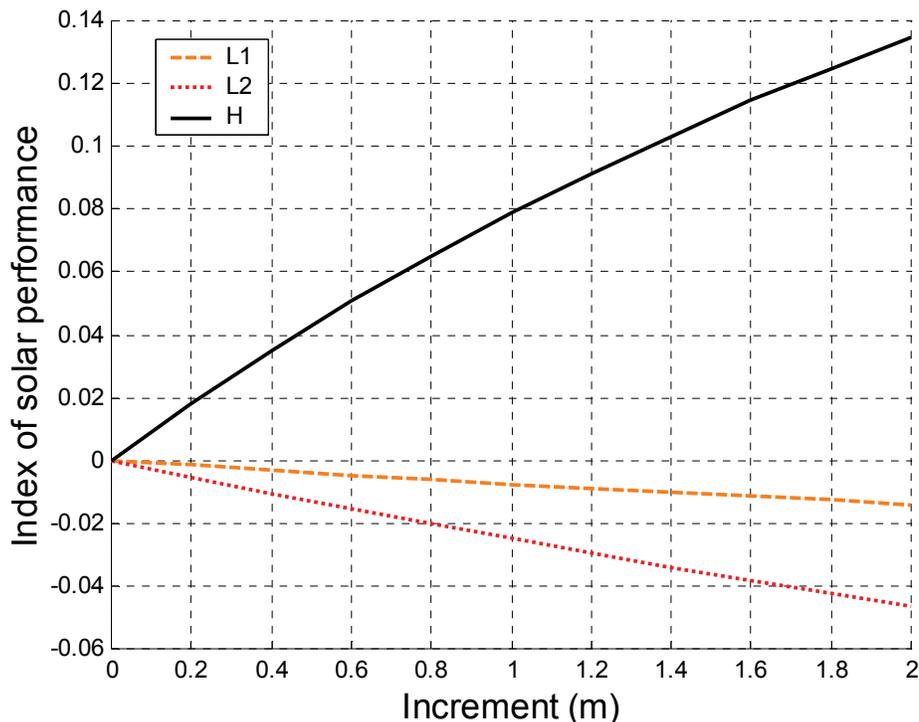


Figura 6.1. Índice de desempeño solar de una vivienda al incrementar una de sus dimensiones, ya sea la longitud de las fachadas norte y sur (L1), la longitud de las fachadas este y oeste (L2) o la altura del techo (H), a una latitud de 24°N .

Por el contrario, al incrementar la longitud de cualesquiera de las fachadas, el índice es negativo, indicando que empeora el desempeño respecto a la vivienda con las dimensiones originales, es decir, la energía solar directa sobre la envolvente se incrementa. Por ejemplo, al incrementar en dos metros las fachadas norte y sur el desempeño disminuye alrededor de 1%, o equivalentemente, la envolvente recibe 1% más energía solar; análogamente, si tal incremento se aplica a las fachadas este y oeste el desempeño baja en casi 5%. Este resultado indica que el desempeño solar de la vivienda disminuye más al incrementar la longitud de las fachadas este y oeste, expuestas a la radiación antes y después del mediodía respectivamente (Fig. 6.1, curvas discontinuas para un incremento de 2 m).

Este resultado explica en parte porque el índice desempeño solar es constante cuando se aplican incrementos proporcionales en las tres direcciones. Por ejemplo si a la vivienda de referencia se le aplicase un incremento de 50% tanto en la altura del techo como en las dimensiones de la planta, es decir, convertirla en una vivienda con techo horizontal de 12x12 m² y 4.5 m de altura, entonces por definición el valor del índice de desempeño solar también es cero. El incremento en la radiación al aumentar la superficie del techo se compensa con las mejoras logradas con el aumento de la superficie de las paredes.

Planta Alargada

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, por ejemplo granjas o invernaderos, el tipo de techo y la orientación son decisivos para el desempeño solar de la vivienda.

Para una construcción de 8 m de fachada frontal y trasera, el alargamiento de la otra fachada de 8 a 20 m (Fig. 6.2, incrementos de 0 a 12 m) disminuye el desempeño de la construcción, de manera casi imperceptible cuando está orientada de este a oeste (Fig. 6.2, curvas de azimut 90°) y muy acentuada cuando está orientada de norte a sur (Fig. 6.2, curvas de azimut 0°).

En cualquiera de las dos orientaciones, la construcción con bóveda de cañón tiene mejor desempeño que los otros dos techos, mayor de 20% para la orientada de este a oeste y disminuyendo de más de 20% a poco menos del 5%, para la orientada de norte a sur, al incrementar la longitud (Fig. 6.2, curvas punteadas). El techo de dos aguas tiene un comportamiento muy similar a la bóveda con desempeños solares menores en ambas orientaciones (Fig. 6.2, curvas discontinuas).

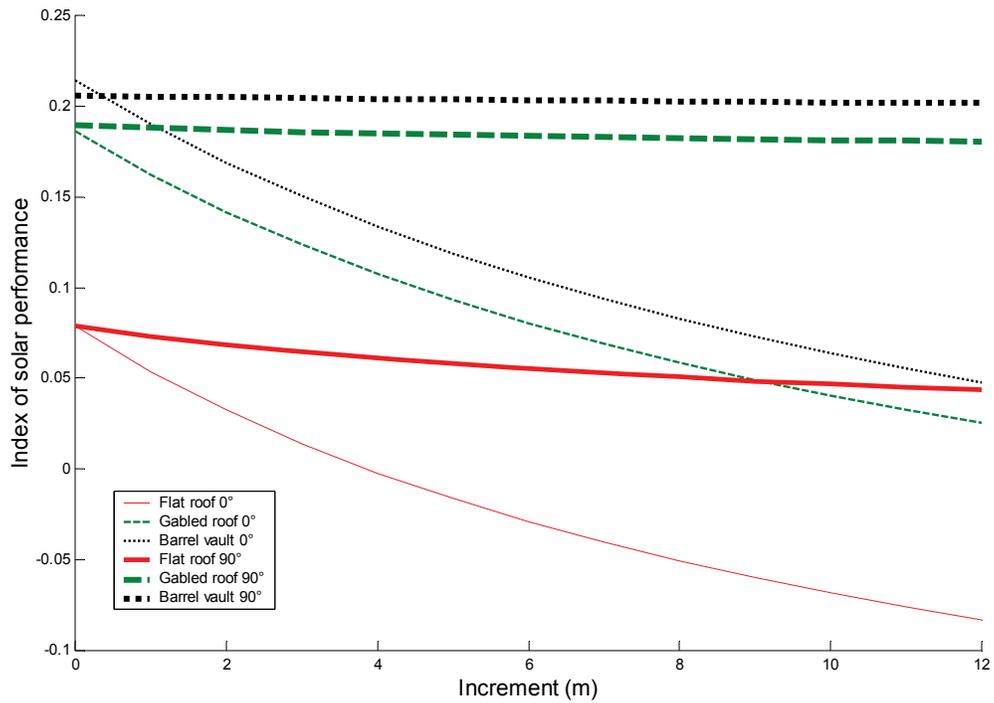


Figura 6.2. Índice de desempeño solar de una construcción al alargar la fachada lateral, con tres tipos de techos, horizontal (curvas continuas), de dos aguas (curvas discontinuas) y bóveda de cañón (curvas punteadas) y dos orientaciones: de norte a sur (azimut 0°) y de este a oeste (azimut 90°), a una latitud de 24°N.

Invariancia de los Techos en las 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 0.40 para una torre de 30 m, que se incrementa a 0.422 cuando la torre es de 40 m (Tabla 6.1).

A pesar de que los techos que no son planos son los que tienen el mejor desempeño, la diferencias entre todos ellos son mínimas. Tal como se mostró en la figura 5.2, 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. Entonces, desde este enfoque, a mayor altura de la torre, la radiación sobre la envolvente usando los diferentes tipos de techos se aproxima cada vez más al valor promedio de radiación (Tabla 6.1).

La desviación cuadrática media del índice de desempeño solar (la raíz cuadrada de la suma de desviaciones cuadradas respecto a la media dividida entre el número de casos, siete en este caso) pasa de 0.26% correspondiente a la torre de 30 m, a 0.20% de la torre de 40 m. Con esto se demuestra que las diferencias entre las radiaciones sobre 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 6.1. Energía solar (MJ/m²) sobre la envolvente de unas torres con fachadas de 30 y 40 m de altura y valor del índice de desempeño solar, para los diferentes tipos de techos (de 2 m de altura cuando se requiere especificar), sobre una base 8x8 m², y azimut 0°, a una latitud de 24°N.

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
T4	5.80	0.401	5.63	0.418
T2	5.77	0.404	5.61	0.420
TI	5.80	0.400	5.64	0.417
TC	5.66	0.415	5.52	0.429
BC	5.73	0.408	5.59	0.422
BE	5.63	0.418	5.51	0.430
Promedios	5.74	0.406	5.59	0.422

TH = techo horizontal, T4 = techo de cuatro aguas, T2 = techo de dos aguas, TI = techo inclinado, TC = Techo cónico, BC = bóveda de cañón y BE = domo.

Equivalencia Energética entre un Techo Horizontal y un Domo

Si una vivienda de planta $8 \times 8 \text{ m}^2$, ubicada a una latitud de 24°N , a la que se le tiene que instalar un techo horizontal, se construye con fachadas de 6 m de altura, la energía solar sobre la envolvente durante la primavera y el verano se iguala en promedio a la energía que incide sobre la envolvente de tal vivienda si tuviera instalado un techo hemisférico de radio 4 m sobre paredes de 3 m de altura (Fig. 6.3). En tal caso la energía sobre la envolvente es de 7.96 MJ/m^2 con un valor del índice de desempeño solar de 0.177, es decir, en tales condiciones se mejora el desempeño de la vivienda con respecto a un techo horizontal de 3 m de altura (referencia) en 17.7%.

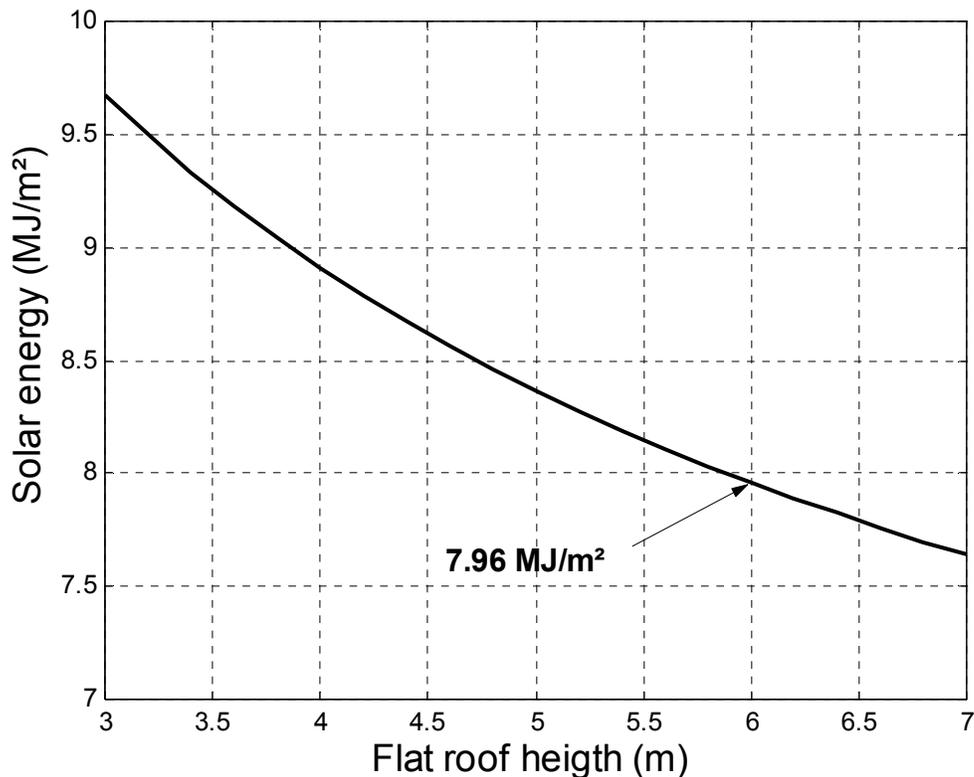


Figura 6.3. Energía solar promedio sobre la envolvente de una vivienda de $8 \times 8 \text{ m}^2$, con azimut 0° , correspondiente a la primavera y el verano a una latitud de 24°N , con techo horizontal de altura variable. Se indica la energía sobre la vivienda con un domo de 4 m de radio y fachadas de 3 m de altura, que se iguala con la de la vivienda con techo horizontal de 6 m de altura.

Cambios de Orientación de un Techo Inclinado

Como ya se analizó en los capítulos anteriores, el techo inclinado es el que presenta mayor variabilidad respecto a los cambios de azimut. La mejor orientación de una vivienda con este techo es hacia el Norte (azimut 180°), como ya se había mostrado (Tabla 5.2), con un valor del índice alrededor de 0.095, es decir, tal orientación proporciona una mejora de casi 10% respecto a la vivienda de referencia (Fig. 6.4).

Las peores orientaciones son para cuando el azimut es múltiplo de 45° : sureste y suroeste, producen las mejoras más bajas, apenas entre el 4 y 5%, noreste y noroeste cercanas al 6%. En contraste, orientando esta vivienda hacia el Este o hacia el Oeste, se obtienen mejoras arriba del 8% (Fig. 6.4).

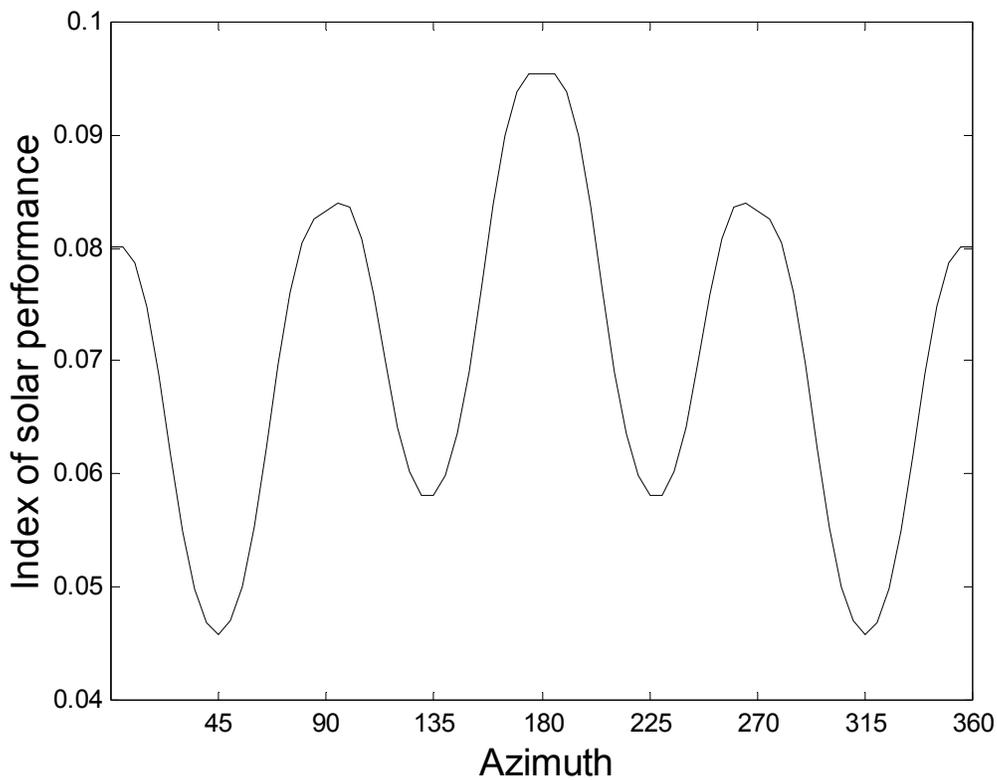


Figura 6.4. Índice de desempeño solar de una vivienda de $8 \times 8 \text{ m}^2$, fachadas de 3 m de altura y techo inclinado de 2 m de altura, en función del azimut, a una latitud de 24°N .

