

Métodos experimentales, utilidades informáticas y dispositivos para la iluminación natural de los edificios

Alfonso Soler y Pilar Oteiza

RESUMEN

Se presenta el estado actual de la investigación, desarrollo y puesta en funcionamiento de dispositivos para la iluminación natural, lateral y cenital, de los edificios. Se indican los dispositivos experimentales y las utilidades informáticas que son necesarias para la evaluación de dichos dispositivos. Por último se describen los trabajos a realizar por la Agencia Internacional de la Energía dentro de la "Task 21", "Daylight in Buildings" (1995-1999).

ABSTRACT

Experimental methods, computer programs and instruments for natural lighting in buildings

A review of recent research and development in daylight devices for unilateral and zenithal lighting of buildings is presented. The experimental Laboratory and the software necessary to evaluate these devices is also introduced. In the final part of the paper a summary is given of the work to be performed under the aegis of the International Energy Agency in the Task 21: Daylight in buildings.

DESCRIPTORES

Confort térmico
Confort visual
Edificaciones
Espacios interiores
Iluminación
Utilidades informáticas

INTRODUCCIÓN

En este artículo revisaremos algunos de los trabajos realizados y de los que están actualmente en curso, para desarrollar y evaluar dispositivos para la iluminación lateral y cenital que permitan una mejor utilización de la luz natural en los espacios interiores de los edificios, con la consiguiente posibilidad de reducción del consumo de energía eléctrica, asegurando siempre las condiciones de «confort» térmico y visual, y mejorando la calidad arquitectónica de dichos espacios. Un examen de los desarrollos efectuados a nivel internacional sugiere que hace falta todavía bastante trabajo para que puedan ponerse a disposición del Arquitecto resultados definitivos relativos a estos sistemas, pero en pocos años esta aportación podría hacerse realidad. A este efecto la Unión Europea, y la Agencia Internacional de la Energía (I.E.A.), han puesto en marcha sendos programas de investigación sobre la Iluminación Natural de los Edificios.

Para introducir el tema nos referiremos primero a las instalaciones experimentales y las utilidades informáticas que se emplean para evaluar dichos dispositivos. A continuación revisaremos distintos dispositivos existentes y los resultados de los que se dispone en la actualidad relativos a su funcionamiento. Por último indicaremos brevemente las actividades a desarrollar dentro de la Task 21 de la I.E.A., «Daylight in Buildings»

LABORATORIO DE ILUMINACIÓN NATURAL

La concepción y dimensionamiento de los sistemas para la iluminación natural puede realizarse para edificios ya existentes, o utilizando modelos a escala 1:1 que imiten los locales de interés. Más común es utilizar maquetas a escalas 1:10 - 1:25. Los mecanismos de reflexión de la luz no son sensibles a los fenómenos de

escala: la longitud de onda de la radiación incidente (380-780 nanómetros) es muchísimo más pequeña que las dimensiones de las maquetas y de los edificios reales. Es por tanto posible determinar la distribución de la luz en un local a partir de una maqueta de éste, a condición de respetar la escala y las propiedades fotométricas (a menudo poco conocidas) de los materiales utilizados.

En las maquetas pueden realizarse medidas de factores de luz de día con la instrumentación adecuada, o visualizarse ambientes luminosos. Pueden estar situadas en el exterior de los edificios, pero para emplear un tiempo menor en los estudios es conveniente realizarlos en un espacio interior, en el que es necesario reproducir fielmente las características luminosas de las fuentes de luz natural, compuesta principalmente de la que procede directamente del Sol (fuente de luz directa) y de la procedente de la bóveda celeste (fuente de luz difusa).

El simulador de luz directa debe reproducir las características de la luz natural que nos llega proveniente del Sol, que se distingue por tener una composición espectral próxima a la de un cuerpo negro (5.700 K), rayos luminosos emergentes paralelos, y una iluminación uniforme sobre el plano horizontal (hasta aproximadamente 100 Klux).

El simulador de luz difusa (cielo artificial) debe poder reproducir dicha radiación para todo tipo de cielo (cubierto uniforme, cubierto CIE, despejado CIE, intermedio CIE, cielo estadístico determinado para el lugar en cuestión mediante medidas de luminancias). Para realizar las medidas, la maqueta se sitúa en presencia de los simuladores fijos de luz natural directa y difusa, montada en un heliodón, aparato que mediante movimientos en torno a dos ejes permite simular cualquier altitud y acimut del Sol.

Por otra parte, para el estudio de la influencia de diferentes dispositivos ópticos, o de una apertura cualquiera en la distribución de la luz natural en un recinto, para la evaluación del confort visual, y para la determinación del posible ahorro de energía derivado de una mejor utilización de la luz natural, se necesitan entre otros medios: cámara fotográfica con objetivo «fish-eye» y grandes angulares, luxómetros-colorímetros, colorímetro de superficie; cámara CCD de alta definición equipada con endoscopio y dispositivo de amplificación, unidad de tratamiento de imágenes; software para el cálculo de índices de confort visual, de la probabilidad de "confort" visual y de la fracción prevista de sujetos visualmente insatisfechos; sistemas para el seguimiento continuo del consumo de energía eléctrica, fotogoniómetro para la medida de los factores bidireccionales de transmisión y reflexión de los materiales utilizados, etc.

UTILIDADES INFORMÁTICAS

Para la concepción y evaluación de sistemas para la iluminación natural es necesario disponer de utilidades informáticas que permitan simular la propagación de la luz natural a través de estos sistemas y en el interior de los locales. La más completa que existe actualmente para conseguir este objetivo y en general para estudios relativos a la iluminación natural, es a nuestro entender el ADELIN (Advanced Daylighting and Electric Lighting Integrated New Environment), finalizado en 1994. Ha sido desarrollado en la «Task 12» de la Agencia Internacional de la Energía: «Building Energy Analysis and Design Tools». ADELIN integra programas de cálculo de iluminación natural ya existentes, y está compuesto por:

1. Un programa de Diseño Asistido por Ordenador, llamado SCRIBE MODELLER, cuya principal ventaja está en su simplicidad, puesto que no incluye más que una sola entidad elemental: la línea.

2. Una base de datos fotométricos (factores de reflexión global, especular y difusa, coordenadas cromáticas, factores de transmisión global y difusa).

