

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE ILUMINACIÓN NATURAL PARA EDIFICIOS EDUCATIVOS EN CLIMA CÁLIDO SECO

Irene Marincic y J. Manuel Ochoa

Arquitectura, Universidad de Sonora, Av. Rosales y Av. Colosio, 83000 Hermosillo, México.

Tel.: +52 662 2592179, Fax +52 662 2592180

e-mail: imarincic@arq.uson.mx

RESUMEN

El diseño de iluminación natural en edificios educativos tiene particular importancia por el tipo de tareas que se desarrollan en ellos y debido a su uso predominantemente diurno. En climas cálidos y secos, la gran disponibilidad de iluminación exterior les confiere un gran potencial de aprovechamiento de este recurso, a fin de disminuir el consumo de energía en el uso de iluminación artificial. Sin embargo, la utilización de luz natural debe ser cuidadosamente evaluada a fin de evitar excesivas ganancias de calor.

El objetivo de este trabajo es la presentación de una metodología de análisis de iluminación natural que tiene particularmente en cuenta su impacto sobre las condiciones térmicas. El modo de relacionar ambas condiciones es hallando sus distribuciones espaciales e identificando la relación entre sus patrones de comportamiento. Una herramienta matemática eficaz para poner en evidencia estos patrones, y que utilizamos en este caso, es la transformada de Fourier.

Diseñando en forma adecuada los sistemas de iluminación natural, teniendo en cuenta los múltiples factores intervinientes, se podrá mejorar no sólo el confort de los usuarios sino también la eficiencia lumínica. Si se tiene en cuenta la incidencia de la distribución lumínica sobre las condiciones térmicas, se podrá favorecer indirectamente un uso más racional de los recursos energéticos destinados a climatización.

ABSTRACT

Daylighting design in educational buildings is of higher importance because of the illumination requirements related to the type work, and because of their predominant daily use. In hot and dry climates, with a high availability of exterior illumination, an advantage of this resource can be taking for interior lighting, and for diminishing the artificial lighting consumptions. But daylighting must be carefully evaluated in order to avoid excessive heat gains.

The purpose of this work is to present a methodology for daylighting analysis, focused on the impact of daylighting on the thermal conditions. To relate both conditions it is necessary to find out their spatial distributions and to identify the relationship between their behavior patterns. An efficient tool to evidence these patterns is the Fourier transform, which has been used in this work.

In daylighting conscious design, many factors must be taking into account. Visual comfort of building occupants and also lighting efficiency can be improved. Considering the relation between daylighting distribution and thermal conditions, also a more conscious utilization of energetic resources for cooling can be achieved.

1. INTRODUCCIÓN

El confort lumínico es un factor de suma importancia para la salud y la productividad laboral de las personas y es de particular importancia en los edificios educativos, dado el patrón de uso diurno y el tipo de funciones que se realizan en ellos. La adecuada iluminación, se puede conseguir de dos maneras diferentes, una es a través de la iluminación natural, aprovechando el recurso solar de cada región, y la otra es por medio de la iluminación artificial, la cual se utiliza principalmente de noche y durante el día como complemento de la luz natural.

Paradójicamente, en climas cálidos y secos (con días mayormente despejados) como los que predominan en Sonora, México, donde incide una gran cantidad de radiación solar y hay gran cantidad de días despejados a lo largo del año, con alto nivel de iluminación, este recurso no se aprovecha adecuadamente, ya que la entrada de radiación solar al interior de un edificio, además de aportar iluminación, ocasiona deslumbramiento e introduce gran cantidad de energía térmica, ocasionando un aumento en el consumo de energía por concepto de aire acondicionado. El problema específico se analiza para edificios educativos, cuyo uso es preponderantemente diurno.

Las soluciones más comunes y frecuentemente las aplicadas empíricamente por los propios usuarios para controlar el exceso de luz y ganancias de calor, es la reducción del área de ventanas (Edmonds, 2002) o el uso inadecuado de dispositivos de control solar o sistemas de iluminación natural. Sin embargo, estas acciones tienden a reducir la disponibilidad de luz natural en el interior, incrementándose el uso de la iluminación artificial. (García-Chávez, 2002). Una solución sería entonces el aprovechamiento adecuado de la iluminación natural, para minimizar el uso de iluminación eléctrica. Esto no es tan sencillo en los climas muy cálidos, donde a su vez la presencia de luz y/o de superficies vidriadas más grandes, involucra ganancias de calor relevantes. La relación entre luz natural y temperatura en el interior de los edificios debe ser evaluada en estos casos con una metodología que detecte justamente esta relación.