Influencia de la Latitud

Los techos abovedados son los que tienen mejor desempeño solar logrando mejoras, respecto a la vivienda con techo horizontal de 3 m que se usó como referencia para definir el índice, de alrededor de 18% en las regiones tropicales, disminuyendo drásticamente al aumentar la latitud (Fig. 6.5).

El techo de dos aguas también disminuye su ya de por sí muy bajo desempeño al aumentar la latitud, pasando del 8% en el Ecuador a 4% en la latitud 50°N. El techo inclinado es el único en este ejemplo que aumenta su desempeño con la latitud, alcanzando una mejora máxima de casi 10% entre 0° y 35°N, y disminuyendo ligeramente entre los 35° y 50°N (Fig 6.5).

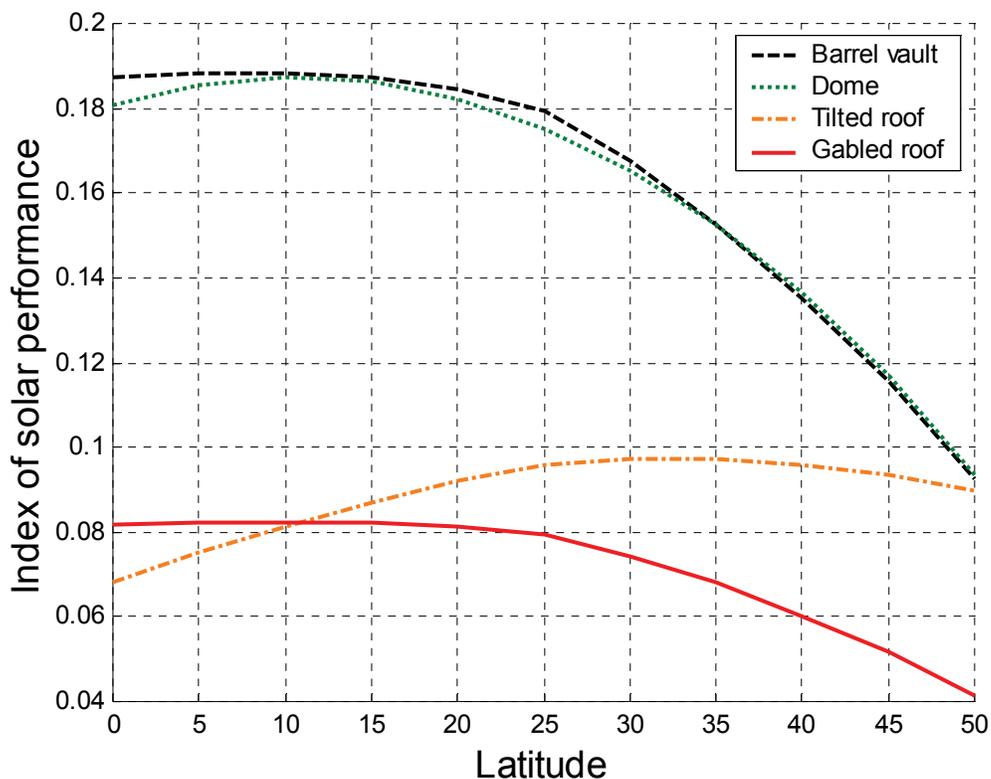


Figura 6.5. Cambios con la latitud en el índice de desempeño solar de una vivienda de 8x8 m², con fachadas de 3 m de altura, y diferentes tipos de techos: inclinado y de dos aguas de 2 m de altura, bóveda de cañón y domo de 4 m de radio, todos con azimut 0°, excepto el inclinado que se orientó hacia el Norte.

Desempeño Solar en Conjuntos Habitacionales

En el tema de la construcción masiva de viviendas en los lugares de clima cálido, se puede multiplicar el beneficio de planear u optimizar el desempeño solar de las mismas, no sólo en la inversión y en el gasto de enfriamiento de las mismas por parte de los propietarios, sino también en la generación y distribución del excedente de energía eléctrica para operar los equipos, con el subsiguiente aumento de la contaminación provocada tanto por el usuario a través del uso de equipos de aire acondicionado como por las plantas generadoras de energía eléctrica.

Se muestra un ejemplo del alcance que podría tener la aplicación de los resultados mostrados en este trabajo por medio de un ejemplo hipotético de un conjunto habitacional proyectado en un terreno irregular que induce una distribución de lotes (Fig. 6.6a), con manzanas cuadradas donde hay lotes rectangulares y cuadrados en los que las viviendas quedarán mal orientadas (Figs. 6.7a y 6.8a). Las manzanas triangulares están destinadas a áreas verdes y de servicios.

El ejercicio consiste en modificar la distribución de lotes (Fig. 6.6b) y el sembrado de las casas, conservando las superficies de las manzanas, de los lotes y de las casas (Figs. 6.7b y 6.8b), para probar distintos tipos de viviendas, que se explican a continuación.

Escenario 1. Condición inicial, distribución de la figura 7.6a.

Tipo 1A: Lotes rectangulares: vivienda de 6×12 m², paredes de 3 m de altura, orientaciones de 45° y 225° de azimut y techo horizontal (Fig. 6.7a).

Tipo 1B: Lotes cuadrados: vivienda de 8×8 m², paredes de 3 m de altura, orientaciones de 45° y 225° de azimut y techo horizontal (Fig. 6.8a).

Escenario 2. Primera modificación, distribución de la figura 7.6b:

Tipo 2A: Lotes romboides: vivienda de planta rectangular de 6×12 m², paredes de 3 m de altura, orientaciones de 90° y 270° de azimut y techo horizontal (Fig. 6.7b).

Tipo 2B: Lotes triangulares: vivienda de planta cuadrada de 8×8 m², paredes de 3 m de altura, orientaciones de 90° y 270° de azimut y techo horizontal (Fig. 6.8b).

Escenario 3. Segunda modificación, distribución de la figura 7.6b:

Tipo 3A: Lotes romboides: vivienda de planta rectangular de 6×12 m², paredes de 3 m de altura, orientaciones de 90° y 270° de azimut y bóveda de cañón de 3 m de radio (Fig. 6.7b).

Tipo 3B: Lotes triangulares: vivienda cuadrada de 8×8 m², paredes de 3 m de altura, orientaciones de 90° y 270° de azimut y domo de 4 m de radio (Fig. 6.8b).

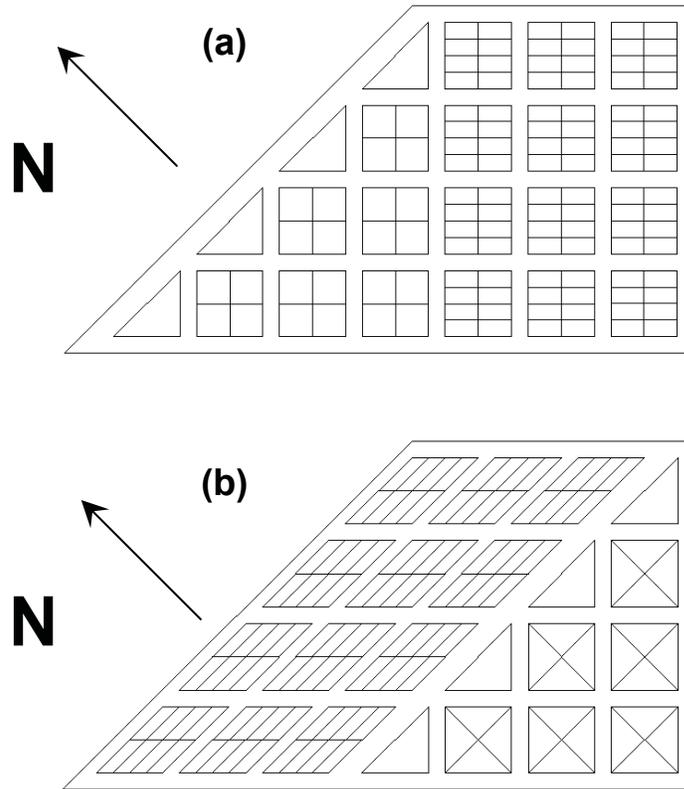


Figura 6.6. Cambios en la distribución de lotes de una unidad habitacional, para "sembrar" las casas con la orientación adecuada. Las manzanas que contienen ocho lotes rectangulares (a), se cambiaron por manzanas y lotes en forma de romboide de la misma superficie (b). En las manzanas cuadradas los cuatro lotes cuadrados (a), se modificaron en cuatro lotes triangulares (b). Las manzanas triangulares son para áreas verdes y de servicios, sólo fueron cambiadas de lugar.

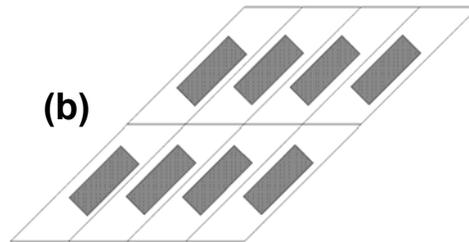


Figura 6.6. Sembrado de casas: (a) manzana rectangular original, y (b) manzana romboide modificada.

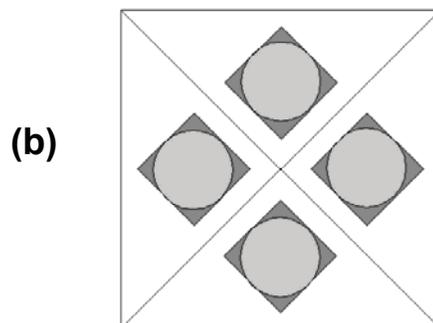
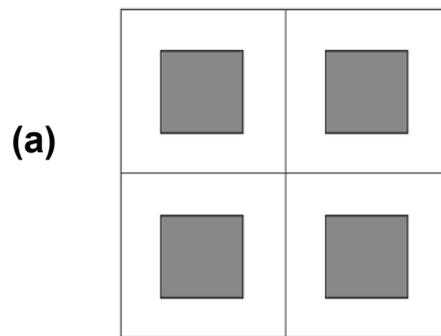


Figura 6.7. Sembrado de casas en las manzanas cuadradas: (a) original, y (b) modificada, tanto para techo horizontal como para domo.

En la Tabla 6.2 se muestra la disminución de la energía promedio sobre las envolventes de toda la unidad habitacional respecto a la situación inicial (escenario 1), al usar la orientación óptima de las viviendas (escenario 2) y la obtenida al cambiar además el tipo de techo (escenario 3), bajo la suposición de que el efecto de las sombras de las casas vecinas es despreciable. En porcentaje se mejoró 6.9% con el escenario 1 y 22.14% con el escenario 3, con lo que se demuestra que el cambio del techo tiene un fuerte impacto en la disminución de la energía solar incidente. Esto se confirma comparando directamente los escenarios 2 y 3, esto es, ya con la orientación adecuada, el cambio de los techos horizontales por los abovedados (bóveda de cañón y domo) representó una disminución del 16.4% de la energía recibida por las envolventes de las viviendas.

Tabla 6.2. Energía solar promedio diaria (MJ/m²), durante la primavera y el verano, sobre las envolventes de 120 casas de una unidad habitacional, a una latitud de 24°N. Se anota la energía E sobre cada una las N viviendas del mismo tipo para tres escenarios.

	Planta rectangular o romboide N=96		Planta cuadrada N=24		
Escenario	Tipo	E	Tipo	E	Promedio
1	1A	9.97	1B	9.97	9.97
2	2A	9.18	2B	9.67	9.28
3	3A	7.71	3B	7.96	7.76

Capítulo 7
CONTROL SOLAR

§ 7.1. Interacción Barda-Tejado

En este capítulo se desarrolla un modelo general para optimizar la interacción entre un tejado y una barda frontal que proyectan sobre una fachada o muro exterior de la vivienda. Se hace énfasis en la ventaja de usar este enfoque unidimensional para resolver el problema de esta interacción, a través del análisis de las sobras proyectadas por estos elementos en la vista de perfil de la fachada. El modelo permite estudiar y evaluar cualquier estrategia decidida por el constructor para sombrear la fachadas, con especial atención en el sombreado de las ventanas.

Esquema Básico

A partir de los parámetros de construcción de la vista de perfil de una vivienda usados por Gómez-Muñoz and Porta-Gándara (2002) (Fig. 7.1), se generaliza la aplicación de este modelo unidimensional para obtener una relación entre los parámetros de sombreado:

H = Altura de la barda

T = Ancho del Tejado

α = Ángulo del tejado con la pared

que considere los parámetros de construcción:

D = Distancia de la barda a la fachada

M = Altura del borde inferior de la ventana sobre el piso.

V = Tamaño vertical de la ventana

A = Posición del tejado sobre la ventana

P = M + V + A = Altura del tejado respecto al piso.

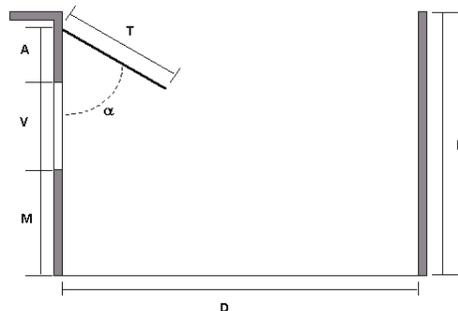


Figura 7.1. Parámetros de Construcción y de sombreado.

Modelo General

Dependiendo de la latitud, el día del año y de la hora del día, la barda proyecta una sombra de altura h_1 desde el piso, y el tejado una sombra de altura h_2 desde el tejado hacia abajo (Fig. 7.2).