3. Un convertidor de datos geométricos y fotométricos llamado PLINK.

4. Un programa simplificado de cálculo de la iluminación natural basado en el método de la radiosidad, que trata los intercambios radiactivos que se dan en un recinto entre superficies perfectamente difusoras. Este programa, llamado SUPERLITE, concebido originalmente para la investigación de la luz natural en el programa SPACELAB, permite evaluar los niveles de iluminación natural en el plano de trabajo y la distribución de luminancias en las paredes del local (sólo la luminancia es perceptible para el ojo humano).

5. Un programa llamado SUPERLINK, que utiliza los valores de las iluminancias calculadas por SUPERLITE para determinar la potencia eléctrica consumida por una instalación de luz artificial, condicionada en su funcionamiento por sistemas de control que actúen según el nivel de iluminación natural existente. Los valores horarios del consumo eléctrico resultante de suplementar a la luz natural con luz artificial pueden transferirse, para realizar un análisis energético detallado del edificio, a programas de simulación térmica, como el ESP, el DOE 2, el TSB13, etc.

6. Un programa llamado RADIANCE, que se usa para realizar estudios detallados de iluminación natural. Utiliza la técnica de "lanzar" rayos en sentido inverso a su dirección natural de propagación, partiendo del punto de vista del observador. RADIANCE permite obtener con calidad fotográfica imágenes de síntesis de ambientes luminosos en locales, determinar isolíneas para los factores de luz de día, y la evaluación del "confort" visual.

FIGURA 1

La «chimenea de luz», dispositivo para la iluminación natural que permite captar un flujo de luz, conducirlo hacia el interior del edificio y distribuirlo de forma apropiada en los lugares de interés.

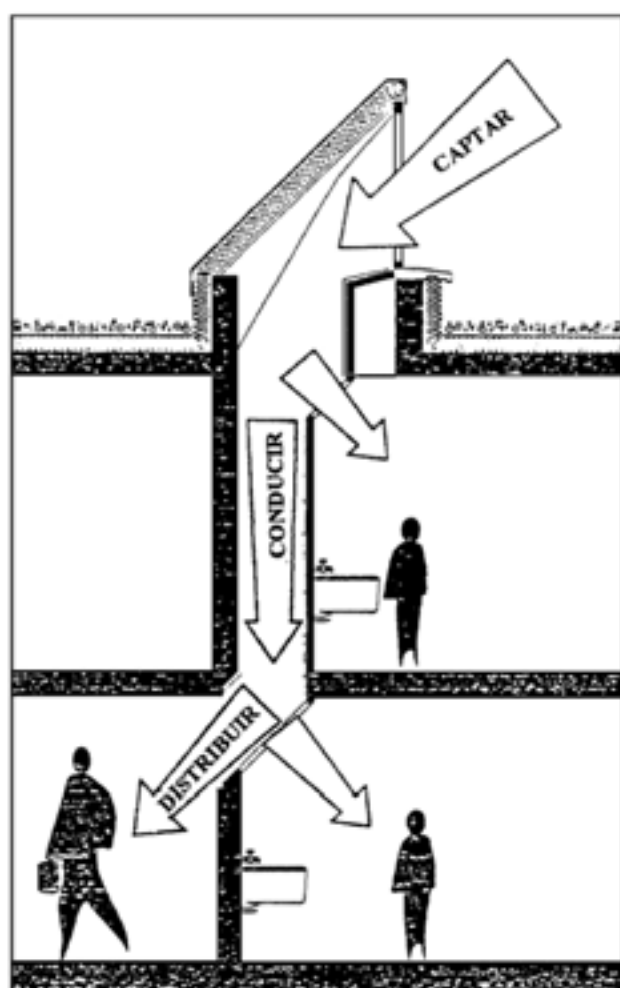
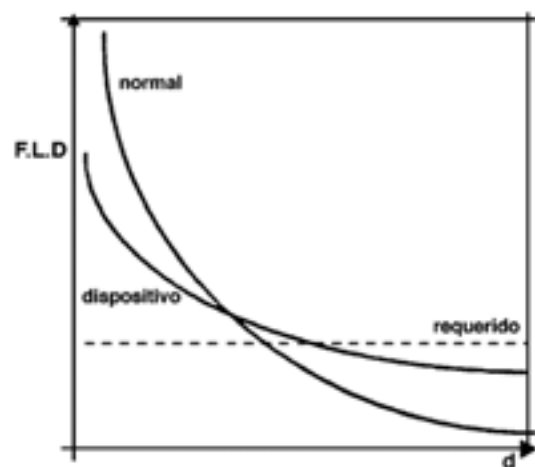


FIGURA 2

Un dispositivo para la iluminación natural tiende a distribuir uniformemente el flujo de luz natural en el local, aumentando por tanto los niveles en las partes más alejadas de la ventana con respecto a los que se obtienen sin dispositivo.



En cuanto a los datos climáticos, el programa PLINK permite especificar la distribución de luminancias necesarias para el programa SUPERLITE. Para el programa RADIANCE los datos deben ser especificados en el propio programa, debido a una mayor complejidad de los ficheros de entrada en este caso.

DISPOSITIVOS PARA LA ILUMINACIÓN LATERAL

La envolvente del edificio, y en particular la parte acristalada es el mediador medioambiental entre el clima externo y el clima interno. La introducción y manipulación de la luz de día es muy importante para reducir la necesidad de luz artificial y crear un medio interno visual adecuado. No obstante, las ventanas deben cumplir otras funciones tales como: permitir la visión del exterior, limitar las pérdidas de calor, controlar las ganancias solares, y evitar el deslumbramiento. La mayoría de los dispositivos para la protección solar están diseñados para suprimir la radiación directa, pero en general reducen los niveles de iluminación natural en cualquier lugar del recinto. El resultado puede ser que tenga que encenderse la luz eléctrica, aumentando por tanto el coste debido a su consumo, y las ganancias internas. Un dispositivo para la iluminación natural es un dispositivo óptico que tiene por función captar un flujo de iluminación natural, conducirlo eficazmente hacia el interior del edificio, y distribuirlo de forma apropiada en los lugares de interés. Como ejemplo se muestra una chimenea de luz en la Figura 1. El dispositivo óptimo para la iluminación natural lateral de un recinto debe: 1) proporcionar una protección solar efectiva, evitando la penetración de luz directa en el interior del local y el deslumbramiento; 2) redirigir la luz natural hacia un lugar fijo cuando el Sol se mueve en su ciclo diurno y estacional; 3) distribuir uniformemente el flujo de luz natural en el local, aumentando por tanto los niveles en las partes más alejadas de la ventana con respecto a los que se obtienen sin dispositivo, (Figura 2), y, 4) mantener una variación relativamente pequeña de los niveles de luz natural en el interior cuando fluctúan los niveles exteriores de luz natural. Esto no parece fácil, pero la tecnología actual puede hacer posible el diseño de tal dispositivo ideal.