El objetivo de este trabajo consiste en presentar una metodología para analizar la distribución de iluminación natural en el interior de edificios, y su incidencia sobre la distribución de las temperaturas interiores. Los resultados de esta metodología servirían para sugerir posibles modificaciones en los sistemas de iluminación natural de edificios educativos (en nuestro caso) y otro tipo de edificios, tendientes a mejorar su eficiencia lumínica, y como consecuencia, incidir sobre su eficiencia térmica. En este contexto, la optimización de los sistemas de iluminación natural contribuiría al uso racional de la energía, permitiendo el aprovechamiento oportuno de los recursos naturales y la protección al ambiente.

Una de las suposiciones para el planteamiento de esta metodología es el hecho de que tanto los espacios lumínicos como los térmicos están condicionados por la energía que entra o abandona un edificio de diferentes maneras, por lo que se puede pensar en la existencia de un patrón común en ambas distribuciones. La metodología identifica estos patrones y posibilita su análisis.

En los próximos apartados, se presentará una metodología de análisis de iluminación natural, que tiene particularmente en cuenta las condiciones térmicas interiores, como consecuencia de las condiciones lumínicas.

2. SITUACIÓN LUMÍNICA ACTUAL

El diseño de un ambiente provisto de iluminación natural adecuada abarca varios aspectos interrelacionados: distribuir satisfactoriamente la iluminación interior (entre otros parámetros lumínicos), evitar las ganancias y pérdidas de calor, y uso mínimo de iluminación artificial. Para hallar el balance más aceptable entre estos, es necesario analizar los diferentes parámetros, para analizar las condiciones lumínicas en su totalidad (Dobrin, 1998). En este trabajo, se aborda la parte de esta problemática que tiene que ver con la relación entre las condiciones lumínicas y las térmicas, como se describirá más adelante.

En México, los edificios educativos más utilizados en instituciones públicas están estandarizados, y fueron diseñados para ser implantados en todo el territorio mexicano. Este prototipo se está usando prácticamente sin modificaciones para la gran diversidad de condiciones ambientales de México. Como consecuencia de esto, el funcionamiento de estos edificios desde muchos puntos de vista, entre ellos el lumínico, no es el óptimo para un clima cálido seco como el de Sonora, con una disponibilidad a veces excesiva de iluminación en el exterior durante casi todo el año. Es necesario que ésta se controle y optimice, desde el punto de vista del confort lumínico y aún térmico, como se mencionó anteriormente. El clima muy cálido seco de la región hace que el factor térmico sea casi inseparable en el análisis de la situación lumínica.

La mayoría de los edificios educativos que se han empezado a analizar, pertenecientes al campus Centro de la Universidad de Sonora, presentan una situación lumínica poco adecuada a las necesidades de funcionamiento. Las características geométricas de los ambientes principales en estos edificios, que son las aulas de clase, son de planta rectangular, con ventanas en los lados norte y sur.

A simple vista se percibe una distribución de iluminancias interiores poco uniforme, y si bien cuentan con la ventaja de ventanas sobre dos fachadas, la elevada iluminación exterior provoca deslumbramiento, sobre todo proveniente de la fachada sur.

En la mayoría de los casos se presentaron los siguientes problemas, tanto lumínicos como térmicos:

- Inadecuada distribución de iluminancias
- Inadecuada distribución de luminancias
- Deslumbramiento
- Grandes ganancias de calor a través de las ventanas

Los usuarios han ido remediando estos problemas de manera improvisada, adoptando diferentes estrategias, en cuanto a protección de ventanas, que van desde incorporación de persianas, cortinas, papel aluminio (reflejante), papel periódico, pintura en los vidrios, polarizado. Al mismo tiempo, estas soluciones provocan la necesidad de utilización de iluminación artificial. Aún durante las horas diurnas, existe la necesidad de utilización de iluminación eléctrica, lo que resulta contradictorio teniendo en cuenta la gran disponibilidad de iluminación en el exterior. En las Figs. 1 y 2 se presentan algunas imágenes de estos casos.