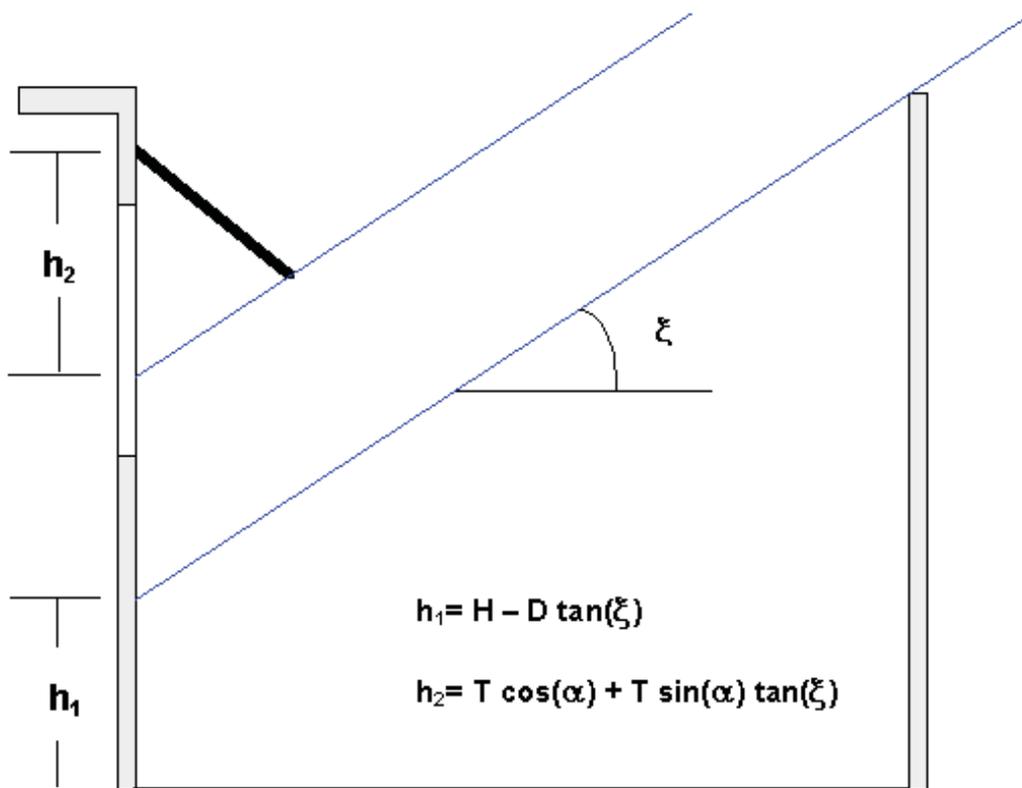


Figura 7.2. Altura de las sombras proyectadas por la barda y el tejado.

Por la igualdad de las pendientes de las sombras proyectadas por los rayos solares, se obtiene el modelo general que describe la interacción entre un tejado y una barda:

$$\frac{H-h_1}{D} = \frac{h_2 - T \cos(\alpha)}{T \sin(\alpha)} \quad (7.1)$$

A partir de consideraciones arquitectónicas se pueden manejar diferentes soluciones de la relación anterior:

$$H = D \frac{h_2 - T \cos(\alpha)}{T \sin(\alpha)} + h_1 \quad (7.2)$$

$$T = \frac{h_2 D}{(H-h_1) \sin(\alpha) + D \cos(\alpha)} \quad (7.3)$$

$$\sin(\alpha) = \frac{a h_2 T \pm \sqrt{T^2 (1+a^2) - h_2^2}}{T (1+a^2)}; \quad \text{donde} \quad a = \frac{H-h_1}{D} \quad (7.4)$$

Proyectos de Sombreado

En este trabajo se le llama así a la estrategia decidida por el constructor para sombrear la fachada. Dicha estrategia dependerá de los valores h_1 y h_2 , los cuales se pueden relacionar con los parámetros de construcción de diferentes maneras.

La interpretación gráfica del proyecto de sombreado representado por los valores de h_1 y h_2 es que cuando la sombra proyectada por la barda sea h_1 , los valores seleccionados de los parámetros de sombreado garantizarán que la sombra proyectada por el tejado sea h_2 . Esta condición rígida podrá cumplirse a diferentes horas, dependiendo del día y la latitud. Se ejemplifican los proyectos de sombreado más comunes en la Fig. 7.3.

La expresión del modelo que da lugar a las tres soluciones (expresiones 7.2, 7.3 y 7.4), es la generalización de la relación utilizada por Gómez-Muñoz y Porta-Gándara (2002), que en este contexto es el caso particular del modelo correspondiente al proyecto de sombreado de la Fig. 7.3b.

En la Tabla 7.1 se muestran las definiciones algebraicas y la interpretación de los proyectos de sombreado de la Fig. 7.3. El sombreado total de la fachada desde esta perspectiva se logra cuando coinciden las sombras de ambos dispositivos y en cualquier otro momento del día solar se traslapan (casos a,b,c y f).

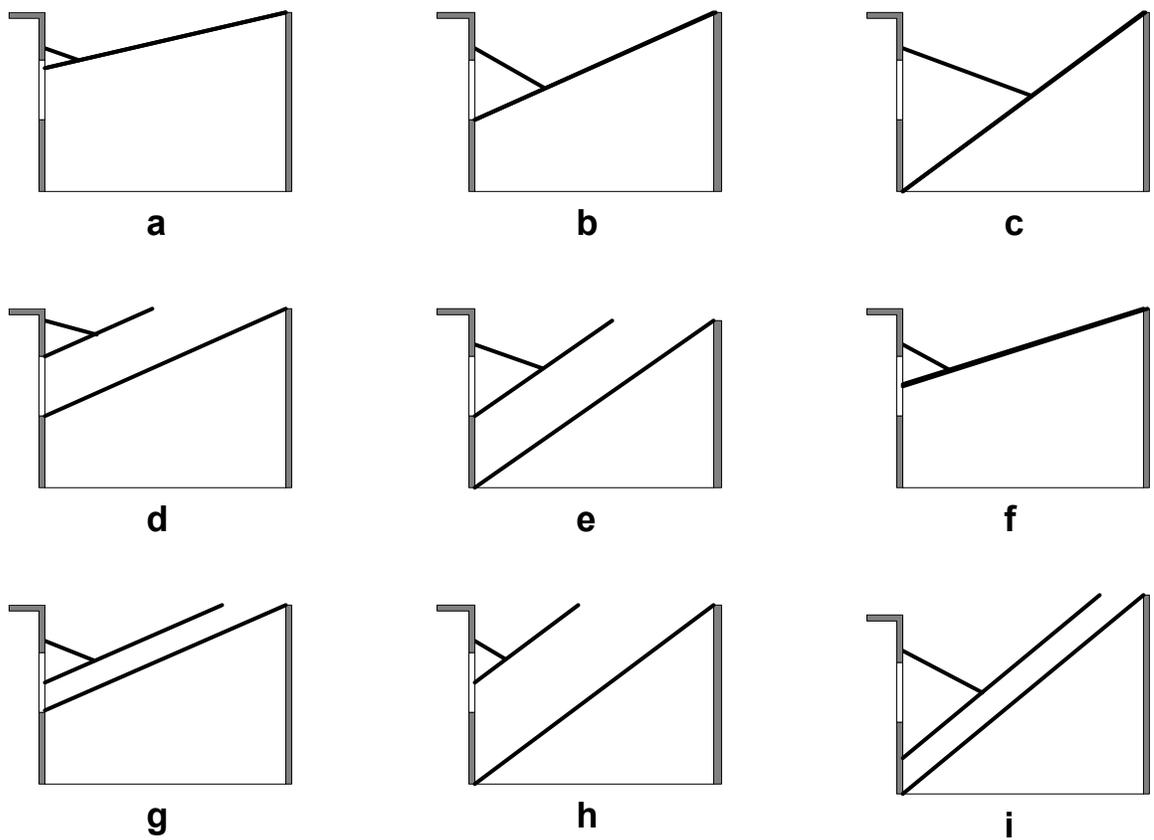


Figura 7.3. Ejemplos típicos de proyectos de sombreado, en relación a las dimensiones de la ventana, el muro inferior a ella y la fachada completa, desde esta perspectiva.

Tabla 7.1. Formulación y explicación de los proyectos de sombreado ilustrados en la Fig. 7.3. Los incisos se corresponden.

PROYECTO DE SOMBREADO	DESCRIPCIÓN
$h_1 + h_2 = P$	(a) La fachada se sombrea por completo cuando la barda proyecta una sombra igual a h_1 . No hay relación alguna con la ventana.
$h_1 + h_2 = P \ \& \ h_1 = M$	(b) Cuando la barda descubre la ventana, el tejado la sombrea por completo.
$h_1 + h_2 = P \ \& \ h_1 = 0$	(c) Cuando la barda no proyecta sombra sobre la fachada, el perfil de la sombra del tejado es total.
$h_1 = M \ \& \ h_2 = A$	(d) Cuando la barda no proyecta sombra sobre la ventana, el tejado comienza a sombrearla.
$h_1 = 0 \ \& \ h_2 = A + V$	(e) Cuando la barda no proyecta sombra sobre la fachada, el tejado sombrea por completo la ventana.
$h_1 + h_2 = P \ \& \ h_1 = M + V/2$	(f) Cuando la sombra de la barda incide sobre la mitad de la altura de la ventana, el tejado sombrea la otra mitad.
$h_1 = M \ \& \ h_2 = A + V/2$	(g) Cuando la sombra de la barda incide en el borde inferior de la ventana, el tejado sombrea la mitad superior de la ventana.
$h_1 = 0 \ \& \ h_2 = A + V/2$	(h) Cuando la barda descubre la fachada, el tejado sombrea la mitad superior de la ventana.
$h_1 = 0 \ \& \ h_2 = A + V + M/2$	(i) Cuando la barda descubre la fachada, el tejado proyecta sombra sobre la mitad superior del muro inferior a la ventana.

Optimización

Usando cualesquiera de las relaciones entre los parámetros de sombreado α , T y H (expresiones 7.2, 7.3 y 7.4), en el correspondiente diagrama de isolíneas de una de estas variables en función de las dos restantes, se escoge una combinación de valores sobre cualquier isolínea, decidida por el constructor, de acuerdo al proyecto de sombreado (h_1 y h_2) y a los parámetros fijos de construcción (A , M , V y D).

El diagrama de isolíneas correspondiente a la altura de la barda H en función del ancho del tejado T y su ángulo α , presenta la particularidad de que las isolíneas coinciden cuando el ángulo es 0° , ya que en tal caso el tejado se convierte de hecho en una cortina y por lo tanto el ancho "óptimo" es el tamaño de la ventana misma, que es justamente la referencia en el eje vertical (Fig. 7.4). Para cada isolínea se observa que es posible encontrar el valor mínimo del ancho del tejado T , que junto con el ángulo α correspondiente, representa el tejado que en ese momento es perpendicular a la línea de sombra proyectada por el sol. En cualquier otro caso existen dos soluciones para cada T , una muy cerrada, a la izquierda del mínimo, y otra más abierta a su derecha.

El diagrama de isolíneas del ancho del tejado T en función de los otros dos, se deriva de la segunda opción del modelo general (expresión 7.3). Este diagrama tiene menos posibilidades con el proyecto de sombreado que se ejemplifica en la Figura 7.5, ya que a pesar de que se consideran los rangos completos utilizables en la práctica de las variables independientes (altura de la barda H entre 1 y 4 m y ángulo del tejado α desde cero a 90°), el ancho del tejado ofrece pocas opciones de optimización por debajo de los 90 cm. Los valores mínimos de la altura de la barda se encuentran asociados a ángulos muy cerrados, por lo que no resultan de mucha utilidad, a pesar de que las pendientes alrededor de tales puntos (observables por la cercanía o lejanía entre las isolíneas adyacentes) son menos pronunciadas que las correspondientes a ángulos más abiertos, en la porción derecha de la gráfica.

El diagrama correspondiente a las isolíneas del ángulo α del tejado está limitado por la derecha a valores no mayores de 90° y por la izquierda se encuentra la región donde no hay soluciones óptimas (Figura 7.6), correspondiendo a las combinaciones de T y H para las que el radicando de la expresión 7.4 es negativo. En otras palabras, a partir de un valor de H , la condición impuesta por un proyecto de sombreado cualquiera requerirá que el tejado tenga un valor mínimo T_{\min} , que corresponde al caso de que el radicando se anule, y que geoméricamente es el valor de T asociado a la inclinación perpendicular a la sombra de longitud h_2 que proyecta el tejado sobre la fachada, es decir:

$$T_{\min} = \frac{h_2}{\sqrt{1 + a^2}}$$

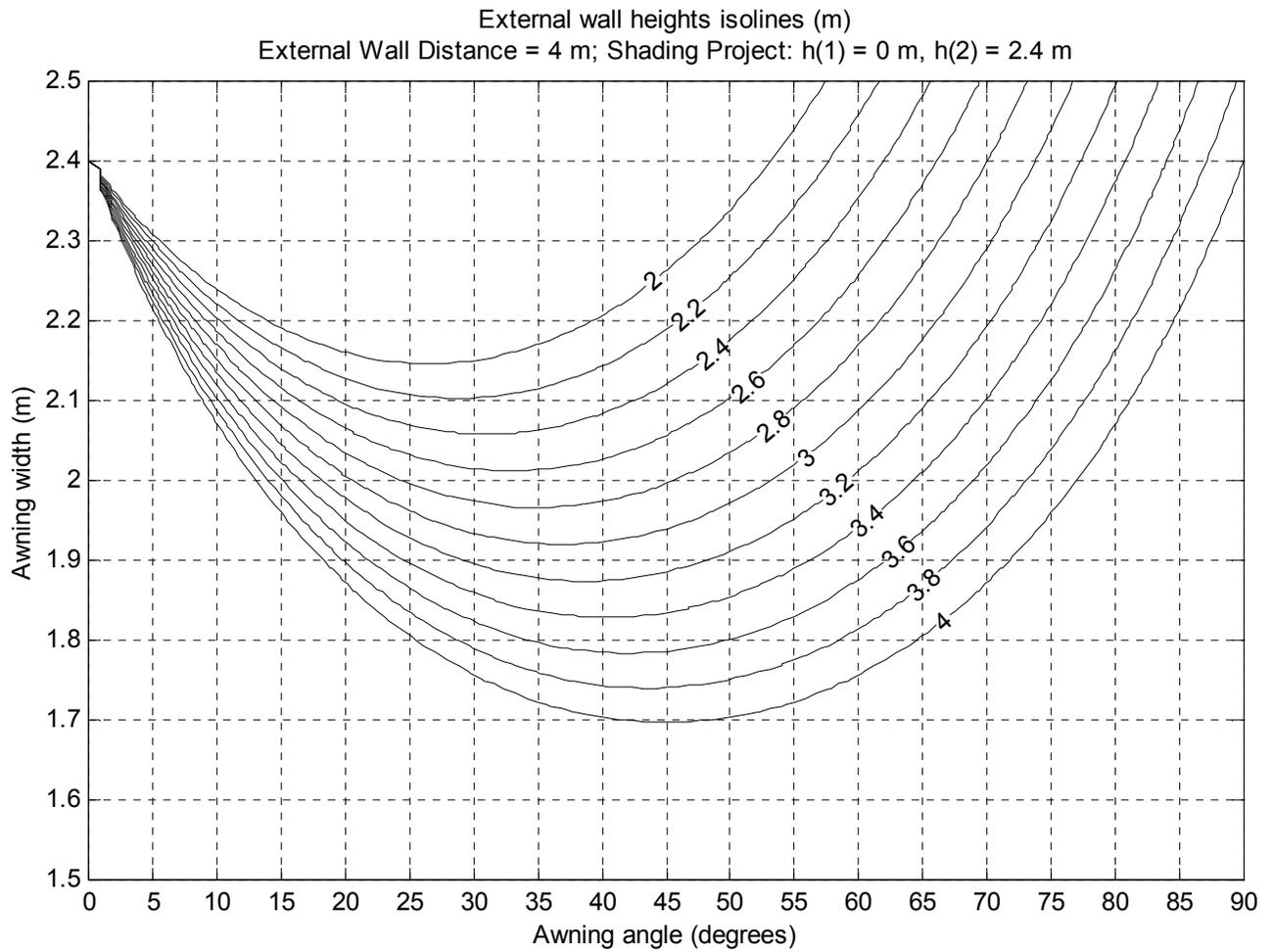


Figura 7.4. Diagrama de isóneas de la altura de la barda H en función del ancho T y del ángulo del tejado α (expresión 7.2). Cualquier combinación de los parámetros de sombreado sobre una isónea, proporciona una solución óptima en términos del proyecto de sombreado elegido (h_1 , h_2). Se usaron $A=0.2$ m, $V=1.0$ m y $M=1.2$ m. Este diagrama corresponde al proyecto de sombreado de la Fig. 7.3c.