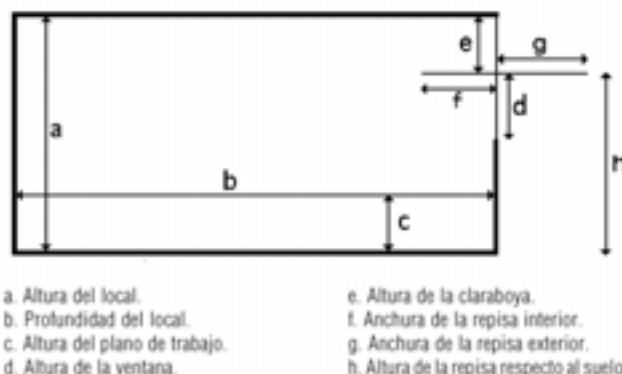
El efecto sobre la luz natural de los elementos de control situados en ventanas está basado en diferentes fenómenos físicos: la reflexión, la refracción y la difracción de la luz. A continuación se analizan las posibilidades de algunos de estos dispositivos, actualmente en fase de investigación y desarrollo a escala internacional, haciendo referencia a los resultados publicados de las investigaciones realizadas.

Repisas de luz

Las repisas de luz son elementos planos o curvos situados en la apertura de la ventana. Redirigen la luz por reflexión. Pueden ser externas, internas, o una combinación de ambos tipos. Tanto la parte interna como la externa pueden tener diferentes inclinaciones. Con la inclusión de una repisa de luz la ventana se subdivide en dos secciones, la parte inferior a donde se ubica la repisa, que permite la visión del exterior, y la parte superior que permite la entrada de la luz natural y la refleja hacia el techo del local (que como es obvio debe ser muy reflectante), para que después se redistribuya en el interior iluminando las zonas más alejadas de la ventana. Los parámetros que afectan a su rendimiento como dispositivos para la iluminación natural son: la longitud en el exterior del local, la longitud en el interior, la altura con respecto al suelo a la que se coloca, la distancia suelo-techo del local, la altura de la ventana por encima y por debajo de la repisa, y las reflectancias de todas las superficies implicadas, figura 3. Dado el número de variables es difícil dar con el diseño óptimo.

La literatura existente sobre las repisas de luz no incluye en general experimentos realizados con todo el rigor científico deseable. Quizás como consecuencia de esto, en Thomson y Hughes (1994) se indica que «existe la creencia de que pueden aumentar el nivel de iluminación en el interior de las oficinas», y en Steemers (1994) que «tienen un potencial para aumentar los niveles de iluminación en la parte posterior de la habitación, aunque esto es difícil de conseguir». Las repisas **que únicamente tienen parte interior** han sido recientemente estudiadas con cierto detalle en el Building Research Establishment (Aizlewood, 1993), para una latitud de 50°N, utilizando modelos a escala 1:1 que simulaban una oficina real con ventana orientada al Sur. Se utilizó una repisa con profundidad de 1 metro y dispuesta a una distancia del alfeizar $h = 2/3 H$, siendo H la altura total de la ventana. Para cielo cubierto o despejado, y diferentes alturas y acimuts del sol, repisas reflectoras o difusoras, se redujeron los niveles de iluminación a diferentes distancias de la ventana desde un 5% hasta en un 30% en comparación con los que se obtenían sin repisa, que por tanto actuaba como un dispositivo de sombra. La repisa mejoró la uniformidad de las iluminancias medidas al reducir el contraste excesivo entre la parte próxima a la ventana y la parte posterior del local. Los resultados indicados en Aizlewood (1993) para el caso límite de cielo cubierto pueden relacionarse con los de Thomson y Hughes (1994), obtenidos para un modelo instalado en un cielo artificial con la distribución de luminancias CIE. En Thomson y Hughes (1994), se aumentó el valor de la

FIGURA 3
Parámetros geométricos que afectan al rendimiento de una repisa de luz considerada como dispositivo para la iluminación lateral.



- a. Altura del local.
b. Profundidad del local.
c. Altura del plano de trabajo.
d. Altura de la ventana.
e. Altura de la claraboya.
f. Anchura de la repisa interior.
g. Anchura de la repisa exterior.
h. Altura de la repisa respecto al suelo.

FIGURA 4
La repisa de luz (light-shelf) estudiada en la ETSAM proporcionó iluminancias mayores que el modelo de referencia en el punto más alejado de la ventana el 60% de las horas en Julio y Agosto de 1994. Los puntos experimentales corresponden a valores medios horarios.

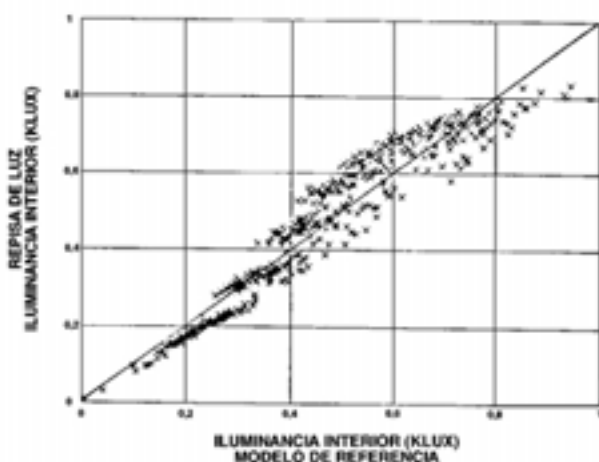
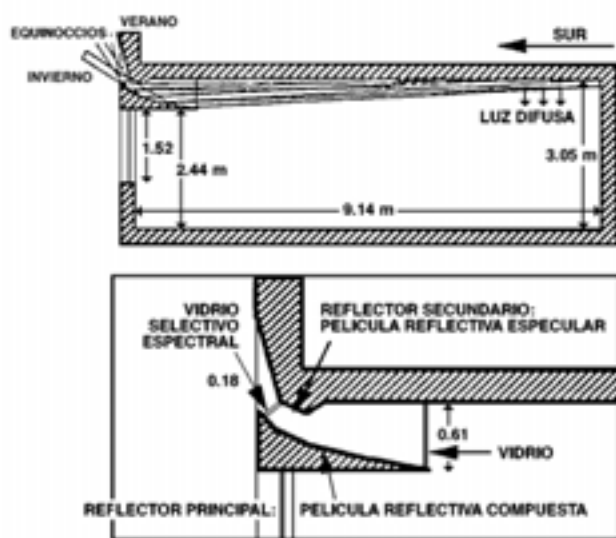


FIGURA 5
Repisa de luz de diseño innovador producida en el Lawrence Berkeley Laboratory



iluminancia en la parte posterior de modelo, cuando en vez de situar la repisa a $h=2/3 H$, se ubicó a $h=1/2 H$. En otros experimentos para cielo cubierto (Boubekri, 1992), utilizando un modelo en condiciones de cielo real, se obtuvo también mayor iluminación en la parte más alejada de la ventana cuando la repisa estaba a $h=1/2 H$ que cuando estaba a $h=2/3 H$ del alfeizar. También en Boubekri (1992), para cielos despejados y luz exclusivamente difusa (modelo orientado al Norte) se obtuvo mejor iluminación para $h=1/2 H$.