Fig. 1: Ventanas parcialmente pintadas.



Fig. 2: Ventanas con persianas móviles y papel aluminio.

Las situaciones observadas, no sólo dan indicios de la presencia de problemas lumínicos (nótese la luz eléctrica encendida en la Fig. 1), sino además de la necesidad de controlar la luz por motivos de ganancia de calor (Fig. 2).

La metodología de análisis que se describe a continuación, tiene como principal objetivo relacionar estos dos aspectos de la problemática.

3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

3.1 Mediciones y análisis preliminar

Este tipo de análisis se focaliza en la relación entre la distribución de iluminación natural desde la envolvente hacia el interior y la distribución de las temperaturas interiores, en el mismo sentido espacial.

Se utiliza como dato mediciones tanto del nivel de iluminación en diversos puntos interiores como de temperatura del aire en los mismos puntos, a fin de diagnosticar ambas distribuciones.

La geometría del ambiente donde se piensa aplicar esta metodología consiste en aulas de clase de planta rectangular, con ventanas sobre las fachadas sur y norte exclusivamente. A fin de analizar la distribución de la iluminación y temperaturas en un sentido perpendicular a estas fachadas, se trabajó con mediciones según este eje, en otro ambiente con una sola superficie lateral por donde ingresa luz, a fin de desarrollar el modelo de análisis. Se utilizó entonces una geometría similar, con una sola fuente de luz. Estas mediciones se efectuaron con el fin de utilizar datos de un ambiente relativamente controlado.

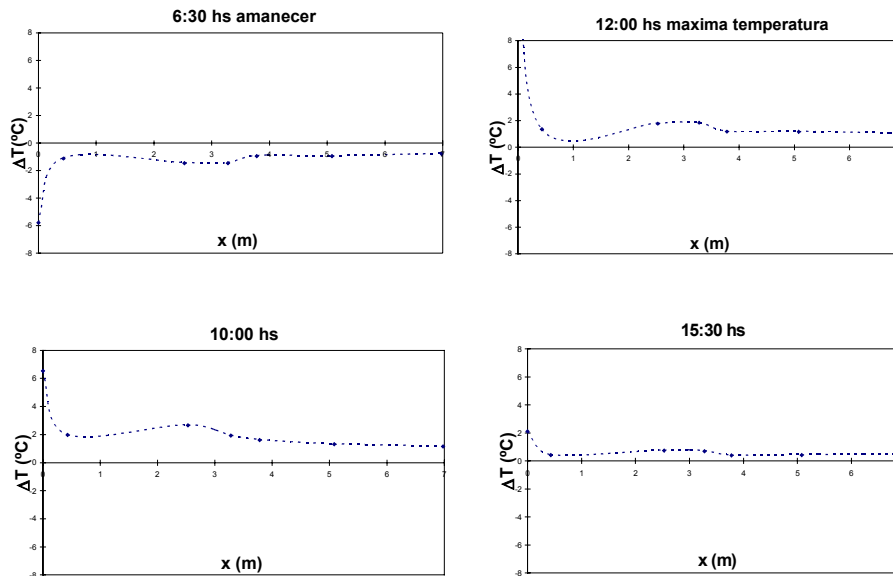


Fig. 3: Perfiles de temperatura interiores a lo largo de 1 día, según eje perpendicular a una envolvente parcialmente traslúcida (temperaturas tomadas a la sombra).

El caso analizado presenta una gran puerta-ventana en uno de sus lados laterales, que abarca casi la totalidad del muro (Marincic y otros, 1998). Considerando un eje perpendicular a la envolvente de un edificio, desde esta envolvente parcialmente traslúcida hacia el interior, el nivel de iluminación desciende abruptamente una vez traspasada la ventana (componente de paso vertical) (Baker y otros, 1993). Sumándose al efecto de amortiguamiento de la ventana, hay efectos de sombra debidos a los marcos, cuando la parte traslúcida no ocupa la totalidad del muro. Luego la luz continúa desciendo más gradualmente a medida que aumenta la distancia desde la ventana (Serra, 1989). Analizando el amortiguamiento de la luz interior respecto de la exterior en un instante dado, el mismo depende de la posición, en donde los valores atenuados caen en forma más o menos exponencial.