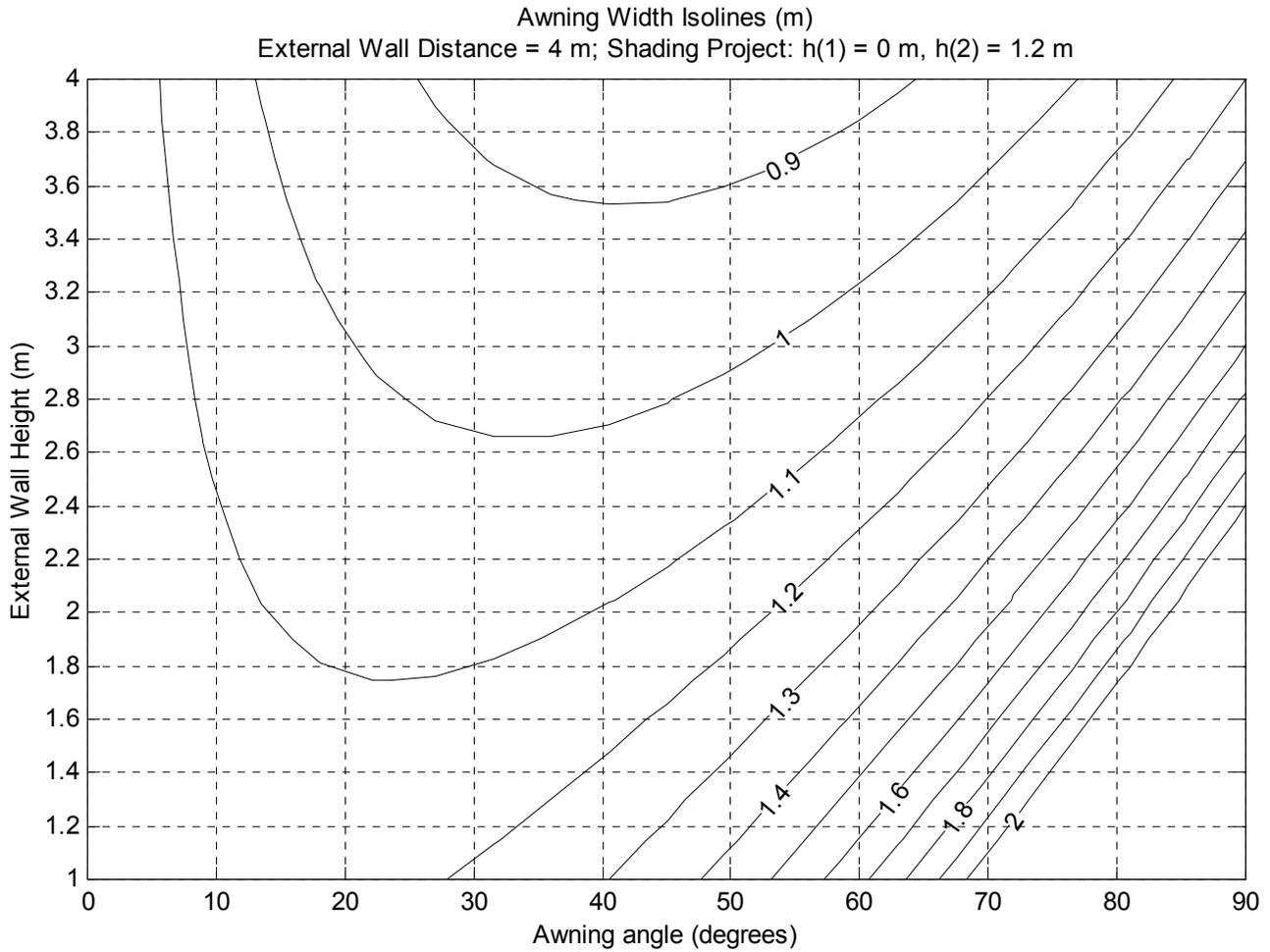


Figura 7.5. Diagrama de isolíneas del ancho T del tejado en función de la altura de la barda H y del ángulo del tejado α (expresión 7.3). Cualquier combinación de los parámetros de sombreado sobre una isolinia, proporciona una solución óptima en términos del proyecto de sombreado elegido (h_1 , h_2). Se usaron $A=0.2$ m, $V=1.0$ m y $M=1.2$ m. Este diagrama corresponde al proyecto de sombreado de la Fig. 7.3e.

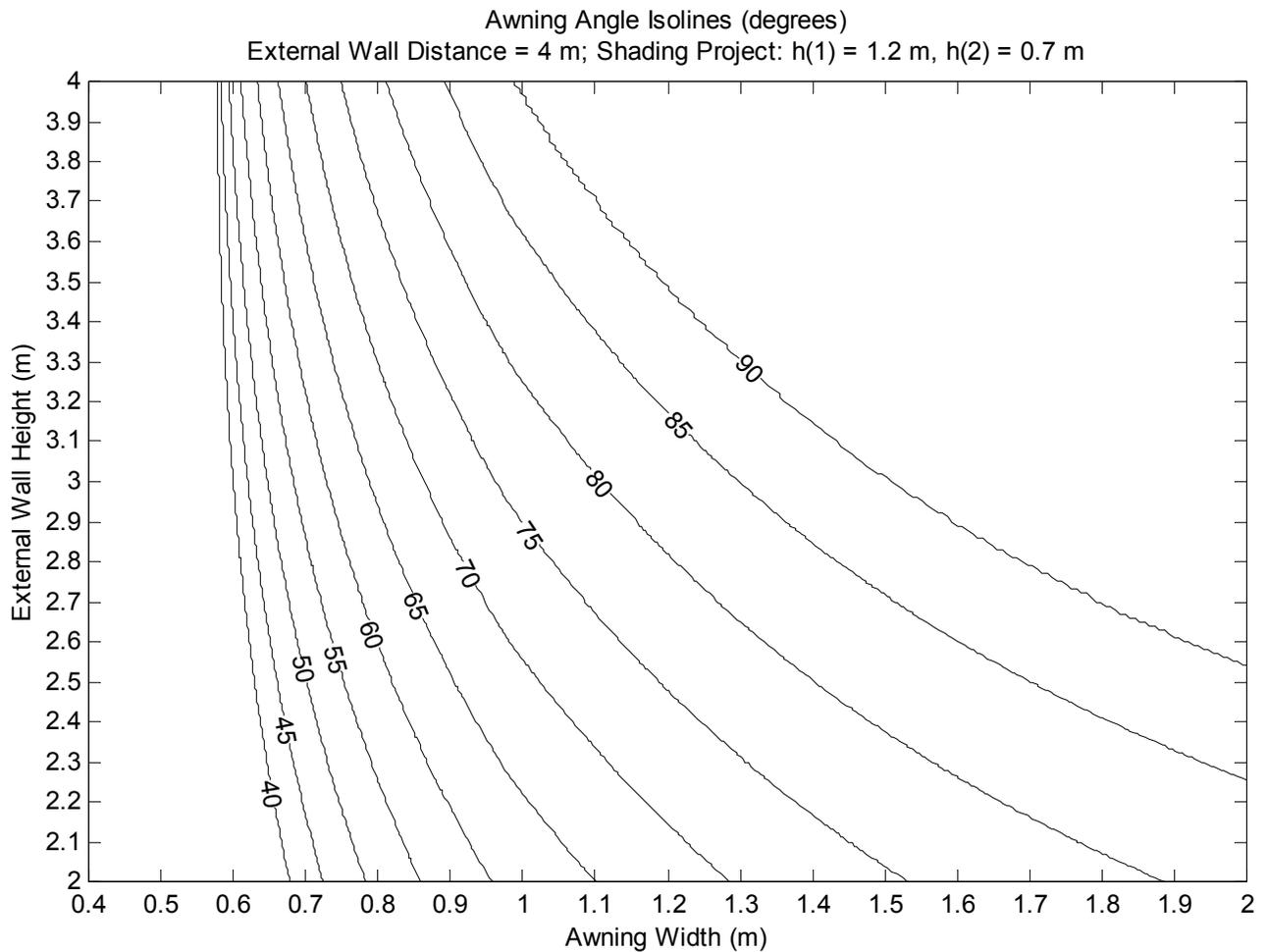


Figura 7.6. Diagrama de isolíneas del ángulo del tejado α en función de su ancho T y de la altura de la barda H (expresión 7.4). Cualquier combinación de los parámetros de sombreado sobre una isolínea, proporciona una solución óptima en términos del proyecto de sombreado elegido (h_1 , h_2). Se usaron $A=0.2$ m, $V=1.0$ m y $M=1.2$ m. Este diagrama corresponde al proyecto de sombreado de la Fig. 7.3g.

§ 7.2. Evolución Unidimensional del Sombreado

Las zonas de sombreado y radiación directa sobre la fachada a lo largo de un día solar, se pueden representar gráficamente en la vista de perfil de la fachada, para un instante dado, pero este tipo de representación gráfica, común en arquitectura, no permite analizar la evolución del sombreado a lo largo de un día, y menos aún, a lo largo de una temporada o de todo el año. En este capítulo se propone una forma gráfica que permite analizar simultáneamente los perfiles de las sombras proyectadas por un tejado y una barda a lo largo de un día solar, en la que simultáneamente se obtiene el cálculo del porcentaje de sombra obtenido, respecto a la máxima incidencia total del sol posible (en ausencia de dispositivos de sombreado).

Construcción de la Gráfica Básica

Con el objeto de comprobar gráficamente que el proyecto de sombreado elegido funciona como está previsto, se elabora la gráfica de la evolución unidimensional del sombreado en un día solar como sigue:

Para cada instante t la altura de la sombra proyectada por el tejado está dada por $h_3(t) = P - h_2(t)$, de modo que cuando $h_3(t) > h_1(t)$, la radiación incide sobre la fachada y la línea de iluminación va de $(t, h_1(t))$ a $(t, h_3(t))$. Análogamente, las líneas de sombreado van de $(t, 0)$ a $(t, h_1(t))$, la correspondiente a la barda, y de $(t, h_3(t))$ a (t, P) , la proyectada por el tejado (Fig. 7.7).

Área de Radiación en la Vista de Perfil

El área de radiación en la gráfica de la evolución unidimensional del sombreado se calcula por integración numérica con una resolución de tiempo de una milésima de día solar. El porcentaje total de sombreado del día se calcula complementando por diferencia el área de radiación respecto al máximo sombreado esperado. Cuando la radiación solar no incide sobre la fachada, se considera que ésta última está sombreada. Las ecuaciones que describen la situación anterior son las siguientes:

Area Total de Radiación (**ATR**) entre al amanecer (**ama**) y el atardecer (**ata**):

$$ATR = \int_{ama}^{ata} (h_3(t) - h_1(t))^+ dt$$

donde el exponente “+” indica la parte positiva de la función (es decir, $f^+ = \max(f, 0)$).

Área Total **AT**:

$$\mathbf{AT = P * (ata - ama)}$$

Área Total de Sombreado (**ATS**):

$$\mathbf{ATS = AT - ATR}$$

Proporción de Sombreado Total (**PST**):

$$\mathbf{PST = 1 - \frac{ATR}{AT}}$$

Área de Radiación sobre la Ventana en la Vista de Perfil

De particular interés en la gráfica de la evolución del sombreado es el área de radiación sobre la ventana, para la que se aplican definiciones similares a las de la sección anterior.

Área de Radiación sobre la Ventana (**ARV**):

$$\mathbf{ARV = \int_{ama}^{ata} (hv_3(t) - hv_1(t))^+ dt}$$

donde:

$$\mathbf{hv_3(t) = \min(h_3(t), M + V)}$$

y

$$\mathbf{hv_1(t) = \max(h_1(t), M)}$$

representan respectivamente la restricción del rango de las funciones $h_3(t)$ y $h_1(t)$ al intervalo de la ventana $[M, M + V]$.

Área de Total en la Ventana (**ATV**):

$$\mathbf{ATV = V * (ata - ama)}$$

Área de Sombreado sobre la Ventana (**ASV**):

$$\mathbf{ASV = ATV - ARV}$$

Proporción de Sombreado sobre la Ventana (**PSV**):

$$\mathbf{PSV = 1 - \frac{ARV}{ATV}}$$

Ejemplo

El desempeño original de un tejado y una barda ya instalados se evalúa antes de la aplicación del método mediante el cálculo de las sombras proyectadas sobre la fachada, con énfasis particular en la ventana. La representación gráfica del sombreado unidimensional a lo largo de un día solar permite observar a cada instante las zonas que permanecen en blanco, donde los dispositivos no proyectan sombra (Fig. 7.7). Las sombras de la barda y del tejado se complementan, en el sentido de que en la medida que va bajando la de la barda (hacia la base de la fachada), la del tejado va aumentando desde la base del tejado hacia el piso.

Una vez corregidas las dimensiones de los dispositivos conforme a un proyecto de sombreado, este tipo de gráfica permite verificar que los dispositivos satisfacen los requerimientos establecidos en dicho proyecto (Fig. 7.8).