Por lo que respecta a las condiciones climáticas de gran parte de España, existe una larga estación cálida con abundancia de cielos despejados y se hace necesario el uso de dispositivos de protección solar, debiéndose utilizar diferentes tipos de dispositivos según la orientación. Aquí, por tanto, deben emplearse **repisas que tengan tanto parte exterior como interior**. Obtenido un ángulo vertical de sombra de 50° como el adecuado para proteger las ventanas orientadas al Sur en Madrid, se han realizado en la ETSAM experimentos con modelos, en los que se comparan con un modelo de referencia sin ningún tipo de protección varios sistemas sencillos diseñados para el mismo ángulo vertical de sombra, formados por: 4 lamas horizontales, 3 lamas horizontales y una repisa de luz (Oteiza y Soler, 1995). Utilizando datos obtenidos para 727 horas de cielos despejados durante Julio y Agosto de 1994, y pintura blanca mate (buena difusora) para los dispositivos, se obtuvieron entre otras las siguientes conclusiones: 1) todos los sistemas proporcionaron mayor uniformidad para los valores de las iluminancias que el modelo de referencia; 2) la repisa de luz proporcionó mayores niveles de iluminación en la parte más alejada de la ventana que los otros dispositivos, y, 3) para el 56% de las horas, la repisa proporcionó para esta posición iluminancias mayores que el modelo de referencia, Figura 4. Estos experimentos muestran que las repisas de luz pueden aumentar el nivel de iluminación en la parte más alejada de la ventana. La repisa utilizada en estos experimentos preliminares cumplía con las condiciones requeridas para su función de protección solar en el periodo de sobrecalentamiento en Madrid, todavía no ha sido optimizada en relación a su función relevante de mejorar los niveles de iluminación natural con respecto a la ventana sin ningún tipo de protección. Experimentos realizados con diferentes inclinaciones para la parte exterior de la repisa (Baker, N. et al., 1993), y el reciente trabajo de modelización con el programa SUPERLITE, son indicativos de las posibilidades a este respecto (Saraji y Mistrich, 1993).

Recientemente en el Lawrence Berkeley Laboratory se han diseñado y utilizado en edificios públicos repisas de luz de diseño innovador y gran eficiencia

(Beltran, et al., 1994), figura 5.

Entre los edificios que incorporan repisas de luz pueden citarse: La Vanoise College, Moderne; Training Centre, Agricultural Bank, Atenas; Tennessee Valley Authority Offices, Chattanooga, etc.

Mencionemos también que, para edificios pasivos o de bajo consumo energético Colt Internacional ha desarrollado un sistema que incluye protección solar, ventilación natural, control del deslumbramiento, atenuación sonora y repisa de luz (Evans, 1993b).

Vidrios prismáticos

Las características de transmisión de la luz de un vidrio prismático son tales, que refleja la luz que le llega para ciertos ángulos de incidencia, mientras que permite que la incidente para otros ángulos sea transmitida hacia el techo del interior del recinto para ser después reflejada hacia el suelo. Un sistema prismático puede consistir en una o más láminas de paneles prismáticos (dimensiones típicas de 206 x 206 mm) situadas entre dos láminas de vidrio (Daylight System, 1987). Se producen prismas con diversos ángulos, a utilizar de acuerdo con su localización en el edificio, y con la posibilidad de recubrimientos reflectantes para reflejar mejor la radiación incidente.

Los sistemas prismáticos son translúcidos: aunque el cielo no puede verse a través de estos elementos, permanece perceptible. Por tanto, este elemento de control no distorsiona la apariencia global de la ventana cuando se ve desde el interior. Por lo que respecta al deslumbramiento que producen se dispone de dos series de resultados experimentales (Baker, N. et al., 1993; Littlefair, P. et al., 1994) que coinciden en indicar que disminuyen el deslumbramiento en relación con una ventana que no los utilice. Si se usa el índice DGI ("daylighting glare index"), las medidas en Littlefair, P. et al. (1994) indican que para una habitación orientada al sur los vidrios prismáticos limitan el deslumbramiento a niveles aceptables para todo tipo de condiciones climáticas.

Con respecto a la pregunta de si estos sistemas pueden aumentar el nivel de iluminación en los lugares de la habitación más alejados de la ventana, algunas investigaciones realizadas (Littlefair, P. et al., 1994) indican que para sistemas fijos esto sólo es posible en ciertas condiciones de altitud y acimut del Sol, y para cielos despejados. Estos resultados implican que si han de ser efectivos desde el punto de vista de la iluminación natural, dichos sistemas deben ser móviles para poder encontrar su posicionamiento óptimo en función de las condiciones exteriores. En la Figura 6 se muestra un sistema fijo instalado en Berna, que utiliza vidrio prismático. En la Figura 7 se observa que los

rayos solares pueden ser desviados hacia el techo del local para ciertas altitudes solares. En vista de los resultados obtenidos en Compagnon (1993) por simulación con ADELIN, en el Laboratorio y en el local, se concluyó que este dispositivo fijo era poco adecuado para conseguir los objetivos deseados.

Las aplicaciones a pequeña escala del vidrio prismático en edificios son numerosas fuera de España, como por ejemplo en el Landeszentralbank, Cologne. Uno de los primeros edificios en que se ha utilizado de forma extensa el vidrio prismático, es el Zentralsparkasse & Commerzbank HQ en Viena (Evans, 1993a). El coste de instalar un sistema prismático monitorizado con controles integrados en el sistema general de control del edificio, fue de aproximadamente de 1200\$ por metro cuadrado. En Steemers (1994) se ha criticado el citado diseño para la mejor utilización de la iluminación natural, en el sentido de que se ha usado vidrio tintado en una fachada con una gran proporción instalada de vidrio. Podría haberse reducido la cantidad de vidrio utilizando vidrio transparente, y por tanto haberse limitado la ganancia solar en verano y la pérdida de calor en invierno. No se han publicado todavía los resultados de la monitorización del sistema.