En cuanto a la distribución térmica, la misma también es función de la distancia (o profundidad desde la envolvente), para determinados instantes, y esta función corresponde aproximadamente a un perfil sinusoidal amortiguado, cuyo máximo corresponde siempre al límite con el medio exterior. Este perfil varía a lo largo del día, dependiendo si el edificio está ganando o perdiendo calor. En la Fig. 3 se grafican como ejemplo mediciones de temperatura efectuadas en un edificio con ganancia solar directa, a través de una puerta-ventana (una fuente de luz lateral).

El eje de ordenadas representa la diferencia entre temperatura del aire exterior e interior, mientras que el eje de abscisas es la distancia en profundidad desde $x=0$ (punto límite exterior), hacia el interior del edificio.

3.2 Cálculos y resultados

A fin de efectuar un análisis más sensible de las distribuciones de ambas variables y poner en evidencia ciertos patrones cíclicos del comportamiento de la luz y la temperatura, y analizarlos en función de la profundidad, se empleó una herramienta de cálculo muy adecuada para este fin, como es la transformada de Fourier, utilizada en diversos campos de la física y la ingeniería.

La transformada de Fourier permite pasar del espacio temporal al espacio frecuencial, y es útil tanto para analizar la serie de datos de temperatura como la de iluminancias, ya que ambas pueden ser idealizadas como funciones cuasi-periódicas (Wiener, 1958).

El análisis de Fourier permite descomponer prácticamente cualquier función temporal $f(t)$ periódica o cuasi-periódica (con algunas restricciones matemáticas) de período T , en una serie de componentes

sinusoidales simples. Aplicando la transformada de Fourier a una función de este tipo, es posible representarla en función de la frecuencia ω (y viceversa), efectuando cálculos basados en la operación [Eq.01]:

$$F(\omega) = F[f(t)] = 1/T \int_0^T f(t) e^{i\omega t} dt \quad \text{para } 0 < t < T \quad \text{[Eq.01]}$$

La nueva función F obtenida depende de la frecuencia ω y es la que se usará para el análisis, considerando la iluminancia y la temperatura como funciones cuasi-periódicas y por lo tanto susceptibles de ser transformadas. Se buscarán, por lo tanto, iluminancias en función de la frecuencia $F_E = f(\omega)$, para los distintos sensores (es decir, para distintas profundidades x), así como también las temperaturas en función de la frecuencia $F_T = f(\omega)$, para las mismas profundidades x . Para este análisis, en las Figs. 4 y 5 se graficaron las amplitudes de las funciones complejas F (se especificó el período correspondiente en lugar de la frecuencia para su mejor interpretación: como 8h, 12h y 1 día), de acuerdo a las diferentes profundidades desde la envolvente (x). Se busca evidenciar, por lo tanto, únicamente las amplitudes relevantes de la iluminancia y la temperatura, y su distribución en el sentido x .

En muchas situaciones de interés en la Física, las amplitudes de los armónicos de la frecuencia fundamental de una función, decaen rápidamente a medida que la frecuencia se incrementa. Por esto, en muchos casos un número reducido de armónicos puede ser representativo de la función (Isalgué, 1995). En los espectros de iluminancia y temperatura interior en función de la profundidad que presentamos más adelante, hemos obtenido frecuencias relevantes correspondientes a períodos de 1 día, 12 horas y 8 horas. De estas, la frecuencia más importante es la diaria. Este resultado es el esperado, debido a las variaciones diarias de las magnitudes exteriores incidentes (iluminancias y temperaturas). En cuanto a la relación con la profundidad, se espera obtener, para una determinada frecuencia, una serie de amplitudes que van disminuyendo a medida que aumenta la profundidad, tanto para temperatura como para iluminancia. A la distancia mayor, estas amplitudes deberían tender a la mínima oscilación de temperatura interior y a la variación mínima de iluminancia.

En la Fig. 4 se representa la iluminancia interior (módulo de la transformada de la iluminancia horizontal) en función de la profundidad, para diferentes frecuencias ω (la frecuencia se expresa en el período correspondiente), mientras que en la Fig. 5 se grafica la temperatura interior también en función de la profundidad, para poder ser comparada con el gráfico anterior.