Mediante el mismo programa de cómputo que muestra la gráfica correspondiente a cada caso, simultáneamente se calcula mediante la integración numérica el área entre las curvas de sombreado, para proporcionar un valor porcentual del índice del mejoramiento del sombreado a lo largo del día solar. En este ejemplo, la optimización mejoró en 11.4% el sombreado sobre la fachada y el de la ventana pasó 92.74% al 100% como estaba previsto en el de proyecto de sombreado.

Este ejemplo muestra la manera de cómo se genera un índice de evaluación de una vivienda, considerando no sólo sus condiciones de sombreado a lo largo de un día solar determinado, si no también a lo largo de todo el año o de un periodo de interés elegido por el usuario de esta metodología.

La representación gráfica sólo muestra el desempeño de los dispositivos durante un día solar determinado, a manera de verificación visual de las condiciones de la fachada. Sin embargo, el índice numérico permitirá la evaluación integral cualquiera que sea la situación de la vivienda y sus dispositivos de sombreado, si es que ya los tiene. Los

programas de cómputo se elaboran al máximo nivel de generalidad posible en cuanto a la ubicación de la vivienda (latitud del lugar) y su orientación (azimuth del muro), conforme a la metodología expuesta en la sección anterior.

La rigidez del método tiene la ventaja de que las condiciones impuestas en el proyecto de sombreado elegido, se cumplen no importando la orientación de la fachada ni el día del año. Para el caso de este ejemplo, en la Figura 7.9 se muestra como operan estos dispositivos durante los solsticios y los equinoccios en cuatro fachadas orientadas hacia los puntos cardinales, cuando se han modificado sus dimensiones originales de acuerdo al diagrama de isolíneas correspondiente al proyecto de sombreado de la Fig. 7.3c, esto es, garantizar sombra total en la vista de perfil justo cuando la sombra de la barda pega en el borde inferior de la ventana.

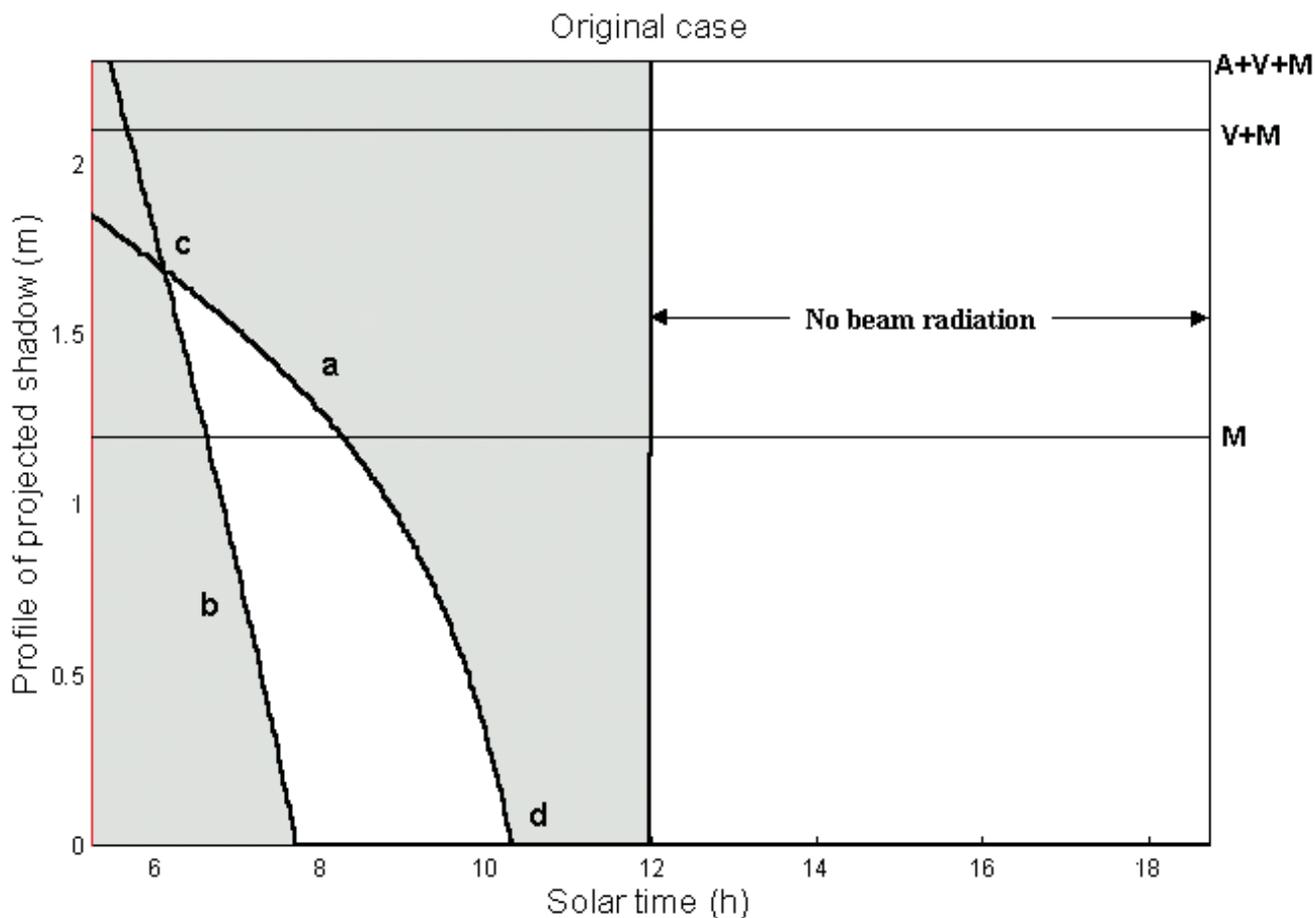


Figura 7.7. Evolución a lo largo de un día solar de los perfiles de las sombras proyectadas por una barda y un tejado que no han sido optimizados. El área entre las curvas a y b se representa en blanco para indicar que son las que en un instante dado no reciben sombra de ninguno de los dispositivos. El punto de intersección c de dichas curvas indica el momento en el que se dejan de sombrear completamente la fachada entre ambos dispositivos. El punto d representa el momento en el que la sombra del tejado alcanza el piso. Se usaron los siguientes datos: latitud 24°N, fachada hacia el Este, durante el 21 de junio, con los parámetros de construcción fijos: A=0.2 m, V=0.9 m, M=1.2 m y D=4.0 m; Los parámetros de sombreado originales fueron $\alpha=60^\circ$, T=0.9 m y H=2.5 m (tomado de Gómez-Muñoz & Porta-Gándara, 2002).

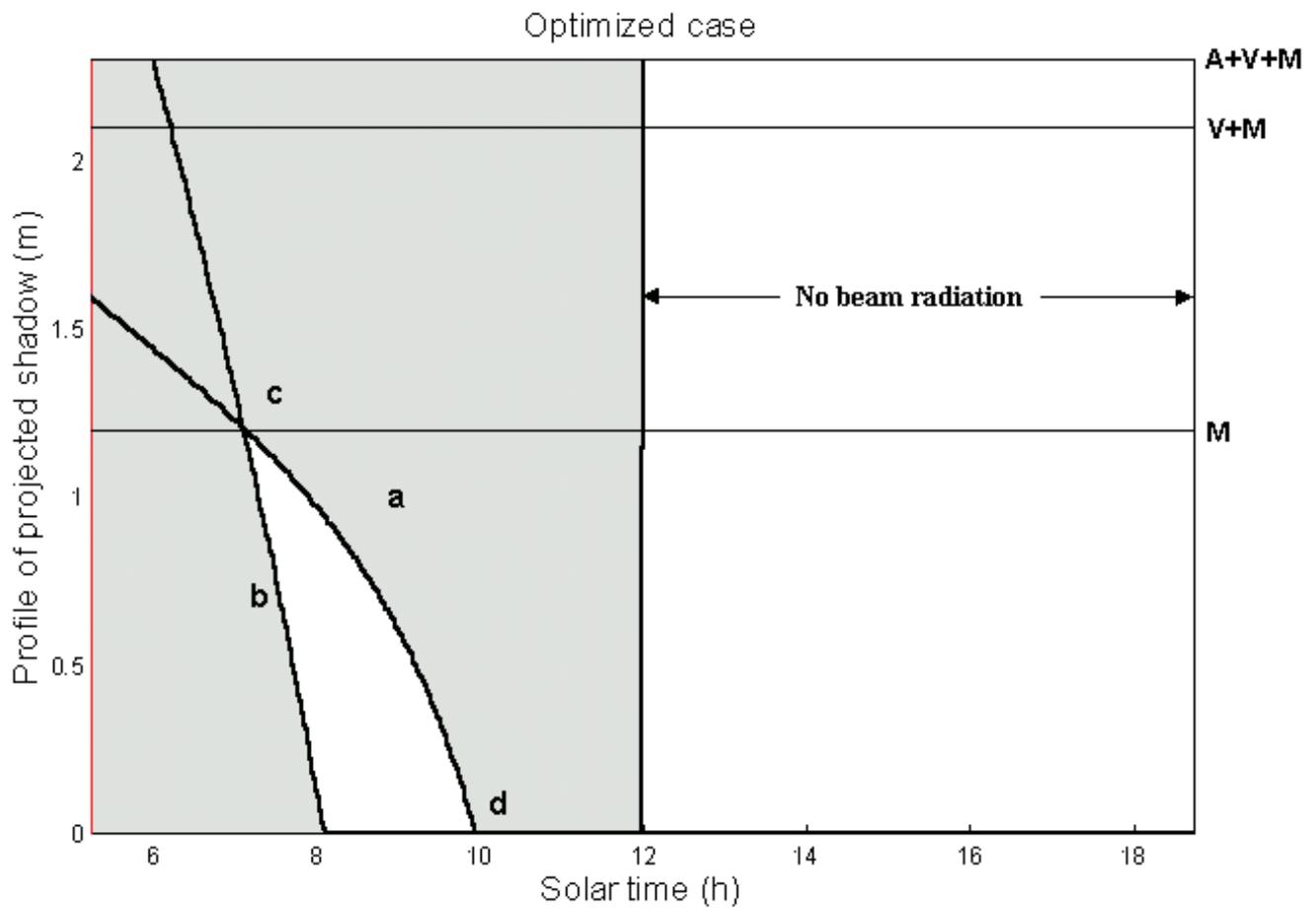


Figura 7.8. Desempeño del caso de la Fig. 7.7 después de la optimización. El punto de intersección c se ha desplazado justo a la base de la ventana, que desde esta perspectiva está completamente sombreada. Los parámetros optimizados a partir de la isólinea de $H=3.0$ m de la Fig. 2.4, fueron: $\alpha=50^\circ$, $T=1.1$ m y $H=3.0$ m (tomado de Gomez-Muñoz & Porta-Gándara, 2002).

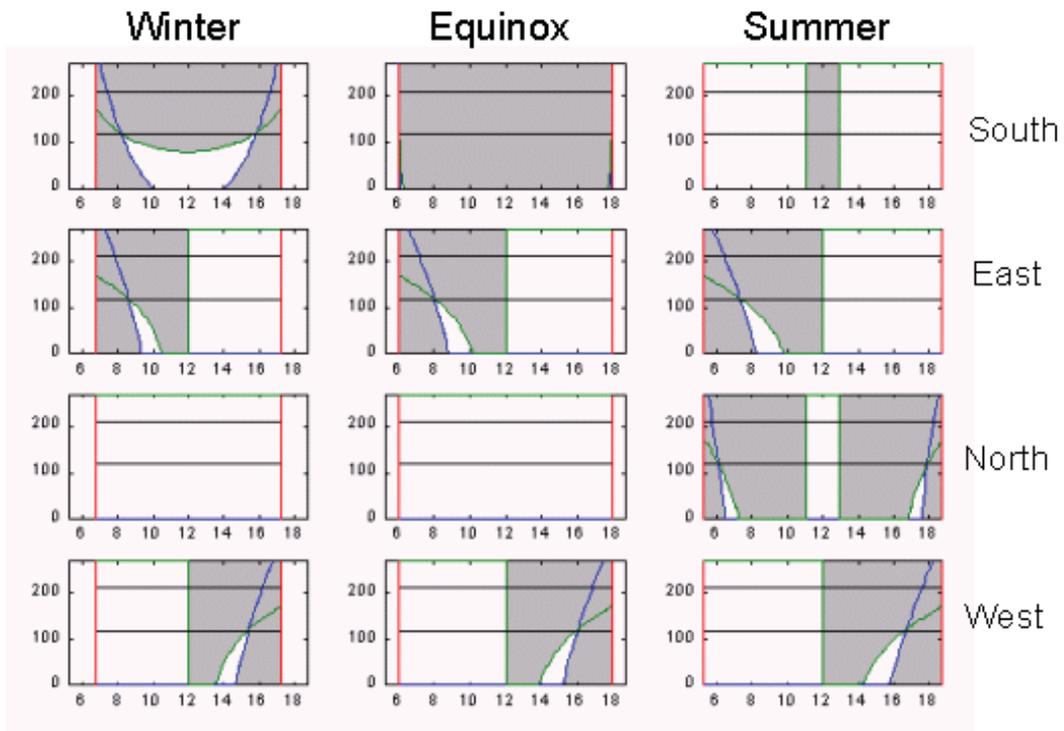


Figura 7.9. Desempeño de los dispositivos optimizados (Fig. 7.8), en fachadas orientadas hacia los puntos cardinales, durante el día solar correspondiente a los solsticios y los equinoccios. La solución al proyecto de sombreado $h1+h2=p$ y $h1=M$, para esta fachada se cumplió en todos los casos.

§ 7.2. Evolución Frontal del Sombreado

La validación del método unidimensional se realiza a través de la verificación del sombreado en la vista frontal de la fachada, donde se podrán calcular las áreas de las sombras que se están proyectando a cada instante de un día solar determinado. La condición del proyecto de sombreado que se haya elegido, se seguirá cumpliendo, pero en esta perspectiva se podrá observar y evaluar la dimensión no considerada.

Para esto se habrán de proporcionar las dimensiones arquitectónicas faltantes: anchos de la fachada y de la ventana, así como el largo del tejado (Fig. 7.10).