Recubrimientos holográficos

El principio de esta tecnología es recubrir las ventanas con un material (emulsiones fotográficas, gelatina, fotopolímeros, etc) en el que se "imprime" una figura de difracción mediante una técnica holográfica. Ventajas de estos materiales son: que su funcionamiento es independiente de la geometría del sustrato, y la posibilidad de superponer varios hologramas en el mismo sustrato (Baker, et al., 1993). La ventana dotada con este dispositivo difractaría la radiación solar incidente hacia el techo de un local con un ángulo bien definido. Pero para una red de difracción a incidencia normal, el seno del ángulo de difracción se obtiene dividiendo la longitud de onda de la luz incidente por la constante de la red, y por tanto el holograma produce la descomposición espectral de la luz, que tiene que ser posteriormente "reconvertida" a luz blanca.

De entre los trabajos preliminares desarrollados en exteriores con maquetas, mediante simulaciones con ADELIN, y en el Laboratorio, los más detallados se están realizando aparentemente en el Institut für Licht und Bautechnik en Colonia (Müller, 1994; Muller, 1992; Dietrich, 1994). Para que estos dispositivos puedan ser interesantes en relación con la iluminación natural de interiores, la eficiencia de la difracción, definida como la razón de la radiación difractada al total de la radiación incidente, debe ser grande. Un recubrimiento holográfico puede ser efectivo para longitudes de onda entre

FIGURA 6

Sistema fijo realizado con vidrio prismático, instalado en Berna

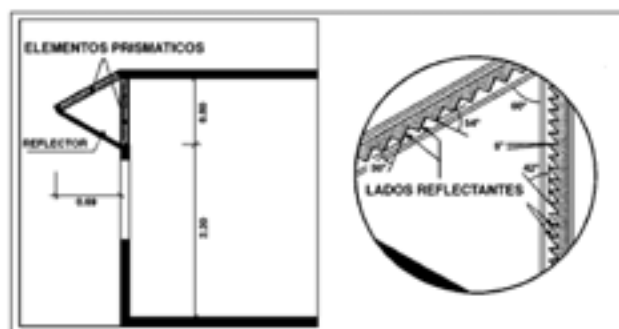


FIGURA 7

Trazado de rayos por ordenador para el sistema anterior

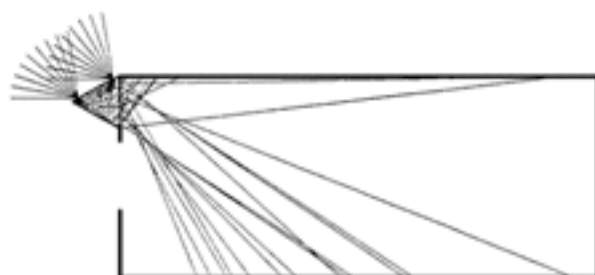


FIGURA 8

Iluminación lateral con un dispositivo holográfico

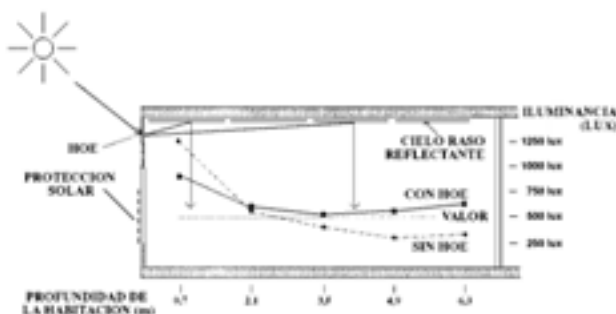


FIGURA 9

Iluminación cenital con un dispositivo holográfico

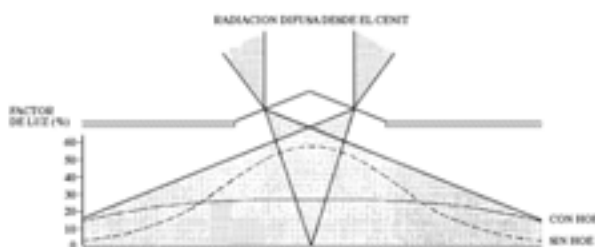


FIGURA 10

Concentrador CPC. Se muestra la marcha de rayos mediante ordenador

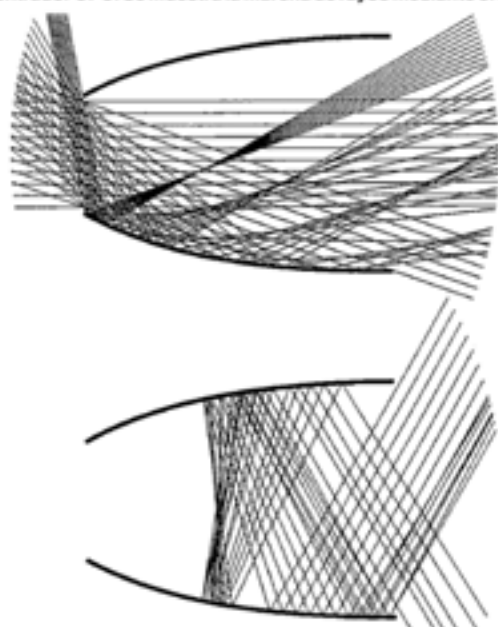


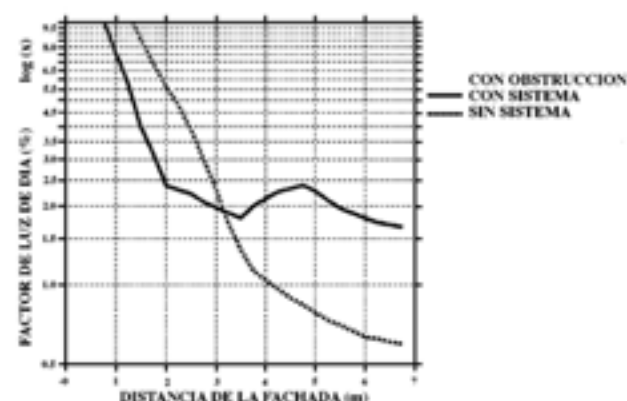
FIGURA 11

Sistema anidólico para la iluminación lateral



FIGURA 12

Los dispositivos anidólicos pueden aumentar la iluminación en la parte más alejada de la ventana con respecto a la que se obtiene sin dispositivo



300 y 900 nanómetros, con una eficiencia máxima del 93% para 600 nm (Müller, 1994). Los hologramas son altamente transparentes para todos los ángulos de incidencia, siendo la absorción de la película de menos del 10%. Estos dispositivos pueden usarse también para iluminación cenital. Las Figuras 8 y 9 muestran que, al menos en ciertos casos, la utilización de sistemas holográficos aumenta el nivel de luz natural en ciertas zonas del local (Muller, 1992).