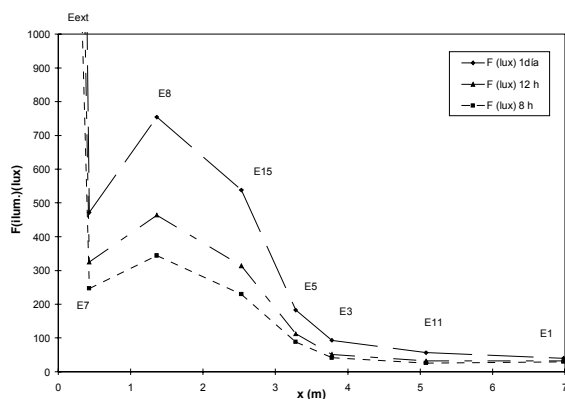


Fig. 4: Amplitudes de la transformada de iluminancia a diferentes distancias. (E_n son los puntos medidos)

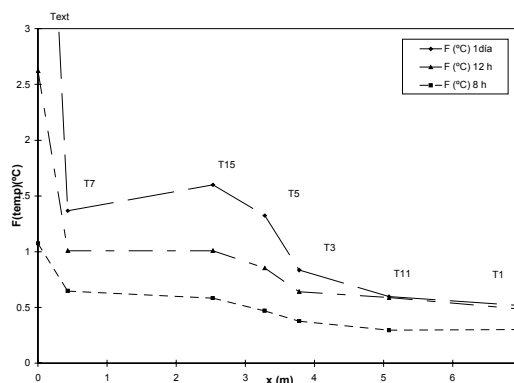


Fig. 5: Amplitudes de la transformada de temperatura a diferentes distancias. (T_n son los puntos medidos)

Sin embargo, se presentan dos cambios relativamente abruptos en los valores de las amplitudes: uno inmediatamente después del muro externo (primer sensor interior), como efecto de la componente de paso (ventana). Después de una cierta posición, comienzan a atenuarse de acuerdo a la distancia desde la ventana. La atenuación brusca de ambas magnitudes a efectos prácticos, se produce a una distancia representativa de aproximadamente entre 3 y 4 m del muro exterior. Esta es la particularidad que es de

interés para los propósitos del presente análisis. La misma aparece en ambas magnitudes ambientales a una distancia similar.

Esta variación en los valores de las amplitudes, apreciable a las frecuencias consideradas, está relacionada con la incidencia de la energía radiante proveniente del sol sobre la energía térmica, dentro de la zona de influencia de la luz natural. Si bien existen movimientos convectivos, se considera que la variación de las amplitudes de las temperaturas interiores producidas estos, dadas las condiciones interiores, tienen un orden de magnitud menor.

4. INTERPRETACIÓN Y APLICACIÓN

Este cambio en el comportamiento espacial establece una división de espacios en la distribución del comportamiento térmico interior, verificándose la existencia de dos zonas térmicas, coincidentes con las dos zonas principales de iluminación natural (N. Baker y otros, 1993), es decir, la zona perimetral más iluminada y la zona interior.

Sobre todo en las edificaciones donde es relevante la incidencia de la radiación solar directa, debido a su intensidad y a la cantidad de días despejados, hay que tener en cuenta, entonces, estas dos zonas principales con diferente tipo de comportamiento espacial lumínico y térmico.

Teniendo en cuenta este y otros factores, las propuestas de sistemas de iluminación natural, incorporando los resultados del análisis obtenido con esta metodología, deberán cumplir con los requisitos:

- Distribuir la luz a partir de una profundidad más allá del límite de la “zona perimetral”, dependiendo de la geometría de cada caso, que se deberá evaluar. Así se lograría una distribución de iluminancias más uniforme y se disminuiría el uso de iluminación eléctrica, así como las ganancias internas de calor que ésta produce.
- Desviar la radiación solar directa, para evitar excesivos contrastes en el interior y la incorporación de ganancias de calor directas. Esto disminuiría a su vez las cargas de aire acondicionado.
- Controlar el deslumbramiento producido por las ventanas, estudiando el campo visual hacia el sistema de iluminación propuesto.