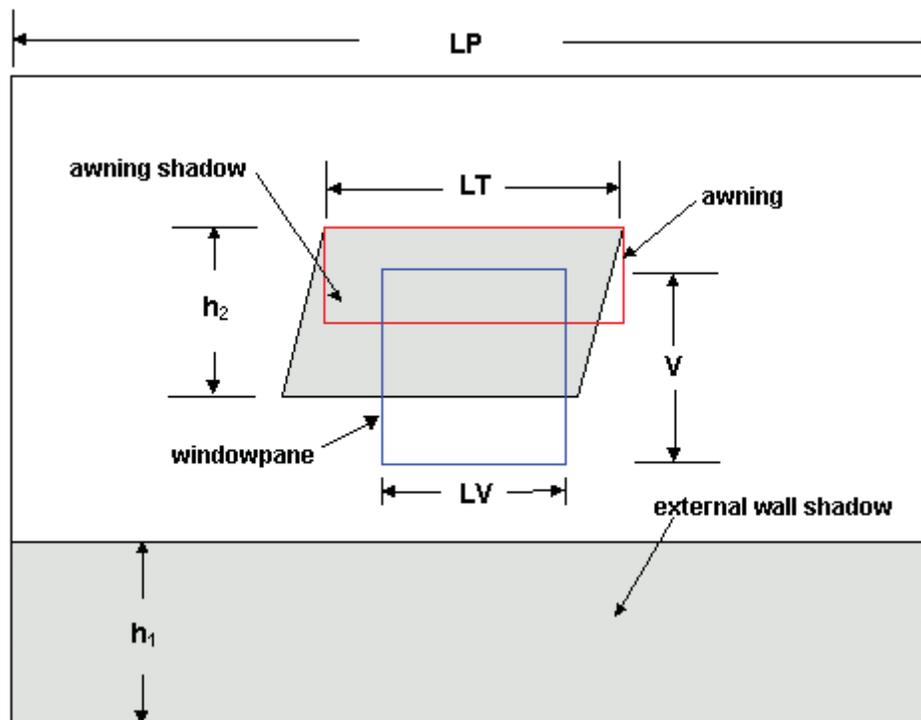


Figura 7.10. Medidas frontales de la fachada, la ventana y el tejado usadas para la verificación del desempeño de los dispositivos de sombreado sobre la superficie de la fachada.

El fundamento de un índice para evaluar el desempeño conjunto de un tejado y una barda como dispositivos de sombreado radica en el cálculo a cada instante del área de sombra, cuya integración a lo largo de cada día para todos los días del año se tomará en porcentaje respecto al total de radiación recibida por la fachada en ausencia de los dispositivos (Fig. 7.11).

En el caso de que ya exista un dispositivo de sombreado, se valorará de igual manera la situación inicial (Fig. 7.12) para ser comparada con el resultado después de la optimización (Fig. 7.13).

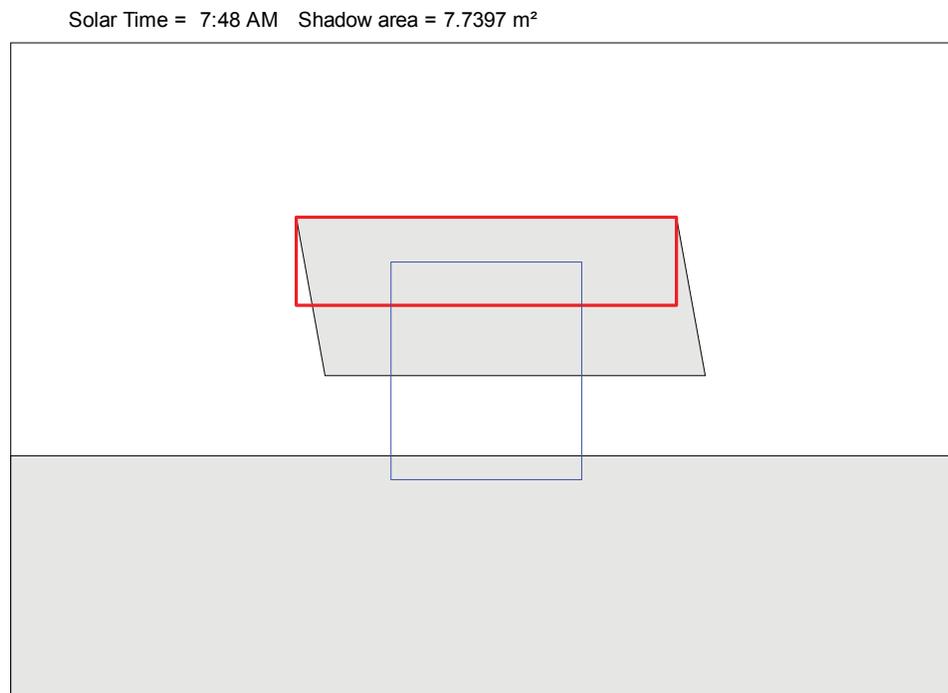


Figura 7.11. Esquema con sombra en el que se calcula a cada instante del día solar el área de sombra proyectada por ambos dispositivos. Se ejemplifica con una fachada orientada hacia el Este el 21 de marzo a las 7:48 h hora solar.

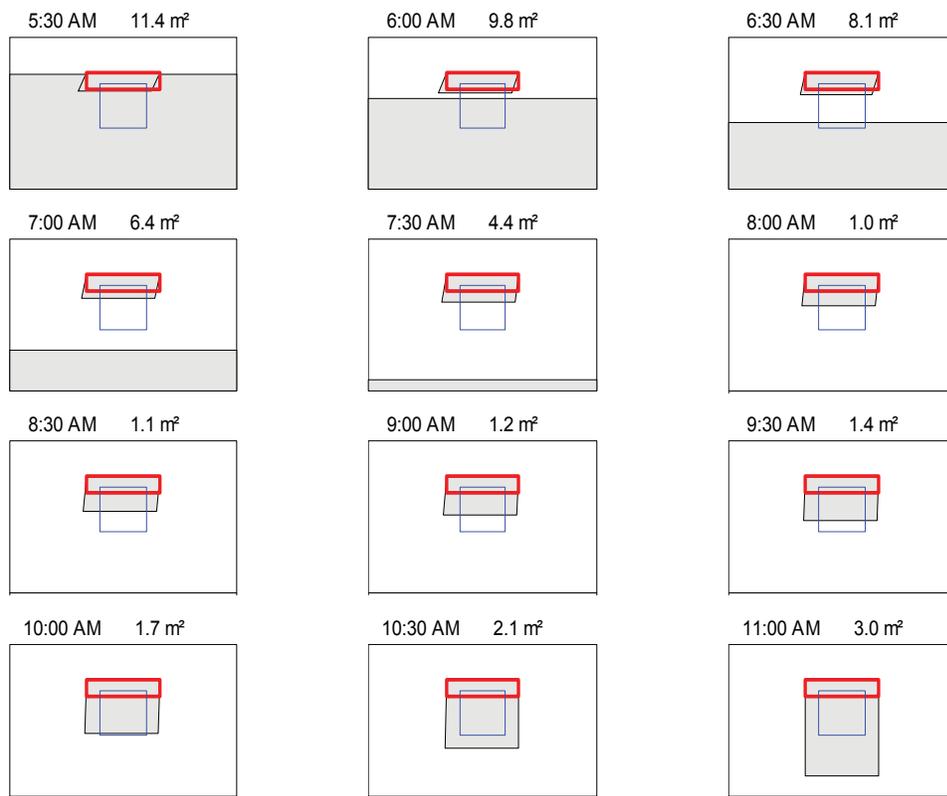


Figura 7.12. Vista frontal original de una fachada orientada hacia el Este durante el solsticio de verano ubicada a una latitud de 24°N.

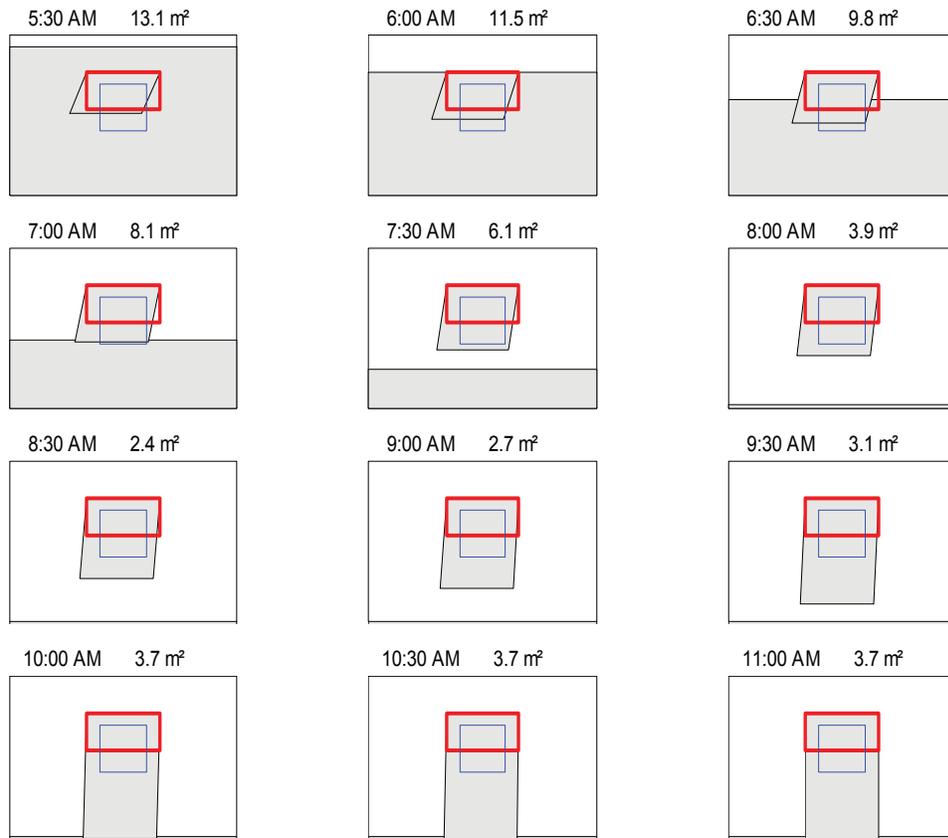


Figura 7.13. Vista correspondiente a la Fig. 7.12 después de la optimización.

Conclusiones

Desde el punto de vista teórico se propusieron nuevas metodologías y algunos algoritmos que contribuyen al conocimiento del desempeño solar de las viviendas a través del cálculo de la energía solar que recibe su envolvente y una opción de control solar derivada de la interacción entre las bardas y los tejados como dispositivos de sombreado de una fachada. A continuación se enumeran en orden de aparición los principales logros y resultados.

Deducción de los ángulos solares de perfil y frontal (expresiones 1.5 y 1.6). Estas fórmulas no son novedosas pero sí difíciles de encontrar en la literatura formal.

Uso de la brújula Brunton para la medición de ángulos solares y del azimut de una fachada, considerando las correcciones de la declinación magnética terrestre (Pags. 6 y 7).

Formulación de las ecuaciones de radiación solar, que incluyen específicamente un parámetro $I(t)$ de verificación de la incidencia solar sobre el plano, que no aparece en la bibliografía (expresión 1.12).

Algoritmo para el cálculo del parámetro $I(t)$, con valores de uno y cero, dependiendo de que el sol incida o no sobre el plano, respectivamente (expresiones 1.15, 1.16 y 1.17).

Generación de datos diarios de la radiación solar máxima media en una localidad específica a partir de los valores mensuales disponibles, a través del modelo de escalonamiento sinusoidal (Pag. 13).

Cálculo diario por estación del año y total del número de horas de incidencia solar y de la radiación solar directa sobre un techo horizontal y las fachadas para diferentes latitudes y orientaciones (Caps. 2 y 3).

Deducción del cálculo de la radiación solar para diferentes tipos de techos, sustentada en la formulación de la radiación sobre un plano inclinado, considerando las diferentes orientaciones aplicables para cada uno. Se comparan las radiaciones solares instantáneas sobre los techos a lo largo del día (Cap. 4).

Cálculo de la radiación solar sobre la envolvente de una vivienda, a partir de las contribuciones proporcionales en cuanto al área de sus diferentes componentes: fachadas y techo. Las viviendas se comparan entre sí en cuanto a la energía solar diaria recibida por la envolvente (Cap. 5).

Definición y cálculo del índice de desempeño solar (expresión 6.1), que se interpreta como la mejora en cuanto a reducción de la energía solar recibida por la envolvente de una vivienda dada respecto a una vivienda tipo, tomada como referencia. La definición se sustenta en la simetría encontrada en los valores de energía solar respecto al solsticio de verano, que permite hacer un cálculo promedio del desempeño a lo largo de la primavera y el verano. Este es el resultado de índole práctica más importante en este tema, por la facilidad que brinda a los constructores para calcular la energía solar recibida por la envolvente en el periodo más crítico del año. Además el concepto es generalizable a otras situaciones, que no sean las de climas cálidos y secos, como las que se consideraron en este trabajo (Cap. 6).

Se ofrecen ejemplos de aplicaciones prácticas de este concepto para analizar energéticamente diferentes casos: cambio en las dimensiones de la vivienda, optimización de la orientación y el tipo de techo de construcciones alargadas de una

planta, invariancia energética de las torres respecto al tipo de techo empleado, equivalencia energética con un domo de una vivienda con techo horizontal a la que se le incrementa la altura del techo, análisis detallado de los cambios de orientación de una vivienda con techo inclinado, influencia de la latitud en el desempeño solar de las cúpulas o domos y desempeño solar de una unidad habitacional donde se prueban distintos escenarios de sembrado o emplazamiento de las viviendas, cambios de orientación y del tipo de techo (Cap. 6).

En el capítulo 7 se muestra la metodología de control solar basada en la interacción entre una barda y un tejado, con un modelo general (expresión 7.1) que permite aplicar diferentes estrategias de sombreado (Fig. 7.3 y Tabla 7.1).

Finalmente en el Apéndice 1 aparece un modelo de generación de temperaturas del ambiente, a partir de dos senoides que describen la temperatura instantánea entre la máxima y la mínima del día. En ese mismo apéndice se explica la metodología estadística para encontrar patrones de la intensidad del viento.

La recomendación final derivada de estas conclusiones es que se pueden encontrar mejores opciones de construcción masiva de viviendas más acordes a los climas cálidos y áridos, que consideren otras geometrías del techo, principalmente los abovedados, con los que se puede lograr una disminución considerable de la energía solar recibida por la envolvente.