Las dimensiones de un dispositivo holográfico individual van de 1 cm x 1 cm a 10 cm x 10 cm. En el estado actual de la tecnología se puede conseguir, holograma a holograma, un tamaño máximo de 1 m x 2m En Stuttgart se instaló en 1993 una extensión de 90 m x 90 m en la primera prueba en condiciones reales, pero no hay todavía ninguna publicación sobre esta experiencia.

Sistemas anidólicos

La óptica anidólica ("non imaging optics") ha sido aplicada a la concepción de concentradores solares (Winston, 1986; Cai, W., et al., 1991; Gordon, M., et al., 1992). La función de los dispositivos es concentrar la radiación solar, captando un haz de rayos luminosos incidentes en una apertura de entrada y dirigiendo estos rayos hacia una apertura de salida. Esto puede realizarse sin distorsión de la imagen resultante, por oposición a lo que sucede por ejemplo con una cámara fotográfica.

Un concentrador CPC ("compound parabolic concentrator") comprende dos reflectores de forma parabólica. La figura 10 representa un concentrador de este tipo e ilustra la propagación de ciertos rayos incidentes. Sólo son dirigidos hacia la apertura de salida los rayos inclinados con respecto al eje del sistema con un ángulo inferior o igual a un valor máximo (aquí de 30°). Todos los rayos con mayores ángulos de incidencia son rechazados después de ciertas reflexiones. Una propiedad interesante de los concentradores anidólicos es el pequeño número de reflexiones necesarias para que los rayos puedan pasar de una apertura a otra. En el caso de los CPC la mayor parte de los rayos salen tras una reflexión, lo que se traduce en pocas pérdidas. Para diseñar un sistema de iluminación natural formado por reflectores anidólicos es necesario determinar exactamente la forma de estos últimos.

En Suiza se han realizado recientemente experimentos y simulaciones con este tipo de sistemas (Compagnon, 1993; Compagnon et al., 1993). Para aprovechar mejor la luminancia cenital se puede utilizar un concentrador con apertura de entrada horizontal que capta los rayos procedentes de la bóveda celeste y los concentra en una apertura de salida vertical. Después

de pasar por la apertura de salida debe obtenerse un haz bien definido angularmente y orientado hacia el techo del local. La Figura 11 presenta de forma esquemática un sistema anidólico para el que la apertura horizontal de entrada y la apertura vertical de salida tienen la misma longitud (Compagnon, 1993). La envolvente térmica del edificio se realiza mediante acristalamiento de las aperturas de entrada y salida del sistema. Como toda la radiación incidente se transmite, se recomienda situar una protección solar móvil delante de la apertura de entrada. Se han publicado resultados preliminares para estos sistemas, obtenidos con cielo artificial y simulación mediante ADELIN y en el Laboratorio (Compagnon, 1993; Compagnon, et al., 1993), que los señalan como muy prometedores. En la figura 12 se observa que en efecto, estos dispositivos aumentan la iluminación en la parte más alejada de la ventana con respecto a la que existe si no se utilizan. En la figura 13 se muestra un dispositivo, diseñado por el grupo de Berkeley, que guarda cierta relación con los mencionados.

Dispositivos formados por lamas paralelas

El estudio óptico del efecto en el interior de un recinto de un dispositivo formado por lamas paralelas planas o curvas, ha sido desarrollado parcialmente en Littlefair (1992) y Vázquez (1995). Según los experimentos en Aizlewood (1993), Figura 14, aunque el dispositivo utilizado podía redirigir parte de la luz incidente hacia el techo del local para que posteriormente la luz reflejada llegase a espacios distantes de la ventana, no se superaban en la práctica los niveles de iluminancias que se obtenían sin ellos, por lo que sólo proporcionaban protección solar. Una opinión distinta se da en Vázquez (1995), afirmándose con una experimentación escasa, que con el dispositivo propuesto es posible conseguir un incremento de la iluminancia sobre el plano de trabajo en regiones alejadas de la ventana, de 3.5 veces la que se obtendría sin utilizarlo

DISPOSITIVOS PARA LA ILUMINACIÓN CENTAL

Se han desarrollado numerosos dispositivos para la iluminación cenital con luz natural, y sólo nos referiremos a algunos de ellos. En Japón por ejemplo, motivados por la ley que regula el derecho al Sol, y pensando en ciudades con edificios muy altos y a la vez en zonas construidas bajo tierra, se desarrolló el Himawari (girasol en japonés) (Mori, 1989), que puede ser utilizado para iluminación cenital. Utiliza lentes de Fresnel para enfocar continuamente la luz del Sol en cables de fibra óptica, que la transportan al lugar deseado. En un día soleado, cada unidad puede producir una cantidad de luz en lugares lejanos equivalente al menos a 2000

FIGURA 13
Dispositivo para la iluminación lateral con guía de luz, diseñado en el Lawrence Berkeley Laboratory