Considerando la luz desde el punto de vista funcional, es importante no olvidar que la eficiencia de la luz natural es mayor que la de cualquier otra fuente de iluminación artificial. Es decir, con la misma energía se obtiene más luz y menor emisión de calor. Por esto, y basándonos particularmente en el primer requisito de diseño que presentamos, consideramos que en él se encuentra una de las claves del balance entre luz natural-luz artificial y calor, planteado al comienzo de este trabajo.

5. CONCLUSIONES

La metodología presentada es capaz de identificar diferentes zonas de comportamiento lumínico y térmico, que se deben tener en cuenta en el diseño de espacios con adecuada iluminación natural, teniendo presente el aporte energético tanto por ganancias de calor externas (calor radiante y por conducción) como por ganancias internas (iluminación eléctrica). Estas zonas determinarían en gran medida el alcance de las funciones de conducción de la luz, que deberán cumplir los sistemas de iluminación natural para acercarse a las condiciones de confort, así como a un adecuado balance de energías. Este aspecto es particularmente importante para climas cálidos, con muchos días despejados, en que la incorporación de iluminación debe ser evaluada con cuidado, debido al aporte de energía calórica no deseada.

Los únicos datos requeridos para el análisis son mediciones de iluminancias para diferentes profundidades desde la envolvente y de temperatura para diferentes profundidades, durante un período e intervalo de medición acorde con la variación de estas magnitudes. La herramienta de cálculo es la transformada de Fourier, que puede aplicarse a estas series de datos mediante cualquier software de

programación, obteniéndose la transformada de la iluminancia en función de la frecuencia y la transformada de la temperatura en función de la frecuencia. Para los fines de este análisis, es necesario graficarlas para las diferentes distancias, para analizar las distribuciones espaciales.

Esta metodología es apropiada para analizar de este modo la problemática presentada para iluminación natural en edificios en general, donde se requiera diagnosticar la distribución lumínica y el posible impacto sobre las condiciones térmicas interiores. Este es un aspecto frecuente sobre todo en climas cálidos. En nuestro caso en particular, hemos abordado la problemática en edificios educativos, que debido al tipo de tarea que se desarrolla en ellos, la iluminación natural es de particular importancia.

Creemos que la aplicación de este tipo de metodologías de análisis será el punto de partida para diagnosticar y proponer en el futuro soluciones, incorporando sistemas de iluminación natural que respondan a esta situación especial, de evitar la incorporación de mayores cargas térmicas por iluminación natural.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo económico de la Universidad de Sonora y de Promep.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAKER, N.; FANCHIOTTI, A.; STEAMERS, K., COMMISSION OF EUROPEAN COMMUNITIES (editors) (1993) *Daylighting in Architecture. An European Reference Book*, James & James Science Publishers, Bruselas y Luxemburgo.
- CORREA, S. R. (2001) *Visual Performance of Improved Fixtures in Classrooms*. En: PLEA 2001, Florianópolis, Brasil, pp. 897-901.
- DOBRIN (1998) Daylighting in Over-Glazed Educational Buildings. A case Study of a School in Slovenia. En: PLEA 98, Lisboa, Portugal, pp. 437-440.
- EDMONDS, I. R., GREENUP, P. J. (2002) Daylighting in the Tropics. *Solar Energy*, Vol. 73, N° 2, pp. 111-121.
- GARCÍA-CHÁVEZ, J.R. (2002) Estrategias para el Aprovechamiento de Luz Natural e Integración con Iluminación Eléctrica en Edificios en Climas Cálidos para Ahorro de Energía y Confort Lumínico. En: XXVI SEMANA NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR ANES 2002, Chetumal, México, pp. 207-212.
- ISALGUÉ, A. (1995) *Física de la Llum i el So*, Edicions UPC, Barcelona.
- MARINCIC, I.; ISALGUÉ, A.; ROSET, R.; SERRA, R. (1998) Relation Between Thermal and Daylight Distribution in a Building Section. En: EPIC 98, Lyon, Francia, pp. 573-578.
- SERRA, R. (1989) *Lugar, Clima y Arquitectura*, CIEMAT, España.
- WIENER, N.(1958) *The Fourier Integral and Certain of its Applications*. Dover Publications, Inc., New York.