Bibliografía

- Adelard, L., H. Boyer, F. Garde & J.C. Gatina. 2000. A detailed weather data generator for building simulations. *Energy and Buildings* 31(1): 75-88.
- Al-Shareefa; F.M., D.J. Oldhamb & D.J. Carterb. 2001. A computer model for predicting the daylight performance of complex parallel shading systems. *Building and Environment* 36: 605-618
- Almanza Salgado, R. & F. Muñoz Gutiérrez. 1994. *Ingeniería de la Energía Solar*. El Colegio Nacional, México, 418 pp.
- Balaras, C.A. 1996. The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods. *Energy and Buildings* 24: 1-10.
- Bejan, A. 1984. *Convection Heat Transfer*. John Wiley and Sons, New York, 475 pp.
- Bindé, J. 1998. Cities and environment in the twenty-first century. A future-oriented synthesis after Habitat II. *Futures* 30(6): 499-518.
- Bird, R.B., W.E. Stewart & E.N. Lightfoot. 1982. *Fenómenos de Transporte*. Reverté, Barcelona (numeración por capítulos).
- Bojic, M., F. Yik & P. Sat. 2002. Energy performance of windows in high-rise residential buildings in Hong Kong. *Energy and Buildings* 34(1): 71-82.
- Boland, J. 1997. The importance of the stochastic component of climatic variables in simulating the thermal behaviour of domestic dwellings. *Solar Energy* 60(6): 359-366.
- Boland, J. 2002. The analytic solution of the differential equations describing heat flow in houses. *Building and Environment* 37(11): 1027-1035.
- Budin, R. & L. Budin. 1982. A mathematical model for shading calculations. *Solar Energy* 29(4): 339-349.
- Cervantes de Gortari, J. 1999. *Fundamentos de Transferencia de Calor*. UNAM, Fondo de Cultura Económica, México, 583 pp.
- Coch, H. 1998. Bioclimatism in vernacular architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2(1-2): 67-87.
- Colombo, R. 1995. *Architecture Solaire Passive pour la région Méditerranée*. Centre Commun de Recherche. Commission Européenne (sin numeración).
- 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. & W.A. Beckman. 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, New York, 827 pp.
- Fathy, H. 1973. *Architecture for the Poor. An Experiment in Rural Egypt*. The University of Chicago Press, Chicago, 232 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.
- Fernández Zayas, J.L. 1987. *Introducción el Estudio de los Sistemas Solares Activos*. Series del Instituto de Ingeniería 26, UNAM, México, 109 pp.

- Florides, G.A., S A. Tassou, S.A. Kalogirou & L.C. Wrobel. 2001. Evolution of domestic dwellings in Cyprus and energy analysis. *Renewable Energy* 23(2): 219-234.
- Florides, G.A., S A. Tassou, S.A. Kalogirou & L.C. Wrobel. 2002. Review of solar and low energy cooling technologies for buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6(6): 557-572.
- Fuentes, M. & S. Roaf. 1996. The oxford solar house. *Renewable Energy* 8(5): 145-153.
- Gadsden, S., M. Rylatt, K. Lomas & D. Robinson. 2003. Predicting the urban solar fraction: a methodology for energy advisers and planners based on GIS. *Energy and Buildings* 35(1): 37-48.
- Garde-Bentaleb, F., F. Miranville, H. Boyer & P. Depecker. 2002. Bringing scientific knowledge from research to the professional fields: the case of the thermal and airflow design of buildings in tropical climates. *Energy and Buildings* 34(5): 511-521.
- Gómez-Muñoz, V.M. & M.A. Porta-Gándara. 2002. Local wind patterns for modeling renewable energy systems by means of cluster analysis techniques. *Renewable Energy* 25(2): 171-182.
- Gómez-Muñoz, V.M. & M.A. Porta-Gándara. 2003. Simplified architectural method for solar control optimization of awnings and external walls in houses in dry and hot climates. *Renewable Energy* 28(1): 111-128.
- Gratia, E. & A. De Herde. 2001. A simple design tool for the thermal study of dwellings. *Energy and Buildings* 34: 411-420.
- Hawkes, D. 1995. Towards the sustainable city, *Renewable Energy*: 6(3): 345-352.
- 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.
- Imbabi, M.S. & A. Musset. 1996. Performance evaluation of a new hybrid solar heating and ventilation system optimized for U.K. weather conditions. *Building and Environment* 31(2): 145-153.
- Jaber, J.O. 2002. Prospects of energy savings in residential space heating. *Energy and Buildings* 34(4): 311-319.
- Jaggs, M. & J. Palmer. 2000. Energy performance indoor environmental quality retrofit — a European diagnosis and decision making method for building refurbishment. *Energy and Buildings* 31(2): 97-101.
- Källblad, K. 1998. Thermal models in buildings. Determination of temperatures, heating and cooling loads. Theories, models and computer programs. Doctoral dissertation, Lund University, Sweden, 144 pp.
- Källblad, K. 1999. A New Approach on Shading of Solar Radiation: Theory and Implementation in a Computer Program. In: Proc. of the 5th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, August 24-26, Göteborg (Sweden), Vol. 2: 497-504.
- Karlsson, J., A. Roos & B. Karlsson. 2003. Building and climate influence on the balance temperature of buildings. *Building and Environment* 38(1): 75-81.
- Khedari, J., W. Mansirisub, S. Chaima, N. Pratinthong & J. Hirunlabh. 2000. Field measurements of performance of roof solar collector. *Energy and Buildings* 31(3): 171-178.

- Knowles, R.L. 2003. The solar envelope: its meaning for energy and buildings. *Energy and Buildings* 35(1): 15-25
- Kuhn, T.E., C. Buhler & W.J. Platzer. 2000. Evaluation of overheating protection with sun-shading systems. *Solar Energy* 69(1-6): 59-74.
- Labaki, L.C. & D.C.C.K. Kowaltowski. 1998. Bioclimatic and vernacular design in urban settlements of Brazil. *Building and Environment*: 33(1): 63-77.
- Lee, W.L., F.W.H. Yik & P. Jones. 2003. A strategy for prioritising interactive measures for enhancing energy efficiency of air-conditioned buildings. *Energy* 28: 877-893.
- McCluney, R. 1986. Awning Shading and Algorithm for Window Energy Studies, ASHRAE Transactions 92(1): 430-438.
- McCluney, R. 1990. Awning Shading Algorithm Update, ASHRAE Transactions 96(1): 34-38.
- McCluney, R. 1991. The Death of the Shading Coefficient? ASHRAE Journal, March 1991: 36-45.
- McCluney, R. & M. Houston. 1983. Fenestration Design and Building Shading, Chapter 5, Principles of Low Energy Building Design in Warm, Humid Climate. Florida Solar Energy Center (sin numeración).
- Niewianda, A. & F.D. Heidt. 1996. SOMBRERO: a PC-tool to calculate shadows on arbitrarily oriented surfaces. *Solar Energy* 58(4-6): 253-263.
- Olofsson, T. & S. Andersson. 2001. Long-term energy demand predictions based on short-term measured data. *Energy and Buildings* 33(2): 85-91.
- Peuportier, B.L.P. 2001. Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context. *Energy and Buildings* 33(5): 443-450.
- Pfrommer, P., K.J.Lomas & C. Kupke. 1996. Solar radiation transport through slat-type blinds: a new model and its application for thermal simulation of buildings. *Solar Energy* 57(2): 77-91.
- Porta-Gándara, M.A, E. Rubio, J.L. Fernández & V. Gómez-Muñoz. 2002a. Effect of passive techniques on interior temperature in small houses in the dry, hot climate of northwestern Mexico. *Renewable Energy* 26(1): 121-135.
- Porta-Gándara, M.A., E. Rubio & J.L. Fernández. 2002b. Economic feasibility of passive ambient comfort in Baja California dwellings. *Building and Environment* 37: 993-1001.
- Quaschnig, V. & R. Hanitsch. 1998. Irradiance calculation on shaded surfaces. *Solar Energy* 62(5): 369-375.
- Ratnaweera, Ch. & A.G. Hestnes. 1996. Enhanced cooling in typical Sri Lankan dwellings. *Energy and Buildings* 23(3): 183-190.
- Reilly, M.S., D.K. Winkelmann & W.L. Arasteh. 1995. Modeling windows in DOE-2.1E. *Energy and Buildings* 22(1): 59-66.
- Rodríguez Viqueira, M., A. Figueroa Castrejón, V. Fuentes Freixanet, G. Castorena Espinosa, V. Huerta Velázquez, J.R. García Chávez, F. Rodríguez Manso, L.F. Guerrero Baca. 2001. Introducción a la Arquitectura Bioclimática. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco y LIMUSA, México, 204 pp.

Rousseau, P.G. & E.H. Mathews. 1996. A new integrated design tool for naturally ventilated buildings. *Energy and Buildings* 23: 231-236.

Rudofsky, B. 1987. *Architecture without Architects. A Short Introduction to Non-Pedigreed Architecture*. University of New Mexico Press, Albuquerque, 156 pp.

Talmatamar, T., M. Alhabobi, Y. Sfaxi & C. Awanto. 1995. Analysis of solar radiation for sunlit glass shaded by vertical adjustable flat slats. *Renewable Energy* 6(7): 663-671.

Thomas, L.C. *Heat Transfer*. 1992. Prentice Hall, New Jersey, 804 pp.

Trombe, A., L. Serres & M. Moisson. 1999. Solar radiation modelling in a complex enclosure. *Solar Energy* 67(4-6): 297-307.

Van Lengen, J. 1981. *Manual del Arquitecto Descalzo*. Árbol Editorial, México, 541 pp.

Apéndice 1

Parámetros Ambientales

Para la elección correcta de los proyectos de construcción de una vivienda, es necesario considerar tanto las condiciones climáticas de la región como el desempeño de la construcción en cuanto a los parámetros ambientales de los que depende el confort: temperatura, viento, humedad y radiación solar. En este contexto se presenta un método para la generación de datos sintéticos de temperatura y un método para la clasificación de la intensidad del viento en el ambiente exterior de la vivienda, con referencia a la Cd. de La Paz. En el Capítulo 1 se presenta la formulación de la radiación solar. El tema de la humedad no se aborda.

Temperatura

La temperatura ambiente se modeló a partir de una función compuesta por dos sinusoides cuyos parámetros (frecuencia, amplitud y fase) dependen de la duración del día solar y de la máxima temperatura diaria. El modelo fue aplicado por Porta-Gándara et al. (2002, 1) y Porta-Gándara et al. (2002, 2) para incorporar este parámetro en los cálculos de transferencia de calor hacia el interior de las viviendas. La utilidad práctica de esta modelación radica en la comprensión de las variaciones diarias de temperatura a lo largo de un día, en las que partir de observaciones históricas, las temperaturas durante el día solar ascienden muy rápido hasta el valor máximo y después descienden paulatinamente hasta llegar al mínimo. Se presenta a continuación la deducción del modelo.

Modelo Generador de Temperaturas Sintéticas

Supuestos: (1) Entre la hora H_m a la que ocurre la temperatura mínima T_m del día y la hora H_M a la que ocurre la temperatura máxima T_M , la temperatura sigue la mitad de un periodo P_1 de un senoide; (2) Entre H_M y la siguiente ocurrencia de T_m , a las $H_m + 24$ horas, la temperatura sigue la mitad de un periodo P_2 de otro senoide; (3) La hora H_m a la que ocurre la temperatura mínima ocurre k horas antes de la hora del amanecer ama , es decir $H_m = ama - k$; (4) para un día del año dado y una latitud determinada, se conoce ama .

De los supuestos anteriores se derivan:

$$P_1 = 2 * (H_M - H_m) \text{ \& } P_2 = 48 - P_1$$

Cambio de escala del eje de temperatura. Dado que para cualquier periodo P :

$$Y = \text{sen} (2\pi * x / P) \in [- 1, 1]$$

entonces

$$(y + 1) * (T_M - T_m) / 2 + T_m \in [T_m, T_M].$$

La expresión anterior equivale a

$$y * (T_M - T_m) / 2 + (T_M + T_m) / 2$$

así que poniendo:

$$A = (T_M - T_m) / 2 \text{ \& } B = (T_M + T_m) / 2$$

se obtiene el modelo:

$$y = A * \text{sen} (2\pi x / P) + B$$

Cambio de escala en el eje del tiempo. Para el primer senoide, dado

$$h \in [H_m, H_M]$$

se requiere:

$$x = P_1 \frac{h - H_m}{2(H_M - H_m)} - \frac{P_1}{4} \in \left[-\frac{P_1}{4}, \frac{P_1}{4} \right]$$

Análogamente para el segundo senoide, dado

$$h \in [H_M, H_m + 24]$$

sustituyendo en el modelo

$$x = P_2 \frac{h - H_M}{2(H_m + 24 - H_M)} + \frac{P_2}{4} \in \left[\frac{P_2}{4}, \frac{3P_2}{4} \right]$$

se obtiene la fluctuación deseada de la temperatura en el segundo intervalo.

Viento

Para el estudio de la arquitectura bioclimática en general, se requiere hacer la consideración del viento en relación con las estrategias de ventilación natural que se diseñen. A continuación se explica la metodología desarrollada para la clasificación de los patrones de la intensidad del viento preponderante en un lugar, en referencia a la Cd. de La Paz. Estos patrones permitirían, entre otras cosas, calcular las tasas de sustitución del volumen de aire contenido por la envolvente de una construcción.

También es necesario determinar los patrones preponderantes de la dirección del viento en función de la época del año. Sobre este particular, sólo se dispone de las “Rosas de los Vientos” de las cartas meteorológicas en las que se representa la frecuencia e intensidad del viento en cada dirección conforme a datos históricos. En estaciones terrestres son escasas las representaciones de este tipo, a pesar de que sí se dispone de la información histórica. Aunque esto no se realizó, es posible que también este aspecto pudiera ser abordado con la misma metodología que se aplicó a la intensidad del viento.

Patrones de la Intensidad del Viento

Los patrones representativos de la intensidad del viento de la Cd. de La Paz, fueron determinados a partir de los datos diarios, registrados en la estación meteorológica del CIBNOR durante 1997, en periodos de 10 min. Las series de tiempo diarias se clasificaron por medio de la técnica de análisis de grupos (*Cluster Analysis*), aplicada en dos etapas, encontrándose cuatro patrones de intensidad del viento representativos, cada uno asociado a épocas del año bien definidas (Gómez-Muñoz & Porta-Gándara, 2002).

Referencias

Gómez-Muñoz, V.M. & M.A. Porta-Gándara. 2002. Local wind patterns for modeling renewable energy systems by means of cluster analysis techniques. *Renewable Energy* 25: 171-182.

Porta-Gándara, M.A., E. Rubio & J.L. Fernández. 2002. Economic feasibility of passive ambient comfort in Baja California dwellings. *Building and Environment*: 37: 993-1001.

Porta-Gándara, M.A., E. Rubio, J.L. Fernández & V. Gómez Muñoz. 2002. Effect of passive techniques on interior temperature in small houses in the dry, hot climate of northwestern México. *Renewable Energy* 26: 121-135.

Apéndice 2

Trayectorias Solares Aparentes

Diagramas de bóvedas celestes para distintas latitudes representando la trayectoria aparente del sol cada hora, desde el amanecer hasta el atardecer, durante los solsticios y los equinoccios. En el diámetro que va de norte a sur se observa el momento cuando el sol atraviesa el plano del meridiano local, al mediodía solar. Los círculos concéntricos representan la elevación del sol en intervalos de 10° , desde los 0° en el horizonte, hasta el punto de los 90° en el centro del diagrama, que representa el cenit. Los ángulos de los radios representan el azimut con referencia a un ángulo de 0° , que indica el Sur, en intervalos de 10° . Se muestra la longitud del día solar SDL en cada caso. El programa de cómputo permite ubicar una fachada, en el centro del diagrama, de orientación arbitraria señalada con un segmento perpendicular. En las tablas se usa un azimut de 0° a manera de ejemplo.