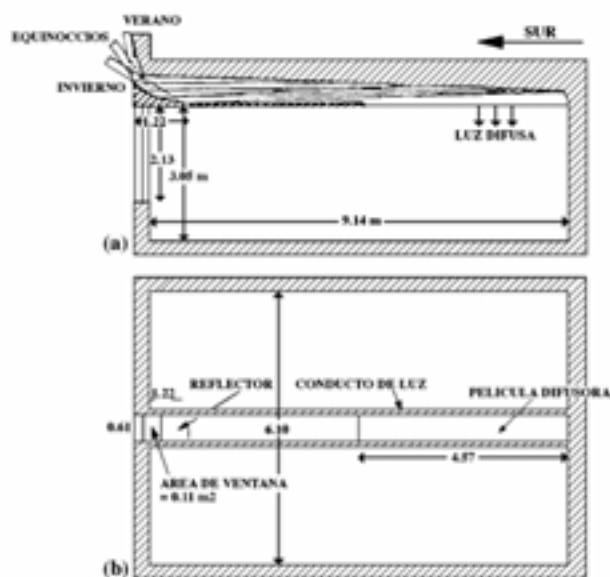
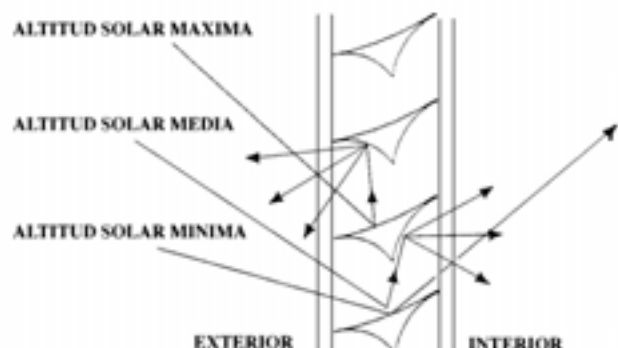


FIGURA 14
Dispositivo formado por lamas paralelas



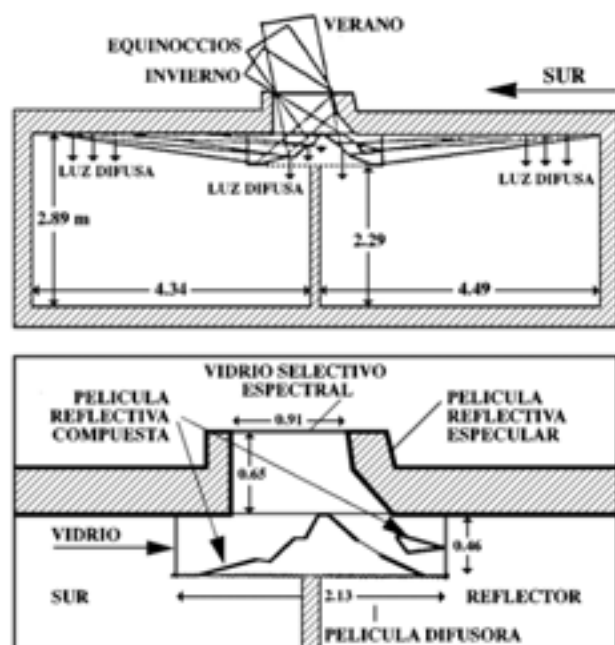
watios. Utilizando el fenómeno de aberración cromática de las lentes, el Himawari no enfoca en los cables de fibra óptica ni el infrarrojo ni el ultravioleta, lo que puede constituir una ventaja adicional.

Por otra parte, en la historia de la Arquitectura existen numerosos casos de cúpulas semiesféricas perforadas para obtener luz tamizada (por ejemplo en los Baños de Jaén, España). Sin embargo, no se logra en estos casos previos un control de la direccionalidad de la luz. En Vázquez (1995) se ha desarrollado un dispositivo óptico matricial, inspirado en los citados precedentes, con el que aparentemente es posible concentrar o difundir (según convenga) la luz solar directa, direccionar la luz difusa, e iluminar áreas de manera selectiva. El dispositivo presenta inconvenientes, como los derivados de la necesaria limpieza exterior.

Otros dispositivos de interés pueden denominarse conductos de Sol (Rogora y Palermo, 1994), o chimeneas de luz (Cucinella y Santos, 1993), y pueden utilizarse para iluminar espacios a los que la luz natural no llega, o lo hace con poca intensidad, Figura 1.

FIGURA 15

Dispositivo para la iluminación cenital diseñado por el grupo de Berkeley para la «Palm Springs Chamber of Commerce» (U.S.A.)



En ZIVA (1994) se ha sugerido un sistema para redistribuir la luz cenital en edificios residenciales tipo atrio, y en Beltran (1994) y Lee (1994) el grupo de Berkeley ha mostrado el diseño y estudiado con detalle el ahorro energético, que proporciona un sistema especial para la iluminación cenital (luz difusa) instalado en la Palm Springs Chamber of Commerce, Figura 15, analizado previamente con el programa RADIANCE y en el Laboratorio.

A nuestro entender uno de los trabajos más completos que existen sobre sistemas para la iluminación cenital es el realizado por el citado grupo de Berkeley sobre sistemas tipo tragaluz en el que los parámetros de diseño y el posible ahorro energético han sido considerados para todas las regiones climáticas de los Estados Unidos (American Architectural Manufacturers Association, 1988).

LA TASK 21 DE LA AGENCIA INTERNACIONAL DE LA ENERGÍA (I.E.A.)

El objetivo de la Task 21 de la I.E.A. (1995-1999) es realizar la investigación y desarrollo necesarios a distintos niveles para apoyar la integración económica y efectiva de los conceptos relativos a la iluminación natural en el diseño de edificios no residenciales. La Task 21 busca promover un diseño consciente de las posibilidades de la iluminación natural, del ahorro de energía mediante su utilización, y la mejora al mismo tiempo del «confort» visual y del control de las ganan-

cias solares. Para conseguir dicho objetivo, los países participantes investigarán en el marco de cuatro Subtareas (A-D).

La Subtarea A tiene como objetivo proporcionar guías para el diseño de sistemas para la iluminación natural, tanto convencionales como de nueva concepción. Los sistemas serán evaluados en relación con su potencial para el ahorro de energía, aspectos visuales, y de control de la radiación solar. La evaluación de cada sistema no estará basada solamente en la factibilidad técnica, sino en el impacto arquitectónico y medioambiental. Se estudiarán sistemas de iluminación lateral y cenital móviles y fijos. Los resultados de esta Subtarea serán: 1) Una guía detallada para la selección e integración en los proyectos arquitectónicos de sistemas para la iluminación natural con estrategias de control motivadas por la mayor utilización posible de la luz natural, y 2) Un estudio sobre procedimientos para el testeo y evaluación de dichos sistemas y las correspondientes estrategias de control.

La Subtarea B tiene por objetivo evaluar diferentes sistemas de control utilizados actualmente, y superar sus deficiencias en relación con el ahorro de energía y su capacidad para controlar la luz artificial en respuesta a la luz natural disponible. Esto permitirá ayudar a los propietarios de edificios, arquitectos e ingenieros a seleccionar sistemas que respondan adecuadamente a la luz natural, y a estimar el ahorro potencial de energía en las etapas iniciales de diseño. Los resultados de esta Subtarea serán: 1) Preparar en cooperación con la Subtarea A una guía para la selección e integración en los proyectos arquitectónicos de sistemas para la iluminación natural, y 2) Preparar, también en colaboración con la Subtarea A un estudio sobre procedimientos de testeo y evaluación de sistemas y estrategias de control.