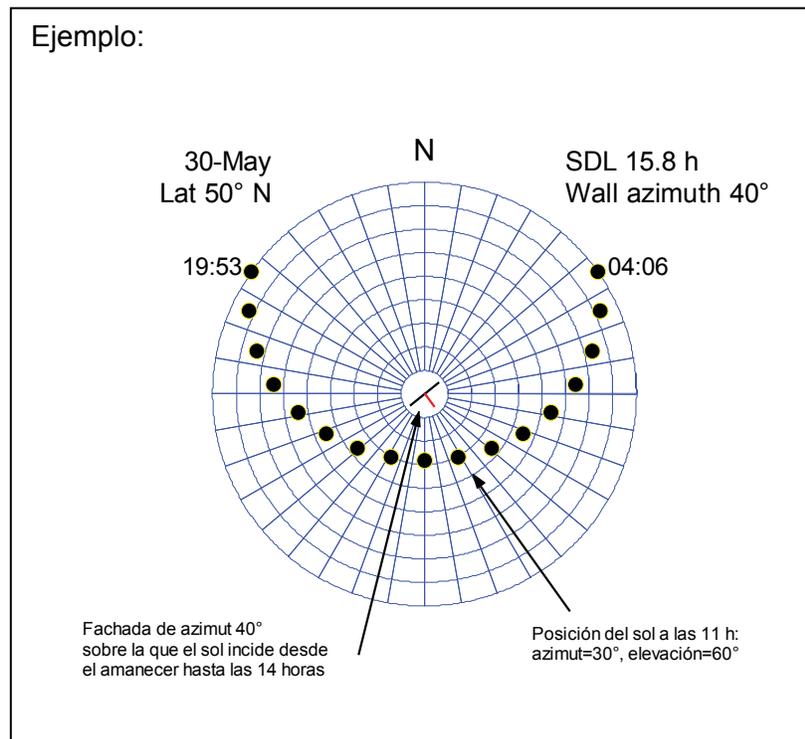


Tabla A2-1. Trayectoria aparente del sol durante el solsticio de verano, un equinoccio y el solsticio de invierno correspondiente a las latitudes 40°N y 24°N. Se indican la longitud del día solar (SDL), el azimut del muro y las horas del amanecer y el atardecer.

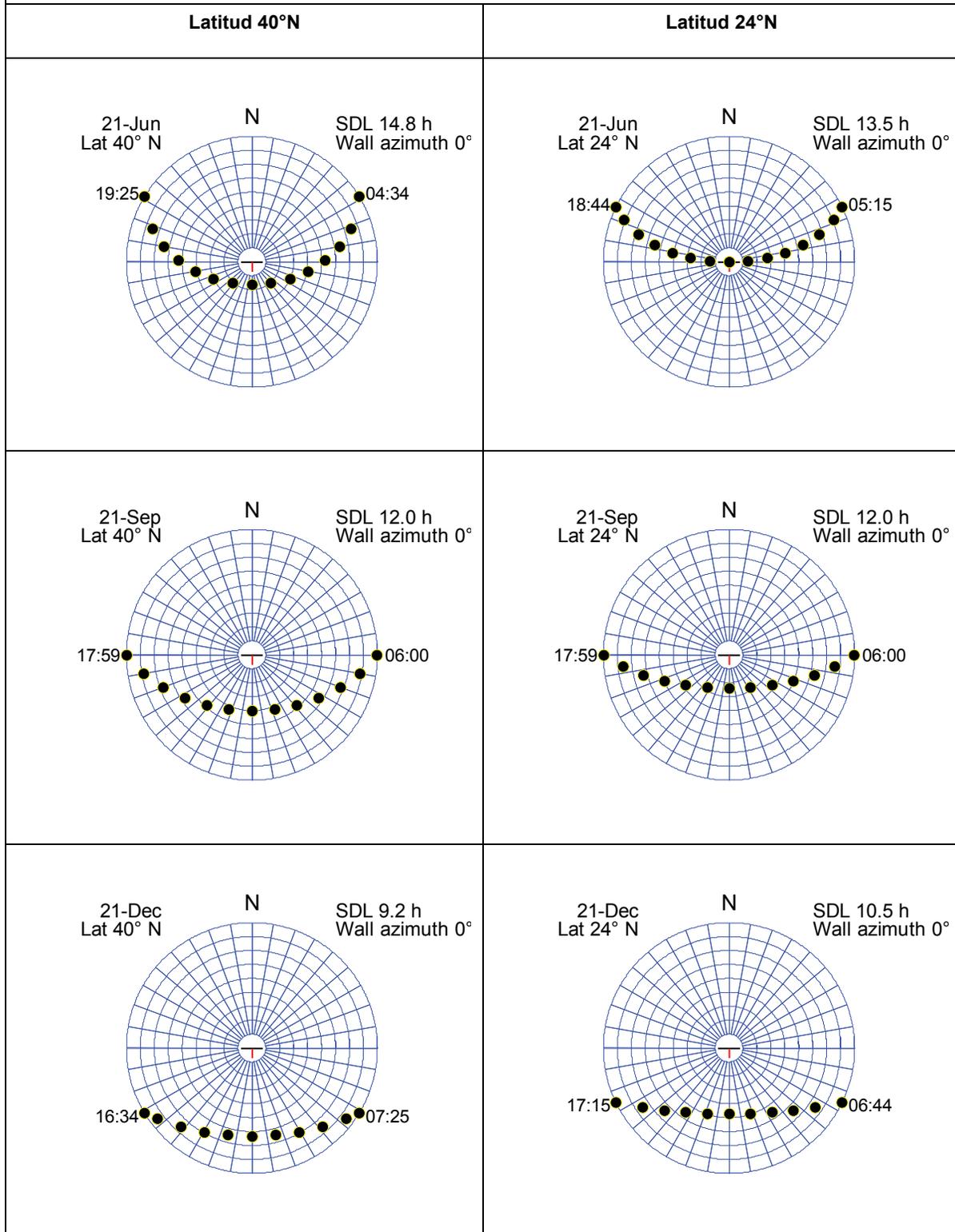


Tabla A2-2. Trayectoria aparente del sol durante el solsticio de verano, un equinoccio y el solsticio de invierno correspondiente a las latitudes 19.5°N y 5°N. Se indican la longitud del día solar (SDL), el azimut del muro y las horas del amanecer y el atardecer.

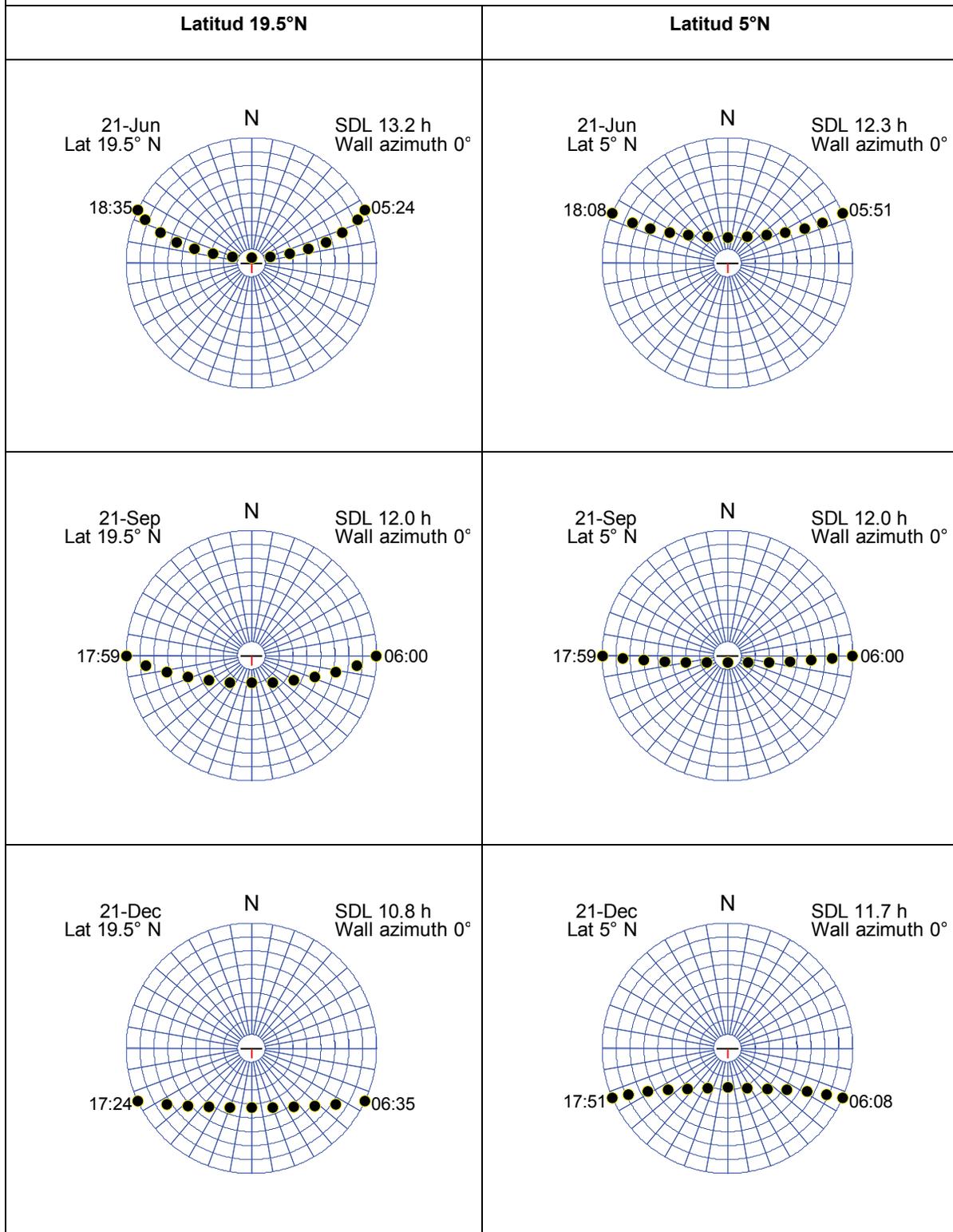
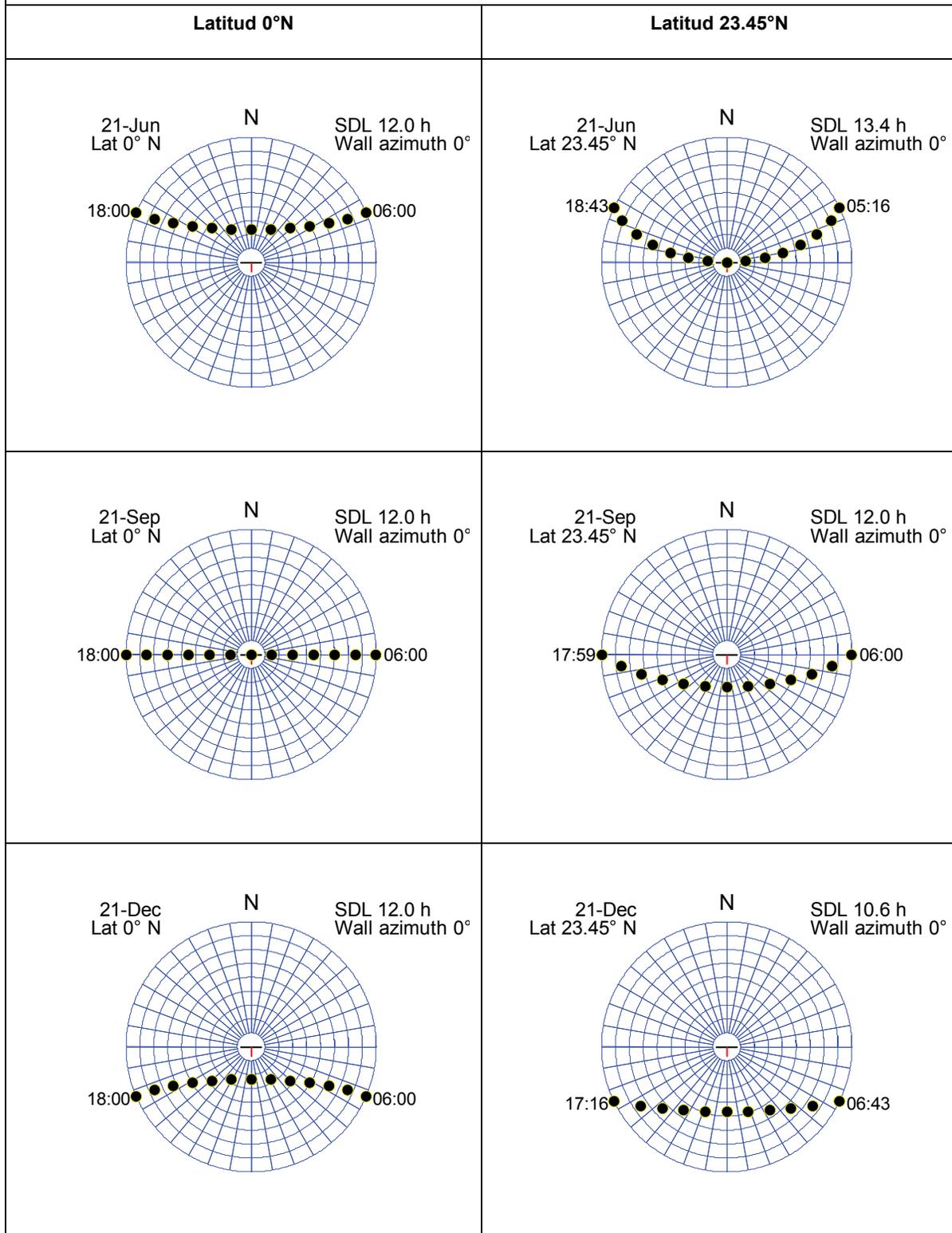


Tabla A2-3. Trayectoria aparente del sol durante el solsticio de verano, un equinoccio y el solsticio de invierno correspondiente al Ecuador y al Trópico de Cáncer. Se indican la longitud del día solar (SDL), el azimut del muro y las horas del amanecer y el atardecer.



Apéndice 3

Variaciones Porcentuales de la Energía sobre un Techo Inclinado proveniente de la Radiación Solar Directa

En cada gráfica (referida a una latitud y a una inclinación del techo determinadas) el cien por ciento se asigna al máximo de la energía en MJ/m² para todos los días del año y todas las orientaciones posibles del techo.

Viendo todas las gráficas en conjunto como un arreglo matricial, las variaciones debidas a la inclinación del techo se muestran en cada columna de gráficas correspondientes a una latitud dada (0°N, 5°N,..., 40°N y 45°N). Las variaciones debidas a la latitud se muestran en cada renglón o tira de gráficas para una inclinación de techo fija (10°, 30° y 45°).