La Subtarea C tiene como objetivo el determinar las capacidades y precisión para el diseño de varias utilidades informáticas. Los resultados serán: 1) El desarrollo de una nueva versión del ADELIN, la 3.0, de más fácil utilización para el usuario que la existente, 2) El desarrollo de métodos sencillos de cálculo y de métodos gráficos, que puedan utilizarse en el diseño, y 3) La documentación de los algoritmos utilizados.

La Subtarea D tiene como objetivo demostrar la viabilidad de la utilización de la iluminación natural de edificios en varias zonas climáticas en relación con el ahorro de energía, y la obtención de un medio ambiente térmico y lumínico satisfactorio para los ocupantes, proporcionando datos reales para la validación de los modelos desarrollados. Los resultados de esta Subtarea serán: 1) Documento sobre los procedimientos para la evaluación de la aceptación por parte del usua-

rio, en edificios reales y en modelos de recintos a escala 1:1, de sistemas de iluminación natural y sistemas de control, 2) Estudios detallados sobre el ahorro energético y reacciones de los usuarios en diversos edificios de los países miembros de la I.E.A., y, 3) Elaboración de bases de datos para la validación de las herramientas de diseño.

CONCLUSIÓN

Hemos revisado el estado actual de la investigación, desarrollo y puesta en funcionamiento de dispositivos

para la iluminación natural de los edificios. Un examen de las actividades a desarrollar a nivel internacional sobre estos temas nos permite prever en los próximos años un notable desarrollo en relación con los dispositivos, las utilidades informáticas o de otro tipo necesarias para su diseño e implementación en los edificios, y los sistemas de control asociados. Aunque sólo los países miembros de la IEA y los de la Unión Europea aparecen por el momento directamente implicados en estas tareas, los resultados obtenidos deben, en nuestra opinión recibir la más completa difusión posible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIZLEWOOD, M. (1993): *Innovative daylighting systems: an experimental evaluation*, Lighting Research and Technology, 25, 141-152.
- AMERICAN ARCHITECTURAL MANUFACTURERS ASSOCIATION (1988): *Skylight handbook design guidelines: examples, design issues, concepts, worksheets and energy considerations*, Illinois, -incluye hoja de cálculo para Lotus 1, 2, 3-.
- BAKER, N., FRANCHIOTTI, A. and STEEMERS K. (EDS.) (1993): *Daylighting in Architecture*, James and James.
- BELTRAN, L. O., LEE, E. S., PAPAMICHAEL, K. M., AND SELKOWITZ, S. E. (1994): *The design and evaluation of three advanced daylight systems: Light shelves, light pipes and skylights*, Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory.
- BOUBEKRI, M. (1992): *Impact of position on the performance of a combined lightshelf*, Proceedings of the 17th National Passive Solar Conference, ASES.
- CAI, W., et al (1991): *Reflectors for efficient and uniform distribution of radiation for lighting and infrared based on non-imaging optics, en: Non imaging optics, maximum efficiency light transfer*, Winston, R. et al (eds.), Proc.SPIE, 1528-1535.
- COMPAGNON, R. (1993): *Simulations numériques de systèmes d'éclairage naturel à pénétration latérale*. These de doctorat, EPF-Lausanne.
- COMPAGNON, J. L., SCARTEZZINI, J. L., and PAULE, B. (1993): *Application of nonimaging optics to the development of daylighting systems*, ISES Solar World Congress, Budapest.
- CUCINELLA, M. and SANTOS, F. (1993): *Etude et réalisation d'une cheminée de lumière-Maison Kunz, Bernex*, Programme Diane, Geneva.
- Daylight System*, Siemens product information, Traunreut, Germany, (1987).
- DIETRICH, U. (1994): *A daylight simulation program describing daylighting guiding facade elements*, European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, Lyon.
- EVANS, B. (1993a): *Reducing office overheating*, Architectural Journal, vol 197, 13,55-56.
- EVANS, B. (1993b): *Windows as climate modifiers*, Architectural Journal, vol 198, 5.
- GORDON, M., et al. (1992): *Nonimaging reflectors for efficient uniform illumination*, Applied Optics, 31.
- LEE, E. S., SELKOWITZ, S. E., RUBINSTEIN, F. M., KLEMS, J. H., BELTRÁN, L. O., and BARTOLOME D. (1994): *A comprehensive approach to integrated envelope and lighting systems for new commercial buildings*, Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory.
- LITTLEFAIR, P. J. (1992): *Daylighting coefficients for practical computation of internal illuminances*, Lighting Research and Technology, 24, 127-135.
- LITTLEFAIR, P. J., AIZLEWOOD, M. E. and BIRTLES, A. B. (1994): *The performance of innovative daylighting systems*, Renewable Energy, 5, 920-934.
- MORI, K. (1989): *Solar light and heat energy technology for the future*, Proceedings of the U.K.ISES Section conference: «Daylighting Buildings», London.
- MULLER, H.F.O. (1992): *Solartechnik für den klimagerechten Bürobau*, Deutsche Bauzeitschrift, 4.
- MÜLLER, H.F.O. (1994): *Application of holographic optical elements in buildings for various purposes like daylighting and solar shading*, Renewable Energy, 5, 993-941.
- OTEIZA, P. and SOLER, A. (1995): *Comparison of the daylighting performance of different shading devices giving the same solar protection*, Aceptado para su publicación en la Architectural Science Review.
- ROGORA, A. and PALERMO, G. (1994) *New components for daylighting: first Italian application of a sunduct*, Renewable Energy, 5, 974-976.
- SARAJI, R. M. N. and MISTRICH, R.G. (1993): *The development of coefficients of utilization for light shelves*, Journal of the Illuminating Engineering Society, Winter issue, 139-161.
- STEEMERS, K. (1994): *Daylighting design*, Renewable Energy, 5, 950-958.
- THOMSON, M. and HUGHES, A. (1994): *Model studies of daylight factor: what are the important variables*, European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, Lyon.
- VÁZQUEZ, D. (1995): *Dispositivos ópticos de iluminación natural de aplicación en Arquitectura*. Tesis Doctoral, ETSAM.
- WINSTON, R. (1986): *Nonimaging optics for illumination*, SPIE, vol 692.
- ZIVA, Kristi (1994): *Light ducts and energy savings in residential buildings*, European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, Lyon.